



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Estudio de tecnologías de Energy Harvesting para
aplicaciones en el entorno aeroportuario.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Rojano Fernández, Evelyn Lisseth

Tutor/a: Cabedo Fabrés, Marta

Cotutor/a: Despujol Zabala, Ignacio

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



Resumen

El presente trabajo se centra en el estudio del *Energy Harvesting*, más concretamente en la obtención de energía a partir de las ondas de radiofrecuencia que se encuentran en el entorno (RF-WPH). El objetivo es poder usar este método para alimentar sensores y/o dispositivos en el entorno aeroportuario, tratando de conseguir una autonomía o incrementar la vida útil de la batería. Ejemplo de aplicación en este entorno sería el uso de drones para supervisar el aeródromo y ahuyentar las aves. Para ello, se realiza un análisis del espectro electromagnético presente en este entorno y se decide qué banda de frecuencia es la más conveniente para la rectena. Una vez establecida la frecuencia y los valores de potencia requeridos para la aplicación, se procede a hacer pruebas con distintas tipologías de antena, y a medir si se consiguen los valores requeridos y la eficiencia. Para tratar de garantizar el alcance de la potencia necesaria, se plantea la combinación del sistema RF-WPH con otros como el piezoeléctrico o el solar (SEH).

Palabras clave: *Energy Harvesting*, rectena, entorno aeroportuario, frecuencias aeronáuticas, WSN, sensores, drone, batería



Resum

El present treball es centra en l'estudi de l'*Energy Harvesting*, més concretament en l'obtenció d'energia a partir de les ones de radiofreqüència que es troben a l'aeroport (RF-WPH). L'objectiu es poder utilitzar aquest mètode per alimentar sensors i/o dispositius a l'entorn aeroportuari. Tractant d'aconseguir una autonomia o augmentar la vida útil de la bateria. Exemple d'aplicació seria l'ús de drons per supervisar l'aeròdrom i espantar les aus. Amb aquest fi, es realitza un anàlisi de l'espectre electromagnètic present en aquest entorn i es decideix quina es la banda de freqüència per convenient per a la rectena. Una vegada establerta la freqüència i els valor de potencia requerits per a l'aplicació, es precedeix a proves amb diverses tipologies d'antena, i a mesurar si s'aconsegueixen els valors requerits i l'eficiència. Per a garantir l'adquisició de la potencia necessària, es planteja la combinació del sistema RF-WPH amb altres com el piezoelèctric o el solar (SEH).

Paraules clau: *Energy Harvesting*, rectena, entorn aeroportuari, freqüències aeronàutiques, WSN, sensors, drone, bateria



Abstract

This Project is focused on the study of the Energy Harvesting, concretely on the energy obtention from radiofrequency waves that are in the surrounding (RF-WPH). The objective is being able to feed sensors and/or devices in the airport environment, trying to get autonomy or increase the mean life of the battery. An example of application in this environment would be the use of drones for supervising the aerodrome and chasing birds away. For this, the electromagnetic spectrum in the airport environment has been analysed to choose the frequency band that is more convenient for the rectenna. Once established the frequency, several antenna types have been simulated to obtain their characteristics and decide if they are proper for the application. To guarantee the obtention of the power required, the combination with other systems, such as piezoelectric or Solar Energy Harvesting, has been studied.

Key words: Energy Harvesting, rectenna, airport environment, aeronautical frequencies, WSN, sensors, drone, battery.



ÍNDICE

Resumen.....	1
Resum.....	2
Abstract	3
ÍNDICE	4
Lista de Figuras	5
Lista de Tablas	6
Lista de Gráficas	7
DOCUMENTO 1: MEMORIA.....	8
1. Introducción	9
2. Estado del arte	10
3. Espectro electromagnético en el entorno aeroportuario.....	22
4. Estudio de las características del dron.....	25
5. Diseño y simulación de la antena.....	30
6. Diseño óptimo según requerimientos.....	54
7. Dimensionamiento del diseño óptimo.....	55
8. Conclusiones	57
Referencias.....	58
DOCUMENTO 2: PLIEGO DE CONDICIONES	63
DOCUMENTO 3: PRESUPUESTO	68
DOCUMENTO 4: PLANOS.....	72
DOCUMENTO 5: ANEXOS.....	81

