



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE GRADO

TÍTULO DEL TFG: Efectos de las interferencias electromagnéticas en la operativa de drones

TITULACIÓN: Grado Ingeniería de la Aeronavegación

AUTOR: Laura Vallhonrat Blanco

DIRECTOR: Jaime Oscar Casas

DATA: 08 de septiembre del 2017

Título: Efectos de las interferencias electromagnéticas en la operativa de drones

Autor: Laura Vallhonrat Blanco

Director: Jaime Óscar Casas

Fecha: 08 de septiembre del 2017

Resumen

Debido al avance y al crecimiento en las telecomunicaciones las empresas que trabajan con drones suelen encontrar problemas de control causados por las interferencias electromagnéticas, dichos problemas aparecen cuando el dron vuela cerca de antenas de comunicación. En el presente documento se pretende caracterizar y medir el tipo de ondas que provocan fallos en los drones con tal de, posteriormente, encontrar métodos para evitar o mitigar los efectos producidos por las interferencias electromagnéticas.

En primer lugar, se ha realizado un trabajo de campo con un UAV (Unmanned Aerial Vehicle) propiedad de la empresa con la que se ha colaborado (HEMAV) para realizar el estudio, que consiste en testear el funcionamiento del dron en situaciones críticas, tales como el vuelo cerca de antenas emisoras de ondas con valores de densidad de potencia medias o elevadas, en un amplio rango de frecuencias. Se trata de casos en los que se puede encontrar un multirrotores en una operación de vuelo normal. Una vez obtenidos los rangos de densidad de potencia y de frecuencia que puedan afectar al sistema, se procederá a estudiar los datos recopilados en la memoria del UAV con el objetivo de hallar alguna correlación entre lo observado en las pruebas y los datos que recopilado por el LOG (memoria interna del UAV). Con los ensayos realizados se pretende encontrar el valor mínimo de densidad de potencia y sus respectivas frecuencias en los cuales el dron pueda mostrar fallos de control. Una vez obtenidos dichos márgenes se realizará una serie de ensayos en un entorno más controlado por lo que se hará uso de una cámara anecoica.

En última instancia se ha desarrollado una herramienta que permite utilizar el UAV en zonas en las que haya antenas tipo Yagi. Dicha herramienta ha sido diseñada con tal de que pueda ser adaptada para cualquier tipo de antena. Una vez calibrada la herramienta, ésta es capaz de mostrar a que distancia máxima horizontal se puede acercar el dron a la antena antes de entrar en la zona crítica. Finalmente, se ha propuesto una serie de soluciones que, aplicadas, pueden mitigar los efectos debidos a las interferencias electromagnéticas.

Title: Efectos de las interferencias electromagnéticas en la operativa de drones

Author: Laura Vallhonrat Blanco

Director: Jaime Óscar Casas

Date: September 08 th 2017

Overview

Companies that work with drones often encounter electromagnetic compatibility problems when flying near communication antennas. This document aims to characterize and measure the type of waves that cause interferences and find methods to avoid or mitigate these effects.

In the first place, a fieldwork has been made by using a UAV (Unmanned Aerial Vehicle) propriety of the company we have collaborated with (HEMAV). This study consists of testing the behavior of the drone in critical situations, like flying near antennas that emit medium or high power density values and over a wide range of frequencies. These cases are easily founded in normal flight operations. Once measurements have been obtained, the UAV memory will be studied in order to find a more accurate density value. With these tests, it is tried to find the minimum limit of power density and their respective frequencies in which the drone begins to show failures.

After obtaining this range of power densities and frequencies, a second test will be carried out. This second test will be done in a controlled environment, an anechoic chamber. Once the test has been done a table will be generated showing the frequencies related to the maximum power densities accepted by the UAV. Taking into account that under normal conditions the polarization of the antennas cannot be detected the tests will be run under the worst condition.

To conclude, a tool has been designed to be used in case a Yagi antenna is located near the drone. Moreover, the tool has been designed to easily adapt it to other types of antennas. Once the tool is calibrated, it delivers the maximum horizontal distance to which the UAV can be approached so as not to enter into the critical zone. Several solutions are also suggested which, in case of implementation, can mitigate the effects of electromagnetic interferences.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO DEL PROYECTO	2
1.1 Objetivo general.....	2
CAPÍTULO 2. ASPECTOS GENERALES DE LA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (EMC)	3
CAPÍTULO 3. ANTENAS.....	4
3.1 Modelo de propagación en el espacio libre.....	4
3.2 Tipos de antenas	5
CAPÍTULO 4. MULTIRROTOR.....	6
4.1 Multirrotor.....	6
4.2 Controladora	7
4.2.1 Controladora DJI A2	8
4.2.2 Controladora Pixhawk 3D robotics	9
4.3 Multirrotores utilizados para los ensayos	10
4.3.1 Multirrotor 1.....	10
4.3.2 Multirrotor 2.....	11
4.3.3 Multirrotor 3.....	11
CAPÍTULO 5. ESTUDIO DEL PROBLEMA.....	12
5.1 Cómo se realiza el estudio de campo	12
5.1.1 Set up de las medidas	12
5.1.2 Software DJI losd	14
5.1.3 Protocolo para realizar medidas.....	15
5.2 Ensayos en los alrededores de las antenas.....	15
5.2.1 Ensayos en los que el Multirrotor 1 no ha mostrado fallos del sistema de control 16	16
5.2.2 Ensayo en los alrededores de la torre del Faro de Salou	16
5.2.3 Ensayo en los alrededores de la torre de Collserola.	24
5.3 Cámara anecoica	27
5.3.1 Protocolo de medidas para la cámara anecoica	28
5.3.2 Resultados de los ensayos realizados en la cámara anecoica.....	30
5.4 Conclusiones generales de los ensayos	32
CAPÍTULO 6. PROTOCOLO, HERRAMIENTA Y PROPUESTAS.....	35
6.1 Protocolo de trabajo y utilización de la herramienta para evitar fallos por EMI.....	35

6.2	Propuestas para mitigar los efectos de las EMI.....	35
6.2.1	Primera propuesta: filtrado	36
6.2.2	Segunda propuesta: el apantallamiento y blindajes.....	36
6.2.3	Tercera propuesta: sustitución de elementos	36
	REFERENCIAS.....	38

INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha habido un auge en el uso y desarrollo de los multirrotores, utilizándose en la actualidad para múltiples tareas. Los multirrotores, conocidos comúnmente como drones, fueron creados en la primera mitad del siglo XIX como bancos de pruebas tecnológicos para posteriormente poder desarrollar modelos de aviación tripulada, aviones más grandes y con piloto a bordo.

Asimismo, el desarrollo de las telecomunicaciones ha ido evolucionando de manera notable y el uso de las aplicaciones electrónicas ha ido en aumento conllevando un incremento en la contaminación electromagnética del entorno. Este hecho ha provocado que las interferencias electromagnéticas sean un problema de creciente importancia para los sistemas electrónicos, ya que la mayoría de ellos se ven afectados por dichas interferencias de una forma u otra. Estas interferencias pueden producirse de forma radiada o inducida.

Las interferencias electromagnéticas (EMI, Electromagnetic Interference) pueden llegar a poner en peligro el funcionamiento de los sistemas de comunicación, degradarlo seriamente o interrumpirlo de forma repetida. En nuestro entorno cotidiano convivimos con multitud de sistemas de comunicación (radares, sistemas de control de tráfico aéreo, WIFI, radios comerciales, telefonía móvil, etc.) que pueden influir de forma negativa en los dispositivos electrónicos, razón por la cual es esencial tenerlos en cuenta al diseñarlos.

Al realizar operaciones de vuelo con multirrotores (drones) cerca de torres de comunicación varias empresas se han encontrado con problemas de estabilidad. Para la realización del presente estudio se ha acudido a la empresa Hemav ya que posee los elementos y medios necesarios para dicho estudio.

CAPÍTULO 1. MARCO DEL PROYECTO

Al analizar el problema de la pérdida de control de los drones en operaciones de vuelo se ha planteado la posibilidad de que pueda deberse a las interferencias electromagnéticas (EMI) que se producen en la interacción del UAV con algún sistema de comunicación. Por ello, el objetivo del presente proyecto es el de determinar si las ondas electromagnéticas son la causa y, en el caso afirmativo, proponer varias soluciones con tal de evitar o mitigar estos efectos. En primera instancia se ha estudiado qué son, de dónde provienen y cuáles son las características de los campos que influyen negativamente en los drones. Con el objetivo de identificar y concretar dicho problema se ha llevado a cabo un estudio de las antenas más potentes del entorno en el que nos encontramos de forma teórica. Una vez estudiadas, se ha realizado ensayos de prueba y error por la que se ha hecho uso de una sonda de campos electromagnéticos de banda ancha para medir la densidad de potencia y una de banda estrecha para medir las frecuencias. Posteriormente se ha realizado una serie de ensayos en una cámara anecoica, la cual sirve para absorber las reflexiones producidas por las ondas.

1.1 Objetivo general

El principal objetivo del presente trabajo consiste en averiguar si las interferencias electromagnéticas radiadas son las causantes de la pérdida de control de los drones durante las operaciones de vuelo. En caso afirmativo, el propósito sería el de identificar la densidad de potencia mínima y sus respectivas frecuencias que provocan dicha pérdida de control en un entorno no controlado, acotar estos valores realizando ensayos en un entorno controlado, y posteriormente, diseñar un procedimiento operacional con tal de evitar los problemas con las interferencias y proponer soluciones para mitigar los efectos de las mismas. De los posibles orígenes de las interferencias el presente trabajo se centra en el estudio de aquellas con orígenes externos y generados por antenas de telecomunicación. Se realizará ensayos de inmunidad radiada tanto en áreas cubiertas por antenas de comunicación encontradas en el territorio catalán como en una cámara anecoica.

Posteriormente, con los datos de inmunidad radiada se llevará a cabo un procedimiento en el cual se elaborarán las herramientas necesarias con tal de que cualquier piloto pueda, de forma sencilla, saber si el entorno es adecuado o no para realizar operaciones de vuelo. Para realizar dichos ensayos se utilizarán tres herramientas clave; tres multirrotors configurados por la empresa con todos los elementos básicos, una sonda de campos electromagnéticos que se utilizará para realizar las mediciones en los ensayos de campo y un analizador de espectros para poder identificar las frecuencias en las que surge un problema de control de forma precisa.

Teniendo en cuenta que los elementos de medida han sido proporcionados por la empresa HEMAV, dispondremos de ellos de forma muy puntual, por lo que únicamente se utilizará en alguna torre de comunicación.

CAPÍTULO 2. ASPECTOS GENERALES DE LA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (EMC)

En el presente capítulo se revisa los conceptos fundamentales de la teoría electromagnética. El objetivo es explicar qué es una interferencia de forma teórica. El *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define el concepto EMC como la propiedad que poseen las instalaciones o aparatos electrónicos, eléctricos o informáticos y hace que estén en funcionamiento correctamente, en un contexto dado, en presencia de otros aparatos o perturbaciones provenientes del exterior (ver [1]). En otras palabras, un sistema electromagnéticamente compatible es aquel que posee la habilidad de no ser sensible ni causar EMIs. Estas interferencias se definen como la señal radiada, ya sea por elementos de comunicación, por el clima o por cualquier otro factor que pone en peligro la integridad del funcionamiento de un sistema.

Se puede definir un sistema como electromagnéticamente compatible con su medio si éste satisface los tres criterios siguientes, que tienen en cuenta sus orígenes y receptores:

- a) Aquel que no causa interferencias con otros sistemas o consigo mismo.
- b) Aquellas producidas por el medio ambiente sobre sistemas eléctricos.
- c) Aquellas producidas por un sistema eléctrico sobre el medio.

La interferencia electromagnética puede ser de dos tipos: radiada o conducida. Las emisiones radiadas suelen tener como fuentes más usuales los transmisores de radar, los equipos de radio y los equipos eléctricos de generación y transformación de la energía eléctrica. El término llamado modo de acoplamiento es la forma en la cual la interferencia electromagnética externa se introduce en un circuito. La interferencia se puede acoplar a una antena o a un cable del sistema que va a ser atacado.

En referencia a la normativa de compatibilidad electromagnética de drones es de destacar que actualmente no existe ninguna legislación.

CAPÍTULO 3. ANTENAS

El presente capítulo se centra en entender y deducir cómo afectan estos aparatos a nuestro sistema. Para ello es importante saber qué son las antenas y cómo propagan las señales. El *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (ver [2]). La función de las antenas es transformar una señal de Radio Frecuencia (RF) que viaja a través de un conductor en una onda electromagnética en el espacio libre. Las antenas son capaces de radiar o recibir estas ondas. Las antenas se diseñan e implementan en función de la aplicación, puesto que cada aplicación impone condiciones particulares tales como frecuencia de trabajo, niveles de potencia, etc.

3.1 Modelo de propagación en el espacio libre

El modelo de propagación en el espacio libre se usa únicamente cuando el transmisor y el receptor tienen una línea de vista directa entre ellos y sirve para predecir la potencia señal recibida.

$$P_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 G_R P_T G_T(\theta, \phi) L \quad (3.1)$$

Este modelo de propagación en el espacio libre nos indica que la potencia recibida decrece al cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor. También podemos observar que la potencia recibida depende de las ganancias de ambas antenas, de las pérdidas, de la longitud de onda (inversamente proporcional a la frecuencia) de la potencia transmitida y, como ya hemos anticipado anteriormente, de la distancia entre antenas. Hay que tener en cuenta que las relaciones obtenidas son válidas solo cuando se está en el campo lejano, es decir, cuando una antena radia lo hace emitiendo la radiación distribuida de cierta forma. Se le llama a esta distribución relativa de la potencia radiada diagrama de radiación. En la ecuación (3.1) no se puede ver una relación clara entre las potencias recibidas, potencias transmitidas y la frecuencia. Es destacable que la potencia depende del tipo de antena y ésta a su vez de la frecuencia.

La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, por lo tanto, para frecuencias bajas la longitud de onda es más grande. Esto se puede extrapolar a que cuanto menor sea la frecuencia, mayor será su longitud de onda y mayor será la potencia recibida. En el Anexo C se explica cómo se ha realizado la herramienta a partir de este modelo de propagación.

3.2 Tipos de antenas

El tipo de antena se define según la aplicación de ésta y su tamaño está relacionado con la banda de frecuencias que se quiere captar o transmitir. Generalmente los elementos de radiación se componen de una agrupación en configuración *array* de diversas antenas, de esta forma se puede generar un determinado diagrama de radiación.

Las antenas se colocan en sitios estratégicos y elevados como torres de comunicación. Los diferentes tipos de antena más utilizados se recopilan en la siguiente tabla junto a sus características generales.

Tabla 3.1 Características generales de las antenas más comunes.

Tipo de antenas	Diagrama de radiación	Frecuencia (MHz)	Potencia media	Aplicación
Colineales	Omnidireccional	30-300	250 W	TV UHF
Dipolos en V	Directivo	88-108	+5 kW	Radio FM
Paneles	Directivo	30-300	2,5 kW	TV VHF, TV UHF
Dipolo de alta potencia	Omnidireccional	30-3000	5 kW	Radio digital
Yagi	Directivo	88-108	*	Radio FM

* Depende del núm. de dipolos



Figura 3.1. Antena colineal

Figura 3.2. Dipolo en V

Figura 3.3. Paneles

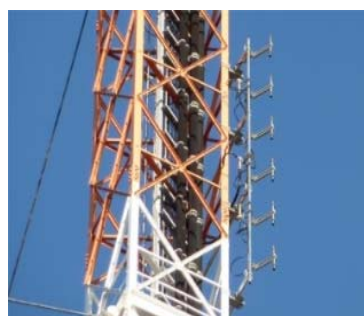


Figura 3.4. Dipolos de alta potencia



Figura 3.5. Antena Yagi

Todas las figuras han sido extraídas de *Google Images*.

CAPÍTULO 4. MULTIRROTOR

4.1 Multirrotor

Los multirrotores, también llamados drones o UAV, son vehículos aéreos propulsados por varios motores. El tener varios motores y poder distribuirlos en diferentes puntos del sistema proporciona la ventaja de poder sobrevolar cualquier zona de forma estática y estable. Esta estabilidad se logra gracias a un elaborado sistema compuesto por tecnología avanzada que controla el movimiento mediante la aceleración de sus múltiples pares motores, los cuales proporcionan sustentación vertical.

En la actualidad existen variadas y múltiples configuraciones de drones, tanto en hardware como en software. A continuación, se nombra y explica brevemente cada una de las partes más comunes de estas aeronaves.

- **Chasis:** es el esqueleto o estructura donde van alojados todos los componentes del multirrotor para su correcto funcionamiento. Los materiales utilizados están muy relacionados con las prestaciones a las que se quiera destinar el dron.
- **ESC (Electronic Speed Control) o controladores de velocidad electrónicos:** son los responsables de proporcionar electrónicamente las revoluciones necesarias a cada motor/hélice de manera individual en un momento determinado para realizar diferentes movimientos (elevaciones, rotaciones, translaciones, acrobacias, etc.).
- **Unidad de control:** es el cerebro de todo dron. Es donde van conectados todos los componentes del dron (reguladores, sensores, etc.). Los sensores más comunes son: giróscopo, acelerómetro, barómetro o altímetro, brújula, GPS y autopiloto.
- **Hélices:** son mecanismos compuestos por varias aspas curvas que se unen de forma concéntrica y al girar desplazan el fluido en el que están.
- **Baterías:** proporcionan la energía necesaria. Son componentes muy pesados por lo que es esencial que sean capaces de tener una buena relación peso/capacidad para maximizar la autonomía de vuelo del Dron. Las más utilizadas son las baterías Li-Po (polímero de litio) debido a su densidad de energía, su bajo peso y su alta tasa de descarga que es ideal para maniobras ágiles como las de un multirrotor.

En los siguientes apartados se explica brevemente el funcionamiento de estos elementos y las características específicas de los elementos que utilizamos en nuestros UAV. De todos los sistemas integrados en los drones nos centraremos en el más sensible a campos electromagnéticos: la controladora. La empresa Hemav opera sus vuelos con dos tipos de drones, la diferencia principal es el sistema de control integrado puesto que unos operan con la controladora A2 y otros con el autopiloto Pixhawk.

4.2 Controladora

Un autopiloto o controladora es aquel sistema capaz de guiar una aeronave sin intervención de un ser humano. El piloto automático es capaz de actuar sobre los tres ejes de movimiento de las aeronaves mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados (señal de referencia) (**Fig. 4.1**).

Esta manipulación se basa en comparar el valor medido con el valor deseado. Así pues, basándose en esta comparación calcula el error y actúa con el fin de corregirlo. Por lo tanto, como se puede deducir, es un sistema retroalimentado.

A continuación, se nombran los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación y un breve resumen de éstos:

- Sensores: permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.
- Controlador: utilizando los valores determinados por los sensores y la señal de referencia impuesta, calcula la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control en función de cierta estrategia.
- Actuador: es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control.

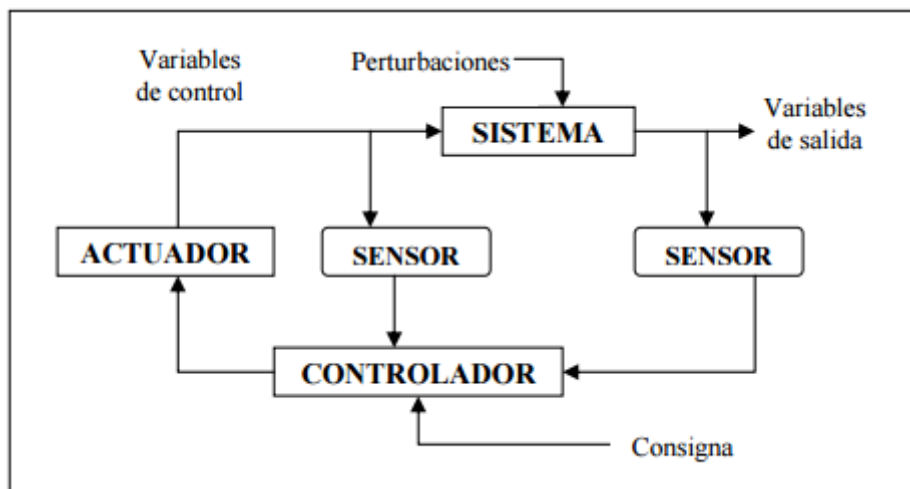


Fig. 4.1. Esquema de funcionamiento de un sistema de control genérico.

Los controladores de estabilización que se han utilizado en el presente proyecto son el Multi-Rotor DJI A2 y el Pixhawk 3D robotics. Ambos son sistemas de vuelo completo para varias plataformas de tipo multirroto con uso comercial e industrial (**Fig. 4.2**).

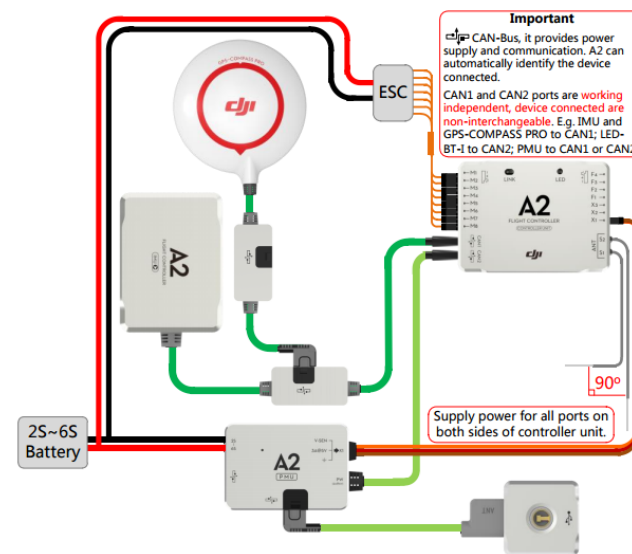
4.2.1 Controladora DJI A2



Fig. 4.2. Controladora DJI A2.