Lista de Figuras

Figura 1. Funcionamiento de una célula fotovoltaica	11
Figura 2. Escenarios de RF Energy Harvesting para la alimentación de sensor remoto. (a) Con fuente dedicada en campo lejano. (b) Fuente dedicada en campo cercano. (c) A partir de energía ambiente [16]	13
Figura 3. Diagrama de bloques de los elementos de un sistema RF-WPH [5]	14
Figura 4. Diagrama de radiación de una antena omnidireccional y de una antena con alta directividad [25].....	15
Figura 5. Relación entre impedancia, frecuencia de resonancia y ancho de banda de una antena tipo dipolo o monopolo [5].....	16
Figura 6. Configuraciones básicas en las redes de adaptación de impedancias....	17
Figura 7. Circuitos de adaptación de impedancias (izquierda) y su coeficiente de reflexión (derecha) para una frecuencia (a), dos frecuencias (b) y tres frecuencias (c) [29]	18
Figura 8. Técnicas de rectificación: (a) de media onda, (b) de onda completa, (c) puente de diodos	19
Figura 9. Tipologías de multiplicadores de potencia: (a) Cockroft-Walton, (b) Dickson y (c) diferencial.	20
Figura 10. Compensación del voltaje de umbral del transistor.....	20
Figura 11. Curva P-V y I-V y el punto de máxima potencia (MPP).....	21
Figura 12. Proceso de diseño de un sistema RF-WPH	21
Figura 13. Falcon flapping-wing drone de The Drone Bird Company [39]	25
Figura 14. Modelos de la serie AVES de The Drone Bird Company	25
Figura 15. Fuerzas intervinientes en la dinámica de vuelo del dron.....	26
Figura 16. Tipos de polarización lineal [46]	30
Figura 17. Vista de perfil de una antena IFA	31
Figura 18. Vistas de alzado y planta del monopolo vertical trapezoidal	34
Figura 19. Vistas de alzado y de planta de un monopolo plano con base semicircular	38
Figura 20. Ampliación de la vista de alzado del monopolo plano con base semicircular	39
Figura 21. Tipos de polarización circular [46].....	42
Figura 22. Big Wheel antena [53].....	43
Figura 23. Vista isométrica de la antena Skew Planar Wheel.....	44
Figura 24. Vista detallada de un elemento de la antena.....	44
Figura 25. Vistas de alzado y planta de la antena en hélice axial	48
Figura 26. Vista de planta de la antena Wire Curl y función de su radio	51
Figura 27. Vista de alzado de la antena Wire Curl	51

Lista de Tablas

Tabla 1. Comparativa entre sistemas de RF-WPH dedicados y ambientes.	14
Tabla 2. Bandas de frecuencia de radar y radiolocalización	23
Tabla 3. Bandas de frecuencia de la comunicación por satélite.....	24
Tabla 4. Valores de <i>CL</i> mínimos para los distintos modelos del dron.....	27
Tabla 5. Resistencia aerodinámica y empuje mínimo para los distintos modelos del dron.....	27
Tabla 6. Propiedades del motor MN3508 KV700 de la marca T-MOTOR.....	28
Tabla 7. Voltajes de las baterías Li-Po y Li-ion según el número de células	28
Tabla 8. Parámetros del primer diseño de la antena IFA	31
Tabla 9. Valores de simulación obtenidos para el diseño preliminar y optimizado de la antena IFA.....	32
Tabla 10. Valores de simulación obtenidos para los primeros diseños del monopolo vertical trapezoidal	35
Tabla 11. Modificación en las dimensiones del diseño preliminar y optimizado del monopolo vertical trapezoidal	36
Tabla 12. Parámetros del primer diseño del monopolo plano con base semicircular	39
Tabla 13. Variación de parámetros en los diseños del monopolo plano con base semicircular	39
Tabla 14. Parámetros de los últimos dos diseños del monopolo con base semicircular	40
Tabla 15. Dimensiones del diseño 1 de la antena Skew Planar Wheel.....	44
Tabla 16. Parámetros, relación axial y valor mínimo de <i>S</i> ₁₁ para los diseños 2 a 7 de la antena Skew Planar Wheel.....	46
Tabla 17. Dimensiones básicas del diseño final óptimo de la antena	55
Tabla 18. Dimensiones derivadas del diseño final óptimo de la antena	56
Tabla 19. Vista isométrica de la antena Skew Planar Wheel obtenida mediante modelado en AutoCAD	56
Tabla 20. Propiedades de aceros recubiertos de cobre.....	65
Tabla 21. Propiedades del aluminio recubierto de cobre	66
Tabla 22. Propiedades del cable coaxial RG316.....	67
Tabla 23. Códigos de las partidas del presupuesto	69
Tabla 24. Cuadro de precios de la mano de obra	70
Tabla 25. Cuadro de precios de los materiales.....	70
Tabla 26. Cuadro de precios de las licencias de software.....	71