Los diferentes sistemas que incorpora la controladora son: (ver [3]) (Fig. 4.3):

- Power Management Unit (PMU): es el encargado de administrar de forma segura los niveles de potencia.
- Controller unit: se trata del sistema central de control.
- Inertial Measurement Unit (IMU): dotado con sensores inerciales con los cuales mide el movimiento y con sensores barométricos con los que se mide la altitud.
- GPS-COMPAS PRO: elemento que permite conocer la posición del autopiloto.
- LED-BT-I: indicador del correcto funcionamiento del sistema.



Controller Unit (Built-in Receiver DR16)	PMU(Power Management unit)	IMU(Inertia Measurement Unit)
LED-BT-I	GPS-COMPAS PRO	Accessories
		Micro-USB Cable (1) Servo Cables (2) GPS Bracket Double side sticky pads.

Fig. 4.3. Accesorios de la DJI A2.

En el manual de este autopiloto se especifica que de todos los elementos que componen la controladora el más vulnerable a interferencias electromagnéticas es el GPS-COMPAS PRO. El COMPAS es un instrumento que señala cierta dirección acimutal, cuyas propiedades direccionales dependen del magnetismo de la tierra. Por otro lado, no se descarta la posibilidad de que las perturbaciones electromagnéticas interfieran entre la comunicación controlador-mando.

4.2.2 Controladora Pixhawk 3D robotics

El modelo de autopiloto que se ha utilizado es el Pixhawk 3D robotics (ver [4 y 5]). Dicho autopiloto dispone de complementos externos parecidos a los de la controladora A2 Dji, como el GPS-COMPAS, con el que se obtiene la ubicación y un módulo de control de potencia entre otros (**Fig. 4.4**).

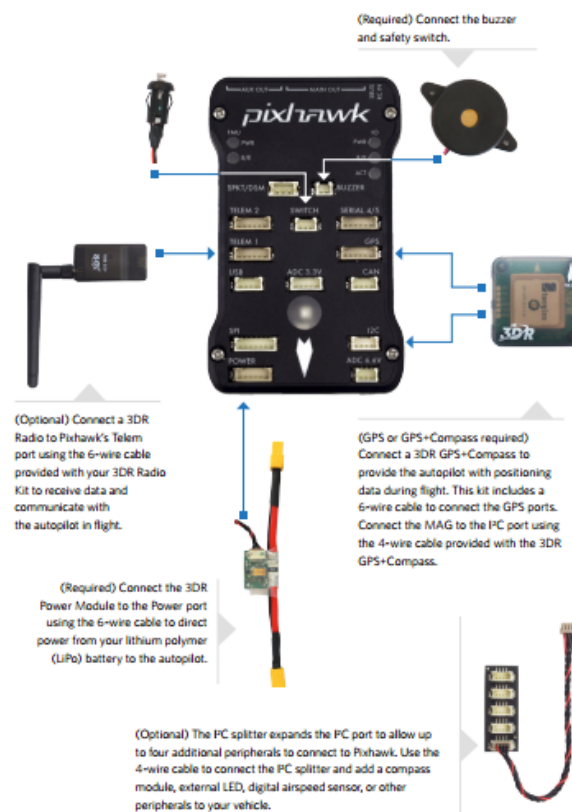


Fig. 4.4. Accesorios Pixhawk 3D Robotics.

En el manual de este autopiloto no se indica específicamente que pueda fallar el GPS-Compass a causa de las EMIs.

4.3 Multirrotores utilizados para los ensayos

Se ha realizado dos tipos diferentes de ensayos de inmunidad radiada: uno con antenas previamente localizadas y un segundo ensayo en una cámara anecoica. Las pruebas se han realizado con drones equipados de diferentes elementos ya que por falta de recursos no se dispone de ellos en todo momento. El primer ensayo se ha realizado con un UAV equipado con los elementos básicos y el segundo se ha llevado a cabo con dos multirrotores totalmente equipados, uno de ellos con sistemas muy parecidos al dron con el que se han realizado las pruebas fuera de la cámara anecoica, aunque mucho más completo.

4.3.1 Multirrotor 1

Con el multirrotor 1 (**Fig. 4.5**) se ha realizado la mayoría de las pruebas del trabajo de campo que consiste en desplazarse a gran cantidad de torres de telecomunicación para poder detectar si las ondas emitidas por las antenas situadas en las torres provocan algún fallo en el sistema y, en su caso, poder acotar de forma aproximada la franja de potencias y frecuencias que pueden provocar serias interferencias.

Este multirrotor está compuesto de elementos similares a la controladora DJI A2 y consta de una pantalla por la cual se observa la información básica y una memoria donde se guardan todos los inputs de la controladora (de la que extraemos los llamados LOGs). Asimismo, tiene un pequeño led que indica si el mando y el receptor están bien conectados y tres servos que indican los movimientos que realizaría el dron en operación de vuelo (con estos servos podemos ver cuándo falla el sistema).

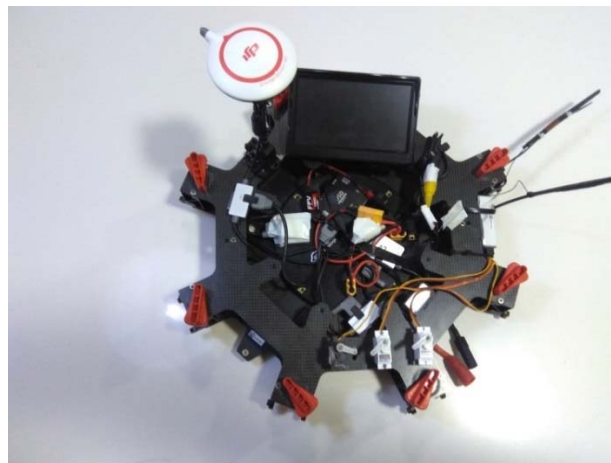


Fig. 4.5. Multirrotor 1

4.3.2 Multirrotor 2

Se trata de uno de los multirrotores utilizados en la cámara anecoica, equipado concretamente con el mismo modelo de controladora que el Multirrotor 1. Este multirrotor, a diferencia del utilizado en los ensayos de campo, no tiene servos ni pantalla, está compuesto por seis brazos con sus respectivas hélices y motores y una base para apoyarse en el suelo (**Fig. 4.6.**).

Es de gran importancia realizar ensayos con multirrotores con diferente número de brazos y motores ya que las EMIs pueden afectar de diferente forma debido a la superficie con la que se encuentran las ondas electromagnéticas.



Fig. 4.6. Multirrotor 2.

4.3.3 Multirrotor 3

El multirrotor 3 es el último utilizado para el trabajo de campo del presente proyecto y se trata de un multirrotor que en vez de utilizar una controladora A2 Dji utiliza un autopiloto Pixhawk. A diferencia del Multirrotor 1, éste no tiene los servos con los que se pueden ver los movimientos ni la pantalla, pero al igual que el multirrotor 2 está compuesto de seis brazos equipados con motores y hélices (**Fig. 4.7.**).



Fig. 4.7. Multirrotor 3.

CAPÍTULO 5. ESTUDIO DEL PROBLEMA

5.1 Cómo se realiza el estudio de campo

En primera instancia se estudia de forma teórica los componentes de los drones de la empresa para detectar los elementos susceptibles a interferencias electromagnéticas. En segundo lugar, se realiza una recopilación de antenas que emitan altos niveles de potencia a grandes rangos de frecuencias con tal de realizar numerosos ensayos y poder acotar el rango de frecuencias y potencias que generan problemas. Es de destacar que no se ha podido detectar la polaridad de las ondas transmitidas por las antenas estudiadas, razón por la cual no se tendrá en cuenta.

Una vez en la cámara anecoica se estudia qué polaridad afecta más y se utilizará esta como referencia para los cálculos posteriores. Se acudió con el Multirrotor 1 a estas antenas y se siguió el protocolo establecido. En la medida de lo posible cada metro avanzado se van tomando las medias y efectuando las pruebas que consisten en realizar movimientos de rotación del dron en los tres ejes espaciales. Por último, se han realizado ensayos con los Multirrotos 2 y 3 en la cámara anecoica de la empresa IDNEOV Technologies.SL. En la cámara se han realizado varios barridos de frecuencia a potencias fijas para ver los límites de afectación y se ha estudiado qué polarización facilita que hayan interferencias electromagnéticas.

5.1.1 Set up de las medidas

Para llevar a cabo el estudio se ha escogido una sonda de campos electromagnéticos que comprende un gran rango de frecuencias. El instrumento es capaz de realizar medidas de campo eléctrico desde 0,1 V/m hasta 200 V/m y los valores usuales de comunicación oscilan entre 0 V/m y 10 V/m. Tanto por los rangos de frecuencias como por los rangos de campo eléctrico esta sonda de campos electromagnéticos es idónea para el estudio. Para cubrir la poder detectar las frecuencias a las que son radiadas las ondas del entorno se ha optado por utilizar un osciloscopio ya que con éste es posible detectar las frecuencias en las que se encuentran los picos de potencia. Dicho osciloscopio es capaz de medir frecuencias desde 10 kHz hasta 3,4 GHz, por lo que cubre todas las frecuencias de nuestro interés. Con este instrumento se ha tenido un problema logístico que se detallará en el apartado *5.2 Resultados*.

A la hora de medir los parámetros se debe tener en cuenta que los sistemas de medición que se han utilizado no son muy precisos, por lo que se ha expuesto las especificaciones técnicas de los sistemas involucrados en las medidas.

5.1.1.1 Sonda de campos electromagnéticos:

La sonda de campos electromagnéticos que se ha utilizado es de la marca *Chauvin arnoux*, concretamente el modelo *C.A 43*.



Fig. 5.1. Sonda de campos electromagnéticos.

Fuente: web oficial de Chauvin-arnoux.

Tabla 5.1. Características de la sonda de campos electromagnéticos Chauvin arnoux, modelo C.A 43.

<i>Rango medidas de campo eléctrico</i>	0,1 V/m – 200 V/m
<i>Frecuencias comprendidas</i>	100 kHz – 2,5 GHz
<i>En el modo $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ mide entre</i>	0,1 a 1999
<i>Resolución $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ de 0.1 a 199.9</i>	0,1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
<i>Resolución $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ de 200 a 1999</i>	1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
<i>Precisión $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ de 0.1 a 199.9</i>	1 dB
<i>Precisión $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ de 200 a 1999</i>	2 dB

Las precisiones hacen referencia solo al equipo sin sonda de campos electromagnéticos: $\pm 0,5\%$ de la lectura $\pm 0,2\%$ del calibre.

5.1.1.2 Analizador de espectros:

Del mismo modo, se ha dispuesto de un analizador de espectros de la marca *Advantest* modelo *R4131D*. El objetivo de este apartado es conocer las características más relevantes del analizador para poder analizar los datos de forma más acertada.

Tabla 5.2. Características del analizador de espectros *Advantest*, modelo *R4131D*.

<i>Rango de frecuencias</i>	10 kHz – 3.5 GHz
<i>Impedancia de entrada</i>	50 Ω
<i>Precisión de la frecuencia centrada</i>	$\pm(100 \text{ kHz} \pm 3\% \text{ del span})$ si $<2.5 \text{ GHz}$ $\pm 10 \text{ MHz}$ si $> \text{de } 2.5 \text{ GHz}$
<i>Span de frecuencia</i>	50 kHz – 4 GHz
<i>Precisión de span de frecuencia</i>	$\pm 5\%$



Figura 5.2. Analizador de espectros *Advantest* modelo *R4131D*.

Es de gran interés saber la precisión de nuestras medidas con tal de conocer que valores reales estamos obteniendo exactamente. No obstante, no es necesaria mucha precisión en las medidas que vamos a tomar ya que se desean valores cuantitativos. No es necesario saber de forma muy precisa la frecuencia a la que se emite sino saber en qué banda de frecuencias se emiten las ondas para poder saber qué tipo de comunicación hay en el entorno en el que se están realizando las medidas. De esta forma se puede saber qué tipo de antenas están cerca y, por lo tanto, podremos realizar el penúltimo de los objetivos.

5.1.2 Software DJI iosd

Haciendo uso de este software se han podido añadir gráficas con los datos recopilados de la controladora del dron. Estos datos se han contrastado con los resultados obtenidos en los ensayos y se ha comprobado si tienen coherencia. Para poder obtener los outputs es necesario tener un ordenador con sistema operativo Windows 7, el software DJI iosd y sus respectivos drivers. Todo lo relacionado con la aplicación se puede obtener de la web de DJI.

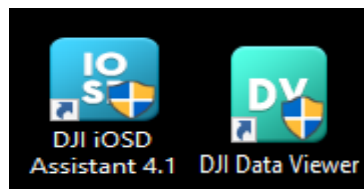


Fig. 5.3. Imágenes de acceso directo al software.

Haciendo uso del software de la izquierda es posible descargar los datos del LOG y con el la derecha se pueden conformar las gráficas. En el anexo A se recopilan una serie de gráficas producidas por la controladora en un entorno perjudicial y otro no perjudicial para la integridad del funcionamiento de todo el sistema. De esta forma, se ha podido comparar las gráficas y entender las características del output en el que se detecta un fallo. Con la lectura del primer output del primer ensayo se ha observado que la forma de medir no era la adecuada dada la gran dificultad para entender correctamente qué estaba pasando. Para evitar este tipo problemas se ha realizado el siguiente protocolo.

5.1.3 Protocolo para realizar medidas

Dado que no existe ningún tipo de protocolo establecido en cuanto a pruebas de campo cercanas a antenas para el estudio de la compatibilidad electromagnética, se ha diseñado uno. A continuación, se establece un protocolo con tal de poder obtener unas medidas con repetitividad y de esta forma ser capaces de sacar unas conclusiones lo más precisas posibles.

- a) El primer paso consiste en limpiar la memoria de LOG del dron que vamos a usar con el software DJI iOSD.
- b) Una vez cerca de la antena en la que se van a realizar los ensayos y cuando se disponga de una línea de visibilidad directa se ha de encender el medidor de campos así como el dron y poner el formato con el cual se realizarán las medidas. Se debe intentar detectar posibles fallos de control en el dron mediante la observación del comportamiento de los servos con los que va equipado nuestro UAV.
- c) Cada vez que se realice un desplazamiento longitudinal se puede realizar cada dos metros si la geografía lo permite. Se debe esperar un mínimo de 5 segundos con el dron estático y, posteriormente, estar 5 segundos realizando giros suaves alrededor de los tres ejes. De esta forma los fallos del dron serán visibles y dejará un margen de tiempo para ver si realmente los campos electromagnéticos afectan al dron.
- d) Si durante el ensayo se detecta una anomalía en el comportamiento del multirrotores se debe tomar nota de la densidad del campo electromagnético medido y buscar una repetitividad realizando los mismos pasos.
- e) A posteriori, se diseña una herramienta que indique la distancia a la que el entorno empieza a ser potencialmente perjudicial para nuestro sistema.

Se debe recordar que el objetivo es encontrar el límite en el que se acoplan las ondas interferentes en el sistema del dron, que es cuando éste no puede soportar más las interferencias y presenta un comportamiento anómalo.

5.2 Ensayos en los alrededores de las antenas.

En un principio se pretendía medir simultáneamente las frecuencias y las amplitudes de las señales, pero no ha sido posible ya que la empresa con la que se ha trabajado no disponía de un analizador de espectros portátil, razón por la cual no se ha podido utilizar este aparato en todas las medidas.

Para realizar las medidas se ha dispuesto de varios elementos explicados en el apartado 5.1.1 *Set up de medidas*, pero uno de ellos, por problemas logísticos, solo se ha podido utilizar en una ocasión. Dicho elemento es el analizador de espectros con el que se pretendía realizar barridos de frecuencia cerca de las

antenas. Se trata de un ensayo muy interesante ya que el campo eléctrico y magnético depende de la frecuencia y de esta forma se habrían podido homogeneizar las medidas. A pesar de ello, debido al peso del aparato y el modo de alimentación de éste no ha sido posible y se han realizado la mayoría de pruebas de otra forma. Para solucionar este problema se ha empleado otro método de trabajo basado en el estudio del tipo de antena y de éste extraer el rango de frecuencias al que es capaz de emitir; de este modo, podemos acotar de alguna forma las bandas de frecuencias.

5.2.1 Ensayos en los que el Multirrotor 1 no ha mostrado fallos del sistema de control

Es de gran importancia saber qué antenas producen problemas en el sistema, tanto como las que no. Por esta razón, en el presente apartado se recopilan las antenas que no provocan interferencias en el multirrotor. En el Anexo B se recogen dichas antenas junto a imágenes de las mismas.

Estos ensayos se han realizado con el Multirrotor 1 y en la cercanía de las antenas nombradas en la **tabla 5.3**. En los alrededores de estas antenas el dron no ha presentado ningún indicador de fallo de control. No obstante, llegados a este punto nos encontramos con el problema de que al no ser capaces de situarnos en el haz principal de las antenas no se puede afirmar que estas no nos afecten.

Tabla 5.3. Antenas y sus características.

	Localización	Tipo de antena	Densidad de Pot mín.	Densidad de Pot máx.
Torre telefónica del Loreto	41.137539 N, 1.273823 E	Telefonía	0,3 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	0,8 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
La oliva	41.131714 N, 1.252861 E	Radio AM y FM (Radioaficionados)	0,4 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	1,2 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
Torre de Pallejá	41.418467 N, 1.986755 E	Muchas antenas juntas. Tambores, dipolos, etc.	0,1 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	4,3 $\mu\text{W}/\text{m}^2$

5.2.2 Ensayo en los alrededores de la torre del Faro de Salou

Se han realizado una serie de medidas cerca de la torre ubicada en el Faro de Salou, en la calle de la Falconera número 58, Tarragona. Las coordenadas GPS de dicho lugar son 41.0356131 N, 1.172150 E. y la altura de la antena es de aproximadamente 15 metros (**Fig.5.4**). En la figura se ha marcado las antenas que pueden producir interferencias.

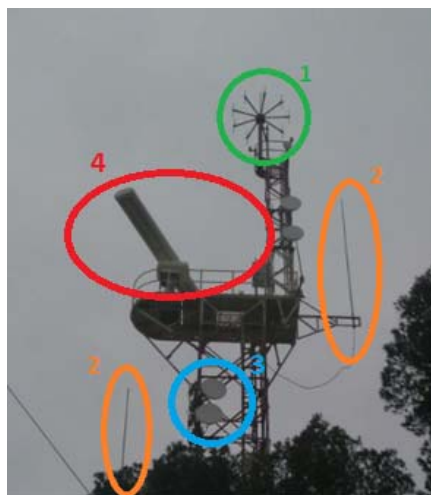


Fig. 5.4. Torre Cap Salou.

Antes de realizar las medidas se ha estudiado las características de las antenas situadas en ese punto con tal de realizar un acotamiento previo de las frecuencias a las que se pueden acoplar las interferencias. Para esta primera torre no se ha dispuesto del material necesario para realizar un barrido de frecuencias, por lo que se ha hecho una aproximación con el estudio teórico. La antena número 3 de la **Fig. 5.4.** no se ha tenido en cuenta ya que ésta es una antena muy directiva y en ningún momento se ha estado a menos de 40° con su haz principal.

Tabla 5.4. Resumen de las características de las antenas del Cap Salou.

Núm.	Tipo	Frecuencia	Rango potencias	Diagrama de radiación
1	Array de dipolos	300 MHz -3 GHz	5 kW	omnidireccional
2	Colineal	471,25 MHz -860,75 MHz	250 W	omnidireccional
4	Radar	1 GHz – 3GHz	4 kW	Depende de la configuración

5.2.2.1 Puntos de referencia.

Con este estudio hemos obtenido ciertas incoherencias, por ejemplo: en la segunda medida a modo GPS se encuentra el primer fallo de forma visual a una densidad de potencia de $6.27 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, en cambio, en todas las otras medidas siempre que se sobrepasa el valor de $6,0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ se detecta un error. Todos ellos están realizados con el mismo protocolo. Esto puede deberse a varios factores tales como picos de potencia no detectados, variaciones en el medio de transmisión, flujo del tráfico de comunicación, etc. Como primera suposición es probable que obtengamos ciertas incoherencias debido a que la conductividad del medio de transmisión en ciertos momentos haya cambiado. Por ejemplo, en las medidas en las que se obtiene un mínimo de densidad de potencia que afecte negativamente al sistema mayor que el

encontrado en ensayo con la misma antena, mismas frecuencias, la conductividad del medio de transmisión era menor que en los otros ensayos.

La medida más lejana (Medida 1) se ha realizado a una distancia de 71,5 metros de la antena. Progresivamente, se fueron realizando diferentes medidas a medida que se acerca a la antena. Los puntos medidos han sido marcados y numerados en la siguiente figura (**Fig 18**).