Lista de Gráficas

Gráfica 1. Coeficiente de reflexión del primer diseño de la antena IFA.....	31
Gráfica 2. Coeficiente de reflexión para el diseño preliminar y el optimizado de la antena IFA	32
Gráfica 3. Impedancia del diseño optimizado de la antena IFA	33
Gráfica 4. Diagrama de radiación de la antena IFA con ganancia normalizada ...	33
Gráfica 5. Coeficiente de reflexión del monopolo vertical trapezoidal para distintas frecuencias mínimas	35
Gráfica 6. Coeficiente de reflexión del diseño preliminar y optimizado del monopolo vertical trapezoidal	36
Gráfica 7. Impedancia del diseño optimizado del monopolo vertical trapezoidal	37
Gráfica 8. Diagrama de radiación del monopolo vertical trapezoidal para $f_{min} = 1,2 GHz$ (izquierda) y para $f_0 = 2,4 GHz$ (derecha) con ganancia normalizada	37
Gráfica 9. Coeficiente de reflexión de los 3 primeros diseños del monopolo plano con base semicircular.....	40
Gráfica 10. Coeficiente de reflexión para los últimos 2 diseños del monopolo con base semicircular	41
Gráfica 11. Impedancia del diseño final del monopolo con base semicircular.....	41
Gráfica 12. Diagrama de radiación del monopolo de base elíptica para la $f_{min} = 900 MHz$ (izquierda) y para $f_0 = 2,4 GHz$ (derecha) con ganancia normalizada.....	42
Gráfica 13. Coeficiente de reflexión de los diseños 1 y 2 de la antena Skew Planar Wheel.....	45
Gráfica 14. Relación axial del diseño 2 de la antena Skew Planar Wheel.....	45
Gráfica 15. Coeficiente de reflexión para los diseños 2 a 7 de la antena Skew Planar Wheel.....	46
Gráfica 16. Relación axial del diseño final de la antena Skew Planar Wheel	47
Gráfica 17. Diagrama de radiación de la Skew Planar Wheel con ganancia normalizada	47
Gráfica 18. Coeficiente de reflexión de la antena en hélice axial para los 3 diseños	49
Gráfica 19. Relación axial de la antena en hélice axial para los tres diseños	50
Gráfica 20. Diagrama de radiación de los 3 diseños de la antena en hélice axial con ganancia normalizada	50
Gráfica 21. Impedancia de la antena Wire Curl.....	51
Gráfica 22. Coeficiente de reflexión de la antena Wire Curl.....	52
Gráfica 23. Relación axial de la antena Wire Curl.....	52
Gráfica 24. Diagrama de radiación de la antena Wire Curl con ganancia normalizada	53

DOCUMENTO 1: MEMORIA

1.	Introducción	9
1.1.	Objetivos	9
1.2.	Alcance del proyecto	9
2.	Estado del arte	10
2.1.	Introducción al Energy Harvesting	10
2.2.	Estructura de un sistema RF-WPH	12
3.	Espectro electromagnético en el entorno aeroportuario	22
4.	Estudio de las características del dron.....	25
4.1.	Alimentación del motor	26
4.2.	Alimentación de otros componentes	29
5.	Diseño y simulación de la antena.....	30
5.1.	Antenas con polarización lineal	30
5.1.1.	<i>Inverted F</i> (IFA)	31
5.1.2.	Vertical trapezoidal monopole	33
5.1.3.	Elliptical base-strip monopole	37
5.2.	Antenas con polarización circular.....	42
5.2.1.	Antena <i>Skew Planar Wheel</i>	43
5.2.2.	Axial-mode wire helix antenna	47
5.2.3.	Wire curl antena	50
6.	Diseño óptimo según requerimientos	54
7.	Dimensionamiento del diseño óptimo.....	55
8.	Conclusiones	57
	Referencias	58