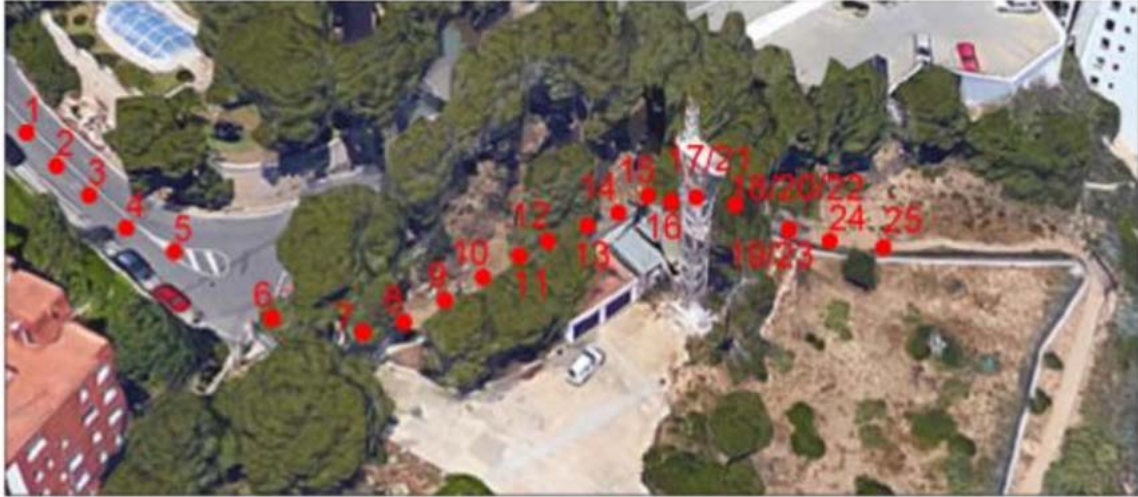


Fig. 5.5. Mapa marcado con los puntos de los ensayos

Con estos puntos de referencia se tomaron varias medias. Se ha realizado el recorrido marcado un total de cinco veces: la primera para ver si realmente las ondas que se emitían desde esta torre provocaban fallos en el sistema, dos recorridos con el modo ATT y los últimos dos con el modo GPS.

5.2.2.2 *Medición de tanteo del entorno*

En esta primera medición se ha observado que falla la estabilidad automática y la comunicación piloto-controladora. Al ser una toma muy larga surgen problemas para realizar el trazado en el mapa de Google Maps, como se ha hecho con las medidas posteriores. Por ello, únicamente se exponen los datos tomados a mano, a través de los cuales se extraen las conclusiones.

Tabla 5.5. Primeras medidas

Posición	Valores de densidad de Potencia ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Observaciones
1	0,5	Perfecto funcionamiento
2	0,7	Perfecto funcionamiento
3	0,8	Perfecto funcionamiento
4	0,7	Perfecto funcionamiento
5	0,6 - 1,7	Perfecto funcionamiento

6	0,4 - 0,7	Perfecto funcionamiento
7	0,8 - 0,9	Perfecto funcionamiento
8	0,8 - 1,0	Perfecto funcionamiento
9	0,4 - 0,9	Perfecto funcionamiento
10	0,3 - 1,5	Perfecto funcionamiento
11	0,5 - 1,1	Perfecto funcionamiento
12	0,3 - 1,4	Perfecto funcionamiento
13	0,5 - 1,2	Perfecto funcionamiento
14	1,7 - 2,4	Se ha medido un valor instantáneo de 10,3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.
15	-	-
16	0,2 – 11,2	Se registran primeros fallos de estabilización automática.
17	3,0 - 7,1	Se registran primeros fallos de estabilización automática para valores un poco superiores a 4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. La comunicación piloto-controladora funciona correctamente.
17 Bis	3,6 - 12,3	A partir de 4,5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ el modo GPS falla. Para valor de 6 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ perfecto funcionamiento. Falla ATT para valores de 5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. ATT funciona para valores de 3,5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.
18	7,5 – 28,7 – 31,2	Para valores de 10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ATT funciona. Para GPS, fallo a valor de 28 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ posteriormente se reduce la potencia de campo a 13 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ y se observa un perfecto funcionamiento.
19	20,8 - 200,2	Con el modo ATT se observa un comportamiento anómalo a valores de 20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Con el modo GPS el dron responde perfectamente a valores de 190 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.
20	14,5 - 50,1	Con el modo GPS falla con valores de 16 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Se reduce la densidad de potencia a 14 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ y 15 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ y se observa un perfecto funcionamiento. Se detecta un aumento a 50 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ y se observa un perfecto funcionamiento.
21	2,5 - 6,6	Perfecto funcionamiento
22	10,2 - 30,4	Con el modo GPS se ven fallos de control para valores de 17 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ y 16 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Perfecto funcionamiento con una densidad de potencia de 14 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Se reduce a 10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ y se ve un fallo continuado. Aumento a 25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ y se observa un fallo estabilización automática, el dron responde frente movimientos de mando. Mismo resultado con valores e 29 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.
23	35,7 - 420,8	Pasa de valores de 35 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ a 450 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ y con el modo GPS responde correctamente, lo mismo que con el modo ATT.
24	220,9 – 350,3	Para valores de 315 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ funciona

		correctamente en el modo GPS. Se reduce posteriormente a $250 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ y deja de funcionar.
25	250,2 -400,8	Falla GPS y ATT.

5.2.2.3 Resultado de las medidas tomadas siguiendo el protocolo

Teniendo en cuenta que se han realizado tres ensayos en cada modo de vuelo, tenemos un total de seis grupos de medidas en momentos diferentes. A continuación, se explicará lo ocurrido en cada ensayo. Las medidas se han ordenado por modo de vuelo y orden de toma. Todos los ensayos fueron realizados en los alrededores de la torre de Cap Salou. Empezaremos con el modo ATT posteriormente se pasará al estudio de las medidas tomadas en modo automático (GPS).

Modo ATT

En la primera de las mediciones detectamos dos tipos de fallos. El primero se puede detectar cuando se está rotando el dron manualmente en cualquiera de sus tres ejes: se observa mediante los servos que el sistema de estabilización no genera ningún movimiento extra con tal de contrarrestar los movimientos que le generan una posición de inequilibrio. Se empieza a detectar este error cuando la densidad de potencia es igual o superior a $8,9 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ y se prolonga durante dos segundos aproximadamente. El segundo fallo se produce al emitir órdenes desde el mando. Se observa que los servos del UAV reaccionan a la perturbación de equilibrio con un delay de un segundo. En los ensayos nos hemos encontrado con ambos errores simultáneamente, lo que provoca un estado de descontrol muy peligroso que podría deberse a que la controladora no es capaz de recibir y/o procesar y/o que las indicaciones, que emite la controladora, no lleguen a nuestros indicadores visuales, los servos.

Después del estudio de campo se realizó un estudio de los LOGs del que se extraen varias gráficas: de altitud (metros) vs tiempo (segundos), el campo magnético recibido en los ejes x e y vs. el tiempo (segundos) y las coordenadas geográficas por las que ha pasado el dron durante el ensayo que hemos transformado en una línea que marca el recorrido sobre un mapa de Google Maps (ver anexo A apartado 2 para ver el output de esta medida). En el mapa de esta medida se ve un error en el punto 12, que se caracteriza porque en el mapa se ven movimientos longitudinales que no concuerdan con la realidad. Estos fallos al inicio de las medidas son habituales, por lo tanto, no son indicadores de fallos debidos a EMI, sino que son simplemente errores de puesta a punto.

En las tablas que van desde la 7 hasta la 12 se muestran los resultados de los ensayos y se ha marcado con una "x" los puntos en los que el UAV muestra fallos en el sistema de control. En esta primera medida se pueden apreciar varios errores a partir del punto 15, ya que se ve una desviación del camino. Los errores del mapa no indican un fallo seguro del sistema de control pero son

un indicador, por eso asumimos la posibilidad de que el sistema empiece a fallar a una densidad de potencia de $3,6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Puede ser que en este punto no hayamos sido capaces de detectarlo de forma visual. Esta medida es una de las más interesantes puesto que vemos la densidad de potencia mínima que provoca fallos en nuestro UAV. Los datos de esta medida están indicados en la **tabla 5.6** situada a continuación.

Tabla 5.6. Datos de la medida uno en la torre de Cap Salou en modo ATT.

Puntos	Densidad de potencia ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Campo eléctrico (V/m)	Estabilización automática	Recepción y procesado de órdenes del mando
12	1,5	2		
13	1,4	2		
14	1,1	2		
15	3,6	4		
16	5,5	5		
17	8,9	6	X	
18	55,3	14	X	x
19	129,3	22	X	x
24	59,6	15	X	x
25	179,4	26	X	x

En la segunda medida de esta torre observamos que los problemas empiezan a aparecer a una densidad de potencia menor a las medidas anteriores teniendo en cuenta únicamente el estudio in situ, no las deducciones posteriores. Concretamente detectamos el primer fallo manifestado en la segunda prueba en los alrededores de esta torre con el modo ATT a una densidad de potencia de $3,5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$; este error dura menos de un segundo. A potencias superiores vemos fallos en la recepción y procesado de órdenes del mando que duran algo más que un segundo. Con el estudio posterior se han podido observar unos fallos de posición en el mapa: el fallo típico inicial y posteriormente fallos de desviación a partir del punto 18. Eso indica que el fallo visto anteriormente se ve reflejado en el funcionamiento del sistema de localización. Estos datos están recogidos en la **Tabla 5.7**.

Tabla 5.7. Datos de la medida dos en la torre de Cap Salou en modo ATT.

Puntos	Densidad de potencia ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Campo eléctrico (V/m)	Estabilización automática	Recepción y procesado de órdenes del mando
12	0,4	1		
13	0,5	1		
14	1,4	2		
15	1,7	3		
16	0,9	2		
17	0,9	2		
18	6,0	5	x	

19	120,6	21	x	x
24	3,5	4	x	
25	120,2	21	x	x

En esta última medida recogida en la **Tabla 5.8** en modo ATT podemos ver que falla de nuevo la estabilización automática, esta vez a una densidad de potencia de $14,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Asimismo, a un valor parecido falla también la reacción o procesado ante las señales emitidas por el mando. Ambos fallos duran más que las medidas anteriores superando los dos segundos. En este punto vemos que al realizar un giro en yaw (de derecha a izquierda) la controladora sobreactúa generando movimientos puntuales y rápidos. Dichos movimientos son demasiado agresivos, el sistema está sobreactuando. Este comportamiento no se había visto en los ensayos anteriores. En el mapa de la medida podemos ver un fallo puntual en el punto 16 del mapa, puede ser debido a algún momento en el que la potencia aumentara considerablemente y no fuéramos capaces de notarlo. Por otro lado, en el mapa, también vemos como se desvía de los puntos reales a partir del 18.

Tabla 5.8. Datos de la medida tres en la torre de Cap Salou en modo ATT.

Puntos	Densidad de potencia ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Campo eléctrico (V/m)	Estabilización automática	Recepción y procesado de órdenes del mando
12	0,6	2		
13	1,1	2		
14	1,8	3		
15	2,8	3		
16	3,2	4		
17	0,5	1		
18	14,1	7	x	
19	151,1	24	x	x
24	54,5	14	x	x
25	114,2	21	x	x

Modo GPS

En la primera medida en modo GPS se observa un fallo con el mismo carácter que el primero, explicado en la primera medida en el modo ATT; esta vez el error dura medio segundo aproximadamente. Cuando enviamos señales desde el mando a nuestro UAV la respuesta es diferente a la esperada dado que realiza movimientos a una velocidad extremadamente lenta. El salto de potencia, como se muestra en la **Tabla 5.9**, entre la medida 17 y 18 es bastante grande por lo que esta medida no va a ser muy representativa. Podemos ver, en el mapa de esta medida, el fallo típico principal y posteriormente la desviación de la trayectoria real a partir del punto 18 en el que se detectó una densidad de potencia de $14,0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Tabla 5.9. Datos de la medida uno en la torre de Cap Salou en modo GPS

Puntos	Densidad de potencia ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Campo eléctrico (V/m)	Estabilización automática	Recepción y procesado de órdenes del mando
12	0,4	1		
13	0,6	1		
14	0,9	2		
15	1,7	3		
16	0,8	2		
17	1,7	3		
18	14,0	7	x	
19	60,1	15	x	x
24	37,4	12	x	x
25	220,2	29	x	x

Esta segunda medida en modo automático es la más útil de las tomadas en este modo ya que se complementa con el resto a una densidad de potencia de $6,27 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Estos errores se manifiestan como movimientos bruscos de los servos en respuesta a un movimiento concreto en yaw, encontramos una repetición de esta respuesta. En cuanto a la comunicación entre el multirrotor el mando parece que recibe y/o procesa la señal de forma errónea ya que son movimientos muy atenuados. En el mapa de esta medida se ve un error de desviación a partir del punto 24.

Tabla 5.10. Datos de la medida dos en la torre de Cap Salou en modo GPS.

Puntos	Densidad de potencia ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Campo eléctrico (V/m)	Estabilización automática	Recepción y procesado de órdenes del mando
12	1,0	2		
13	0,5	1		
14	0,7	2		
15	0,9	2		
16	0,8	2		
17	0,9	2		
18	6,2	5		
19	3,8	4		
24	6,27	5	x	x
25	77,0	17	x	x

En esta última medida se encontró un salto relevante en la densidad de potencia pasando de valores de $0,5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ a $14 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. En el estudio posterior, con el recorrido extraído del LOG, se ha encontrado una incoherencia en el punto 16, lo que nos indica que es posible que el sistema de control del dron no soporte densidades de potencia iguales o superiores a $3,3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Tabla 5.11. Datos medida tres en la torre de Cap Salou en modo GPS.

Puntos	Densidad de potencia ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Campo eléctrico (V/m)	Estabilización automática	Recepción y procesado de órdenes del mando
12	0,6	2		
13	1,0	2		
14	1,8	3		
15	2,8	3		
16	3,3	4		
17	0,5	1		
18	14,1	7	x	x
19	151,2	24	x	x
24	54,3	14	x	x
25	114,1	21	x	x

5.2.3 Ensayo en los alrededores de la torre de Collserola.

El segundo conjunto de antenas está situado en Ctra. de Vallvidrera al Tibidabo, S/N, 08017 Barcelona. Se puede observar en la **Figura 5.6** que esta torre de comunicación consta de un gran número de antenas de diversos tipos. La torre mide 266 metros de altura y dispone de 13 plataformas con una superficie de 429 m² por planta (ver [6]).

**Fig. 5.6.** Foto torre de Collserola (ver [6]).

Al realizar las medidas de estas antenas disponíamos de un analizador de espectros con el que poder hacer un barrido de frecuencias. En este caso no es necesario el estudio teórico de las antenas ya que podemos detectar las frecuencias en las que se está emitiendo y de aquí deducir de qué tipo de comunicación se trata.

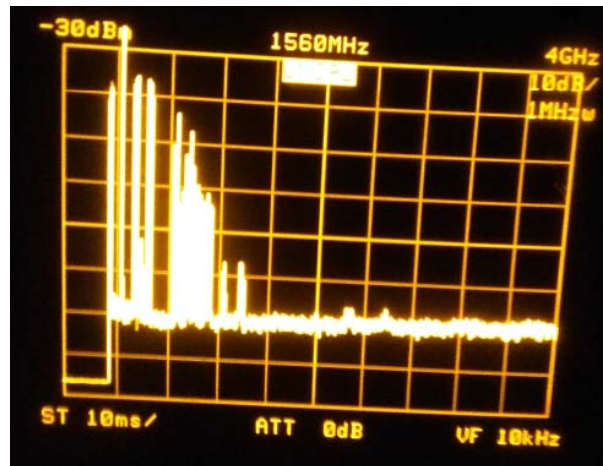


Fig. 5.7. Display del analizador de espectros en la torre de Collserola primer punto.

Para el estudio de esta torre utilizamos tres puntos de medida dada la dificultad de encontrar una zona con visibilidad directa. Hemos extraído un mapa de la zona de Google Maps y hemos marcado los puntos en los que se han realizado ensayos.

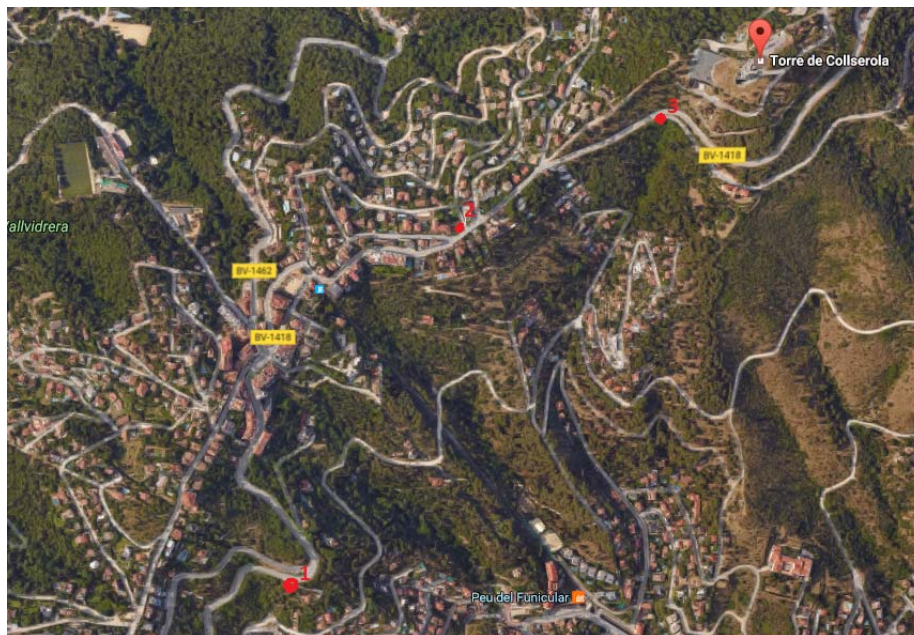


Fig. 5.8. Puntos de ensayo de la torre Collserola.

Los valores tomados de estas antenas se van a representar en forma de tabla, esta es diferente de las vistas hasta ahora ya que hemos podido realizar un barrido de frecuencias en cada punto a parte de lo que ya podíamos medir en las antenas anteriores.

Tabla 5.12.Tabla de medidas de la Torre de Collserola.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Frecuencias:			
87 MHz-103 MHz	-20 dBm	-8 dBm	-7,4 dBm
195 MHz	-25 dBm	-30 dBm	-35 dBm
209MHz	-30 dBm	-40 dBm	-35 dBm
400 MHz-700 MHz	-37 dBm	-35 dBm	-30 dBm
Densidad de potencia pico	1,4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ / 2 V/m	14,6 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ / 7 V/m	11,1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ / 6 V/m
Funcionamiento	Funciona correctamente	Falla en los dos modos, tanto la estabilización automática como la comunicación mando-dron.	Falla en ambos modos y de igual forma que en el punto 2.

En las medidas del punto dos y del punto tres encontramos errores de trayectoria en los mapas sacados con los LOGs. El error más obvio es el de la medida del punto tres. Con esto podemos confirmar que el GPS no funciona correctamente cuando está en un entorno con esas densidades de potencia.

5.3 Cámara anecoica

El objetivo de los ensayos realizados en la cámara es detectar de una forma más precisa el límite de densidad de potencia y sus respectivas frecuencias aceptadas por el sistema. Los ensayos en la cámara anecoica se realizaron en la empresa IDNEOV Technologies, S.L. Este tipo de cámaras son habitaciones diseñadas para absorber por completo las ondas electromagnéticas o sonoras equipadas con antenas que emitirán ondas a la frecuencia, potencia y polarización deseadas. Concretamente la cámara anecoica de esta empresa está equipada con dos antenas(**fig. 5.9 y fig. 5.10**). La antena de la **figura 5.9** es capaz de emitir a frecuencias superiores a 1 GHz. y la antena de la **figura 5.10**, que está en configuración vertical, es capaz de emitir frecuencias de hasta 1 GHz.



Fig. 5.9. Antena 1 de la cámara anecoica.



Fig. 5.10. Antena 2 de la cámara anecoica.

5.3.1 Protocolo de medidas para la cámara anecoica

En este apartado se pretenden explicar con exactitud los pasos que se van a realizar en los ensayos que se van a hacer en la cámara anecoica. Utilizaremos la cámara para realizar ensayos de inmunidad radiada haciendo barridos de frecuencia a potencias fijas. Se pretende idear una forma de utilizar la cámara anecoica del modo más óptimo. Se utilizó la misma metodología para todos los ensayos para el Dron 2 y una vez acabado se repitió para el Dron 3.

Pruebas con el UAV:

1. Ponemos el dron en la plataforma que hemos preparado y todo el conjunto en la cámara (**Fig. 5.11**) y tomamos las medidas de seguridad respectivas explicadas a continuación.



Fig. 5.11. Dron 2 preparado para prueba.

En la figura 24 se pueden ver las medidas de seguridad tomadas para evitar dañar la cámara y el multirrotor. Se atan las patas del dron con cuerdas a una tabla muy gruesa y esta se coje con dos sargentos a una mesa. De esta forma cuando el dron intente subir le será imposible, puesto que no podrá subir más de lo que le permitan las cuerdas y estas dan un juego de 10 centímetros. A parte de la tabla se han atado las patas del dron a una estructura formada por cuatro barras que aumentan su superficie de apoyo para que cuando sufra fallos no se golpee contra la mesa.

2. Ponemos la antena de la cámara con la configuración que nos interese estudiar. En la **figura 5.12** se pueden ver las dos antenas que se van a utilizar, explicadas anteriormente. Se utilizarán ambas antenas en varias ocasiones para cada dron.



Fig. 5.12. Dron 3 colocado en la cámara con la antena más directiva y que emite a frecuencias más elevadas colocada para empezar la prueba.

3. Se conecta el mando con el dron y empieza el vuelo. Cerramos la puerta de la cámara y salimos para ver qué pasa mediante la cámara de vídeo que se ve a la derecha de la **figura 5.13**.



Figura 5.13. Dron 2 en vuelo en la cámara anecoica.