1. Introducción

1.1. Objetivos

El objetivo del presente trabajo es la evaluación de los métodos de *Energy Harvesting* y la viabilidad del empleo de estos en aplicaciones del ámbito aeronáutico, en concreto en el entorno aeroportuario. La principal aplicación en la que se trabajará es el uso de drones en el aeropuerto. Este uso ya se ha llevado a cabo en algunos aeropuertos de España, como Sevilla, Burgos y Vigo y el objetivo es que ayuden en labores de gestión y mantenimiento como calibrar equipos de ayuda a la navegación aérea, revisión de balizamiento, la medición de obstáculos que puedan afectar a las servidumbres aeronáuticas, revisión de pavimentos e inspección general [1]. La principal ventaja del uso de RPAS (*Remotely Piloted Aircraft*) es que resulta más sostenible y eficiente.

Además, algunos de estos drones se han diseñado simulando la forma de un ave rapaz, como un águila o un halcón, para así servir para ahuyentar al resto de aves que vuelan alrededor y pueden suponer un peligro para la seguridad de las aeronaves que despegan y aterrizan. Esto ya se realizó con éxito en el aeropuerto de Southampton en 2018, reduciendo el número de impactos con aves en un 74 % [2].

Hasta ahora el *Energy Harvesting* se ha empleado en aplicaciones de bajo consumo. Es por ello por lo que, aunque no se consigan valores para una completa autonomía del drone con este método, se tratará de aumentar la duración de la batería, consiguiendo así una mayor duración del vuelo.

1.2. Alcance del proyecto

En el presente proyecto se hace un extenso estudio bibliográfico del estado del arte del *Energy Harvesting*, explicando en detalle las sucesivas etapas del sistema y la electrónica que estos presentan. Sin embargo, el alcance se centra principalmente en el diseño y análisis de tipologías de antenas que se podrían emplear para esta aplicación, teniendo en consideración las frecuencias del entorno aeroportuario y sus características para una mejor recepción. La parte de la electrónica ha sido adquirida ya integrada en una placa para directamente tomar medidas.

2. Estado del arte

2.1. Introducción al Energy Harvesting

Desde el comienzo de la Revolución Industrial, la ingeniería ha evolucionado a gran escala, haciendo visible la importante necesidad energética que deriva de esta evolución. Incluso a nivel de la vivienda, se consume una gran cantidad de energía. Inicialmente siempre se dependía de fuentes de energía no renovables, haciendo uso de los combustibles fósiles, como el carbón y petróleo; y de la energía nuclear. Estos métodos tienen un gran impacto en el medio ambiente, debido a la emisión de gases de efecto invernadero y la generación de residuos de carácter radiactivo [3].

Un método para afrontar esta necesidad energética es el *Energy Harvesting* o extracción de energía ambiente, que es la captación de energía latente del entorno. A escala macroscópica tenemos conocidos ejemplos como el caso de las placas fotovoltaicas, que obtienen la energía de la luz solar, o los aerogeneradores, que la obtienen del viento. Otros ejemplos menos conocidos hacen uso de las vibraciones que generan los humanos y vehículos sobre el terreno [4].

Sin embargo, con el desarrollo de la electrónica y los sensores, están ganando importancia las aplicaciones a pequeña escala, sobre todo aquellas que hacen uso de WSN (*Wireless Sensor Network*). Los grupos de sensores que se emplean en estas aplicaciones son elementos de bajo voltaje y por tanto el método de *Energy Harvesting* aplicado en este caso se debe adaptar [5]. La fuente de energía principal en este caso suelen ser las baterías, lo cual supone un inconveniente, debido a que estas se deben cambiar o recargar con cierta frecuencia, y además suponen unos residuos perjudiciales para el medio ambiente.

Un método de *Energy Harvesting* que se adapta a estas aplicaciones es aquel que hace uso de la energía electromagnética que se encuentra en las ondas de radiofrecuencia del espacio, RF-WPH (*Radio Frequency Wireless Power Harvesting*). Este método presenta diversas ventajas, como que obtiene la energía de una fuente que es abundante en el espacio, y no depende de factores cambiantes como la existencia de luz o viento. Además, no necesita partes móviles, lo que evita complejidad estructural. Por otro lado, también presenta ciertas desventajas, como que debido a las pérdidas que se generan en el espacio libre debido a que la fuente transmisora se encuentra lejos, el nivel de energía ambiente puede ser bastante bajo [6]. Factores como este se deben tener en cuenta para establecer unos parámetros de diseño que aseguren la obtención de los niveles de energía requeridos.

Se encuentran diversas aplicaciones de RF-WPH. Entre ellas las redes de sensores WSN, que a menudo trabajan para obtener variables del entorno. Esto facilita que la red de sensores trabaje sin estar interconectada y sin necesidad de estar cambiando las baterías, ya que en algunos casos no resultan muy accesibles. Otra aplicación que se encuentra en lanzamiento es en redes IoT (*Internet of Things*). Se trata de una técnica que conecta diversos dispositivos a través de Internet, coordinándose y compartiendo información. Debido a la alta comunicación entre dispositivos se requiere una elevada

potencia, por tanto, RF-WPH ayuda a mejorar la eficiencia energética [7]. Este método también está ganando terreno en el ámbito biomédico, habiéndose diseñado pequeños implantes para introducir en el cerebro [6] y parches de tela con sensores que se adhieren a la piel [8].

Puesto que los valores de tensión obtenidos por un único sistema *Energy Harvester* son bajos, para asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo se puede combinar el sistema de RF con otros métodos. Uno de ellos es el sistema piezoeléctrico que transforma energía mecánica en eléctrica. Los materiales piezoeléctricos, los cuales suelen ser materiales cristalinos como el cuarzo o la turmalina, generan electricidad cuando están sometidos a unos esfuerzos mecánicos, siendo este proceso conocido como efecto directo. Además, estos materiales experimentan también el efecto inverso y cuando se someten a una diferencia de potencial se deforman. Cuando se produce este efecto inverso el material es usado como un actuador, en cambio para la aplicación de *Energy Harvester* se emplea el efecto directo [9]. Hay dos tipos de materiales piezoeléctricos, los piezocerámicos y los piezopolímeros. Los primeros presentan mayor eficiencia ya que producen más potencia sin embargo son más frágiles, mientras que con los segundos ocurre lo contrario, producen menos potencia, pero son más flexibles.

Otro método son los pequeños paneles solares, como aquellos presentes en ciertas calculadoras. El término es SEH (*Solar Energy Harvesting*), y el sistema está compuesto por el panel solar, que transforma la energía lumínica en eléctrica y el convertidor DC-DC que ajusta el valor de tensión deseado [10]. En la Figura 1 [11] se muestra el funcionamiento de una célula fotovoltaica. Estas suelen estar hechas de una material semiconductor, como el silicio. Su estructura está formada por dos capas, una tipo P en la parte superior y otra tipo N en la parte inferior. Al entrar en contacto el fotón de luz con la capa P se libera un electrón. Al conectar entre sí las distintas células se forma un circuito a través del cual circulan los electrones liberados, generando así una corriente eléctrica [12].

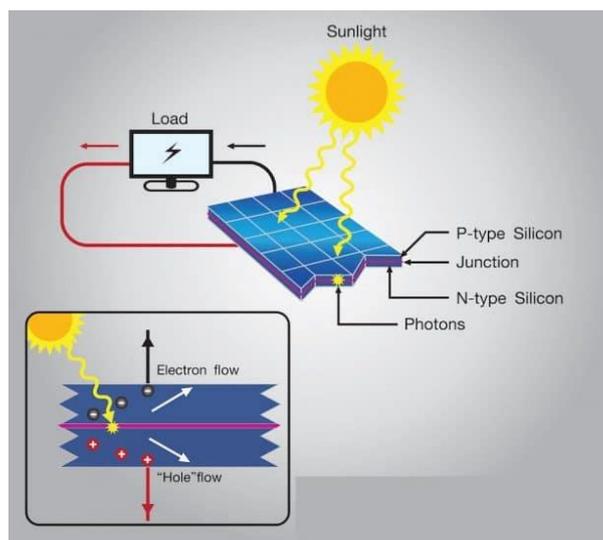


Figura 1. Funcionamiento de una célula fotovoltaica

2.2. Estructura de un sistema RF-WPH

El principio de funcionamiento se basa en la captación de las ondas electromagnéticas que han sido emitidas por otras antenas que actúan como transmisores. El sistema capta estas ondas mediante una antena que actúa como receptor y esta señal es rectificadora y transformada en corriente continua (DC) que alimenta a la carga. Para ello, hay que estudiar la naturaleza de las ondas electromagnéticas en el punto en el que se encuentra la antena receptora. Según la distancia a la que se encuentre de la antena transmisora esta naturaleza cambiará dependiendo si nos encontramos en campo cercano o lejano. Esto se trata de dos regiones diferenciadas por la distancia de Fraunhofer, d_f , definida en la Ecuación (1) [13].