En este punto han surgido problemas con el Dron 2 porque el GPS no era capaz de detectar dónde estaba, por lo que se ha tenido que calibrar en la misma cámara.

4. Empezaremos utilizando un campo eléctrico constante y se realizará un barrido de frecuencias. Los barridos de frecuencia serán de los rangos de frecuencia más utilizados en las telecomunicaciones.
5. Observar fallos y cuando se produzcan realizar de nuevo las pruebas como mínimo tres veces para obtener repetitividad.

El objetivo es encontrar la potencia mínima y la frecuencia a la que falla, por lo que si no falla con el campo eléctrico que le ponemos lo iremos aumentando gradualmente. El proceso realizado se puede ver de forma práctica en el **vídeo 1** (https://youtu.be/W_YEsa2AKM4).

La idea principal era realizar un protocolo de medidas sabiendo el modo de trabajo de la cámara. No obstante, una vez allí la empresa nos explicó que aparte de lo que sabíamos que era capaz de hacer había más posibilidades. Una vez empezadas las pruebas nos adaptamos a la situación, aunque cambiando un poco el método de trabajo. Las medidas con un campo eléctrico de valor fijo y barrido de frecuencias serán las pruebas de tanteo para encontrar las frecuencias a las que tenemos problemas. Posteriormente, una vez identificadas estas frecuencias vamos a poner la frecuencia fija y variaremos el campo eléctrico para encontrar el límite. Como los aparatos de medida que utilizaremos en un futuro no serán muy precisos, los pequeños errores de frecuencia y potencia de la cámara no serán relevantes.

5.3.2 Resultados de los ensayos realizados en la cámara anecoica

En este apartado se describe cómo se han realizado las pruebas, con qué parámetros y los resultados obtenidos.

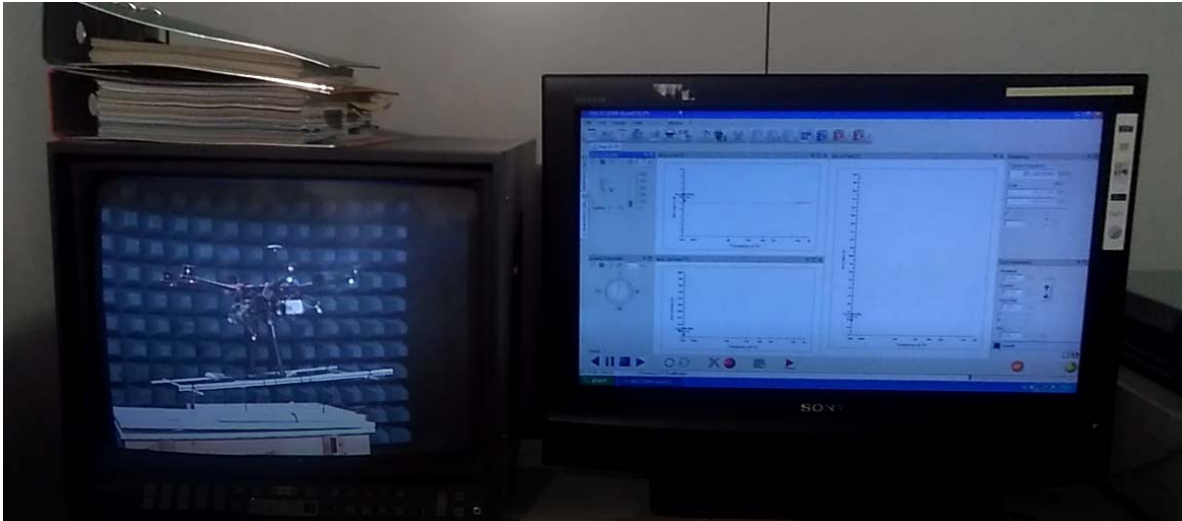


Fig. 5.14. Pantallas de control de la cámara anecoica.

Pruebas con el Dron 2:

Empezamos midiendo en el rango de broadcast de radio de 80 MHz a 120 MHz. Al empezar ponemos un campo eléctrico de 5 V/m con polarización horizontal de la antena 2. En estas condiciones realizamos la prueba tres veces y vemos que a una frecuencia de 107 MHz está al límite de perder el control, aunque no lo hace por completo. La siguiente medida es el rango de frecuencias que utiliza la TDT que van desde 300 MHz a 900 MHz con la misma antena. Radiamos un campo eléctrico de 5 V/m. A medida que se va realizando el barrido de frecuencias vemos que en el rango de frecuencias entre 410 MHz a 900 MHz se mueve de forma extraña, pero es un error no crítico. En las frecuencias más elevadas es donde se ve más error y repetimos las pruebas para obtener repetitividad: vemos que para 5 V/m en 740 MHz empieza a fallar de forma muy grave. Resulta interesante ver el **vídeo 2** (<https://youtu.be/WaA0e-TMn6w>) para poder entender qué tipo de fallos se observan y comportamiento del UAV que llamamos fallar. Después de ver el fallo paramos de radiar y al minuto el Dron 1 se recupera. Repetimos la prueba en las mismas condiciones y vemos que hace movimientos extraños pero no vuelve a fallar de ese modo. Damos por terminadas las pruebas con polarización horizontal y cambiamos la antena a configuración vertical; ahora el objetivo es detectar qué polarización nos afecta de forma más crítica.

Las condiciones que se ponen en este punto son un rango de frecuencias de 80 MHz a 120 MHz con un campo eléctrico constante de 1 V/m. El comportamiento del dron está dentro de lo normal. Repetimos la prueba para este rango de frecuencias pero con un campo eléctrico de 2 V/m y se detectan errores graves, concretamente en una frecuencia de 107 MHz. Repetimos tres veces y el comportamiento es el mismo y obtenemos repetitividad. Llegados a

este punto se puede afirmar que la polarización vertical afecta más que la horizontal.

Vamos a realizar la prueba en el rango de frecuencias de TDT, que va de 300 MHz a 900 MHz; hay que recordar que ahora tenemos una polarización vertical y a un campo constante de 5 V/m. Lo que observamos en esta prueba en 320 MHz es que se produce un fallo muy grave y posteriormente se recupera. Hasta el final del rango se producen unos fallos graves en la frecuencia de 740 MHz. El fallo se observa de forma clara debido a la agresividad de los movimientos (ver **vídeo 3** <https://youtu.be/kp7QM-xAiMw> se explican los fallos detectados en el apartado 5.3.3.). Viendo estos resultados repetimos la prueba pero con un campo eléctrico de 3 V/m y volvemos a ver fallos a partir de 400 MHz. Para encontrar el límite volvemos a modificar el campo eléctrico y lo ponemos a 1 V/m. En estas condiciones al recorrer el rango de frecuencias entre 300 MHz y 900 MHz vemos que no falla. Repetimos la prueba con un campo eléctrico constante de 1 V/m dos veces y recibimos la misma respuesta, no falla.

Entre los rangos de frecuencia de 300 MHz a 600 MHz ponemos un campo eléctrico de 2 V/m y vemos que se comporta de una forma extraña, aunque no muy grave. Repitiendo el ensayo dos veces más se observa que sí se producen errores graves. Al obtener estos resultados ponemos una frecuencia fija de 740 MHz y empezamos a radiar un campo eléctrico de 2 V/m y el dron muestra un comportamiento muy extraño que equivale a un error grave. Repetimos el ensayo en las mismas condiciones después de la recuperación del multirrotor. Esta vez tarda 15 segundos hasta la recuperación completa. Repetimos con el mismo campo eléctrico, pero a una frecuencia de 420 MHz y vemos que también falla. No obstante, repitiendo las pruebas no vuelve a verse ese comportamiento extraño. En la misma frecuencia se ve un error de estabilización cuando se cambia de 2 V/m a 3 V/m, con lo que deducimos que falla a un valor entre 2 V/m y 3 V/m.

Viendo que la polarización a la que es más sensible el Dron 2 es en vertical, vamos a realizar la prueba en un rango de frecuencias alto: de 1 GHz a 3 GHz con un campo eléctrico de 2 V/m. Los resultados de este ensayo es que no se observa ningún comportamiento anómalo. Se repiten los ensayos subiendo de uno en uno los valores del campo eléctrico llegando hasta 6 V/m. Se realiza un barrido de frecuencias desde 1 GHz hasta 3 GHz para cada valor de campo eléctrico. El multirrotor se comporta de una forma adecuada en todo momento.

Pruebas con el Dron 3:

Este dron vuela con el autopiloto Pixhawk. Es mucho más ligero y tiene más potencia por lo que vibra más de por sí que el Dron 2. Las condiciones de las primeras pruebas son a las bandas de frecuencia de radio y ponemos campos eléctricos desde 6 V/m a 10 V/m. Después de realizar tres pruebas a cada valor de campo eléctrico vemos que el dron se no se ve afectado por las ondas. Pasamos a las frecuencias utilizadas por TDT y hacemos un barrido de estas a un campo constante de 10 V/m. Este valor de campo es muy elevado y

difícil de encontrar en comunicaciones comunes. Obtenemos el mismo resultado que en el ensayo anterior, un comportamiento normal del Dron. Al realizar las pruebas en el rango de frecuencias entre 1 GHz y 3 GHz a 6 V/m vemos que todo funciona correctamente. Las repetimos a 10 V/m y obtenemos los mismos resultados.

5.4 Conclusiones generales de los ensayos

En los ensayos realizados en un entorno no controlado, en los alrededores de las antenas elegidas para el estudio, se ha logrado encontrar unas condiciones de contaminación electromagnética tales que provocan fallos en el sistema de control del Multirroto 1.

Dichos fallos se pueden detectar utilizando estos indicadores de pérdida de control (Para el Multirroto 1):

- Paradas intermitentes de los tres servos simultáneamente.
- Movimiento brusco de la pala del servo hacia un lado hasta el máximo de su rotación y parada en esta posición.

Del estudio teórico la primera torre, la del Cap Salou, se han extraído las bandas de frecuencia las que emiten las antenas situadas en la torre. Gracias a este estudio tenemos una primera aproximación de los márgenes de frecuencia y potencia lindantes de nuestro UAV. No se han podido detectar las polaridades de dichas antenas.

En los ensayos en modo ATT, que es el más manual y el más agresivo en cuanto movimientos, se han encontrado fallos con repetitividad a partir de una densidad de potencia de $6,0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ en estudio de campo. En el estudio posterior, el estudio del LOG, se deduce que empieza a manifestar errores a partir de $3,2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ de densidad de potencia. Los puntos detectados con un fallo en el sistema mediante el estudio de los LOGs se detectan como errores de recorrido en el mapa. Dicho recorrido se ha generado usando las coordenadas GPS grabadas en los LOGs. Para el modo GPS vemos que el punto con una densidad de potencia mínima en el que se detectan fallos de control es a partir de $6,2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ para las mediciones in situ. En el estudio a posteriori se ha detectado, de la misma forma que para el modo ATT, un fallo en el sistema de estabilización en un punto del mapa cuya densidad de potencia era de $3,3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Las ondas cuyas densidades de potencia de acoplamiento de la interferencia provocan fallos en nuestro sistema de estabilidad son ondas cuyas posibles frecuencias van entre los rangos de frecuencia de 300 MHz a 3 GHz, de 471,25 MHz a 860,75 MHz y de 1 GHz a 3 GHz.

Con los ensayos realizados en este entorno no controlado se han obtenido ciertas incoherencias, por ejemplo: en la segunda medida a modo GPS se encuentra el primer fallo de forma visual a una densidad de potencia de $6,27 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, en cambio, en todas las otras medidas siempre que se sobrepasa el valor de $6,0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ se detecta un error. Para recopilar todas las medidas siempre se ha seguido el mismo protocolo. Por lo que deducimos que estas

incoherencias pueden deberse a varios factores tales como picos de potencia no detectados, variaciones en el medio de transmisión, flujo del tráfico de comunicación, etc.

En los alrededores de la torre de Collserola, al igual que la anterior, no somos capaces de distinguir la polarización de las antenas. En la actual torre de estudio observamos que la densidad de potencia mínima a la que el dron empieza a manifestar problemas de estabilidad es de $11,0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, en un entorno en el que se han encontrado picos de potencia entre las bandas de frecuencias de 87 MHz – 103 MHz, 195 MHz, 209 MHz y 400 MHz - 700 MHz. Estos problemas empiezan manifestándose como la incapacidad del sistema para estabilizarse automáticamente en estas condiciones y simultáneamente no reacciona correctamente a las indicaciones del transmisor. El 70% del tiempo el dron no actúa de la forma adecuada; no obstante, de vez en cuando se recupera y actúa de una forma correcta.

Llegados a este punto ya podemos dar por realizada la cuestión del objetivo cuyo propósito era identificar la densidad de potencia mínima y sus respectivas frecuencias que provocan dicha pérdida de control en un entorno no controlado a podemos afirmar que tenemos estos datos. Dicho valor de densidad de potencia límite que soporta nuestro multirrotores es de $3,2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ siempre y cuando su frecuencia se encuentre entre los rangos de las bandas de radio (87 MHz- 103MHz), la frecuencia 195 MHz, la frecuencia 209 MHz y la televisión que va de 400 MHz a 700 MHz.

Durante los ensayos hemos visto que el error no era de GPS, sino de la Controladora que es la parte que procesa todos los inputs de los sensores y decide las futuras acciones. Se puede afirmar que el error se da por las interferencias electromagnéticas de la controladora con el medio. Esta tiene muchas partes abiertas de plástico hacia dentro del circuito y los otros elementos que están conectados a esta son metálicos, por lo que es muy susceptible a EMIs.

Después de los ensayos en el entorno controlado, la cámara anecoica de la empresa IDNEOV Technologies.SL., logrado replicar fallos de control para uno de los dos multirrotores utilizados. Para poder detectar dichos fallos de control se listan a continuación los movimientos que se han considerado indicadores de pérdida de control. Se considera que si uno de los indicadores se manifiesta el sistema ya está actuando de forma errónea.

Indicadores de pérdida de control en el Multirrotores 2:

- Pérdida de altitud agresiva sin recuperación inmediata.
- Pérdida de altitud durante más de medio segundo.
- Movimientos ondulatorios durante más de medio segundo.

Indicadores de pérdida de control en el Multirrotores 3:

- No se han encontrado.

Utilizando los rangos de campo eléctrico y sus posibles frecuencias de posibles interferencias extraídos de los ensayos en el entorno no controlado se han

podido realizar unos ensayos mucho más concretos con tal de ser más productivos.

En relación con el autopiloto Pixhawk, con el cual está equipado el Multirroto 3, hemos visto que no se ve alterado a ninguna frecuencia de onda para campos eléctricos de igual valor o inferiores a 10 V/m. Este valor es muy elevado y es difícil de encontrar en las telecomunicaciones actuales.

Resumiendo, los resultados se ha visto que la antena configurada con la polarización vertical es la que más afecta al multirroto 2.

En la **Tabla 5.13** se resumen los resultados de los ensayos en la cámara anecoica y se muestran marcadas con “/” aquellas frecuencias en las que no se han encontrado fallos, en estos casos, se han realizado barridos de campo eléctricos hasta un valor máximo de 10 V/m.

Tabla 5.13. Resultados de los ensayos.

Rango de frecuencias	Valores de campo eléctrico al que falla el Multirroto 2	Valores de campo eléctrico al que falla el Multirroto 3
Radio: 80 MHz-120MHz	2 V/m	/
TDT: 300MHz-900MHz	2 V/m - 3 V/m	/
GPS/ Wi-Fi: 1GHz-3GHz	/	/

Cuando se va a diseñar un sistema es muy importante tener en cuenta la contaminación electromagnética del medio, por lo que hay que preparar los sistemas para posibles ataques de EMIs. En el apartado *6.1 Protocolo de trabajo y utilización de la herramienta para evitar fallos por EMI* se explica cómo utilizar la herramienta generada para evitar situaciones de posibles problemas con EMIs. En el apartado *6.2 Propuestas para mitigar los efectos de las EMI* se muestran formas de solucionar este problema.

CAPÍTULO 6. PROTOCOLO, HERRAMIENTA Y PROPUESTAS

6.1 Protocolo de trabajo y utilización de la herramienta para evitar fallos por EMI

Se ha realizado una herramienta con la que detectar si el espacio en el que se quiere realizar una operación de vuelo existe algún tipo de radiación que pudiera llegar a ser dañina para nuestros sistemas. Lo óptimo sería tener esta herramienta disponible para todos los modelos de antena más comunes. En este trabajo se establece la forma de calcular esta distancia para un tipo de antena concreto: las antenas Yagi-uda (ver [7]). Para ver cómo se debe adaptar la herramienta a otros tipos de multirrotadores, antenas o sondas de campos electromagnéticos e incluso para poder entender los cálculos ir al anexo C.

El protocolo para utilizar la herramienta es muy simple: hay que ponerse en el haz principal de la antena y medir la densidad de potencia, la distancia horizontal y la distancia vertical. Estos valores se deben introducir como inputs y entonces esta herramienta dará al usuario una estimación de la distancia horizontal máxima a la que puede acercar nuestro UAV a la antena (**Fig. 6.1**).

Yagi-Uda	
Inputs:	
Dhorizontal(m)=	5
Altura antena (m)=	8
número de elementos=	5
PR(W/m ²)=	0,14
Características instrumento medida:	
G _R =	4

Se puede operar de forma segura siempre que estemos a una distancia horizontal superior a: 30 m

Fig. 6.1. Tabla de inputs y output de la herramienta.

Con datos de vuelos en los que la empresa ha tenido problemas hemos podido contrastar la fiabilidad de la herramienta. Esta tiene un error máximo de ±2 m.

6.2 Propuestas para mitigar los efectos de las EMI

En este apartado vamos a proponer tres métodos para intentar mitigar los efectos de las EMIs. Dichos métodos se propondrán de forma teórica, ya que no nos ha dado tiempo a implementar y testear para encontrar el nuevo límite de campo eléctrico con las respectivas frecuencias que admite el dron. Para resolver un problema de CEM tenemos varias formas de hacerlo, por ejemplo: conexionando las masas, apantallando, cambiando la localización de los componentes, filtrando, etc. No obstante, vamos a estudiar las tres propuestas que se ven más factibles para este caso.

El principal problema que queremos abordar son las EMI's que sufre la controladora, con lo que las primeras dos propuestas pretenden proteger la controladora y las conexiones entre la controladora y sus elementos. En el planteamiento del trabajo, donde se explica con detalle los componentes de nuestros UAVs, se ha comentado que lo más susceptible a EMI's era el GPS-COMPAS que va conectado a la IMU, no obstante, hemos visto de forma empírica que este no es el causante de los fallos. Debido a la limitación de material para la cámara anecoica no hemos podido realizar pruebas con los elementos por separado, así que vamos a intentar solucionar el problema de los elementos que sabemos que están implicados.

Para dar solución a un problema de EMI's hay que tener en cuenta que probablemente con la implementación de una medida no será suficiente. Por ello, se han de realizar pruebas añadiendo los elementos necesarios hasta que se consiga lo deseado.

6.2.1 Primera propuesta: filtrado

Este método elimina las EMI's de procedencia externa como interna. Se utilizan filtros a la entrada de los sistemas para eliminar las posibles interferencias. Este sistema es muy útil para interferencias causadas por radiotransmisores. Si queremos implementar esta propuesta será necesario buscar el filtro adecuado. Para ello tenemos que tener acotadas las frecuencias que interesa filtrar. Con la cámara anecoica fuimos capaces de acotar con precisión los rangos de frecuencia en los que tenemos problemas con los UAVs. Esta propuesta se basa en la protección de los cables de entrada a la controladora, ya que el problema podría darse en los cables que transportan la información.

6.2.2 Segunda propuesta: el apantallamiento y blindajes.

La segunda propuesta consiste en el apantallamiento de la controladora y sus cables de forma que no sea susceptible a las EMI's. Al introducir blindajes de cables y el apantallamiento de la A2 eliminaríamos las interferencias, aunque es importante que los blindajes y los apantallamientos estén conectados a tierra para que sean eficaces. Para encontrar una solución a problemas de compatibilidad electromagnética a veces se necesita más de una medida, por lo que mi propuesta es seguir un protocolo de prueba y error: empezar por blindar los cables, probar si con esto solucionamos el problema y si no es así blindar la controladora.

6.2.3 Tercera propuesta: sustitución de elementos

La tercera y última propuesta es la más sencilla de las tres, pero también la más segura y la que se puede implementar de forma más rápida. Hemos visto grandes diferencias entre el método de trabajo de la A2 y el Pixhawk frente a los mismos ataques de interferencias electromagnéticas. Después de las

pruebas realizadas en la cámara hemos visto que el sistema Pixhawk es mucho más robusto frente a EMI que la A2, por lo que una solución a nuestros problemas es la sustitución de las A2 con las que trabajan algunos de los multirrotores por el sistema de autopiloto Pixhawk.

Referencias

- [1] MORENO PIQUERO, E. *Concepto de compatibilidad electromagnética*, Santiago de Compostela, España pp. 1-14, (2007)
- [2] IEEE *Standard Definitions of terms for Antennas* (1983)
- [3] DJI, *Flight Control System User Manual v1.04* (2013)
- [4] Pixhawk *Characteristics of Advanced Autonomous Vehicle Control* (2017)
- [5] Pixhawk *Start guide for autopilot* (2017)
- [6] *Documento de información sobre las telecomunicaciones de la Torre de Collserola* en <http://www.torredecollserola.com/>
- [7] BERMUDEZ LUQUE, J.J. "Instalaciones de telefonía y redes locales" Cap. 3 en *Caracterización de los elementos y equipos básicos de instalaciones de telecomunicación* IC Editorial, Málaga, (2013)