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

Donde D es la máxima dimensión de la antena transmisora. Por encima de esta distancia, nos encontramos en el campo lejano, donde el campo eléctrico y magnético de las ondas se encuentra en fase. Por debajo de esta distancia nos encontramos en campo cercano, donde predomina el campo magnético o el campo eléctrico. Esta región se divide en otras dos subregiones, el campo reactivo, y el campo radiante. En el primero, el más cercano, los campos magnético y eléctrico se encuentran aproximadamente con una diferencia de fase de 90°. En el segundo, las ondas empiezan a estar en fase, pero no presentan la misma dependencia que en el campo lejano. Esta región también se denomina zona de Fresnel [14].

La distancia que determinan la separación entre los campos cercano y lejano varían según la referencia y el tipo de antena que se esté analizando. Así, en [15] se toman los siguientes límites:

$$\text{Campo cercano: } d < 0,1 \frac{\lambda}{2\pi}$$

$$\text{Zona de Fresnel: } 0,1 \frac{\lambda}{2\pi} < d < 0,8 \frac{\lambda}{2\pi}$$

$$\text{Campo lejano: } d > 0,8 \frac{\lambda}{2\pi}$$

En el campo cercano, a pesar de ser poco predecible el carácter de las ondas, no se presenta ningún problema de densidad de potencia, por lo que se caracteriza por buenas eficiencias [16], pero se ve limitado por la distancia. Aplicaciones en campo cercano encontramos el RFID y el NFC (*Near-Field Communication*), las cuales se trata de aplicaciones de transferencia de datos. En RFID (*Radio Frequency Identification*) la etiqueta pasiva no tiene batería, sino que obtiene la energía que necesita para enviar los datos de las ondas que transmite la señal del lector [17].

Otra aplicación en campo cercano es el WPT (*Wireless Power Transmission*), que es una aplicación de transferencia de energía. Para esta última aplicación existen 3

estándares para la carga inalámbrica de dispositivos: Qi, PMA y A4WP [18]. El más extendido de los tres es el Qi, el cual basa su funcionamiento en la inducción electromagnética. La base de carga tiene una bobina que al pasar corriente a través de ella se genera un campo magnético. El dispositivo receptor presenta también una bobina que, al colocarse en el seno del campo magnético, se induce una corriente a través de ella y carga la batería del dispositivo [19]. La frecuencia de operación está limitada entre 87 kHz y 205 kHz [20]. Los otros dos estándares, se han aliado recientemente para competir frente al Qi [21]. PMA y Qi trabajan en un rango de frecuencias similar, pero el estándar A4WP usa una frecuencia más elevada, de 6,78 MHz [18].

Por otro lado, el campo lejano se ve definido por el carácter predecible de las ondas, aunque al encontrarse a una distancia mayor, la densidad de potencia se ve disminuida. Durante el diseño del sistema, esta baja densidad de potencia puede llegar a producir que no se alcancen los niveles deseados de potencia para alimentar la carga. Si se toma únicamente la radiación electromagnética ambiente, las principales fuentes de interés son los servicios de telecomunicaciones como GSM (*Global System for Mobile Communications*) y WLAN (*Wireless Local Area Network*). A una distancia de entre 25 m y 100 m de una estación GSM se obtiene una densidad de potencia entre $0,1 \text{ mW}/\text{m}^2$ y $3,0 \text{ mW}/\text{m}^2$ [22]. Una solución adoptada para esto es introducir una fuente transmisora con una antena de una alta ganancia emitiendo hacia el receptor. En este segundo caso, para una potencia emitida de 1 W desde 5 m de distancia, unos 10 mW pueden ser captados por la antena receptora [23]. En la Figura 2 se observan las distintas soluciones.

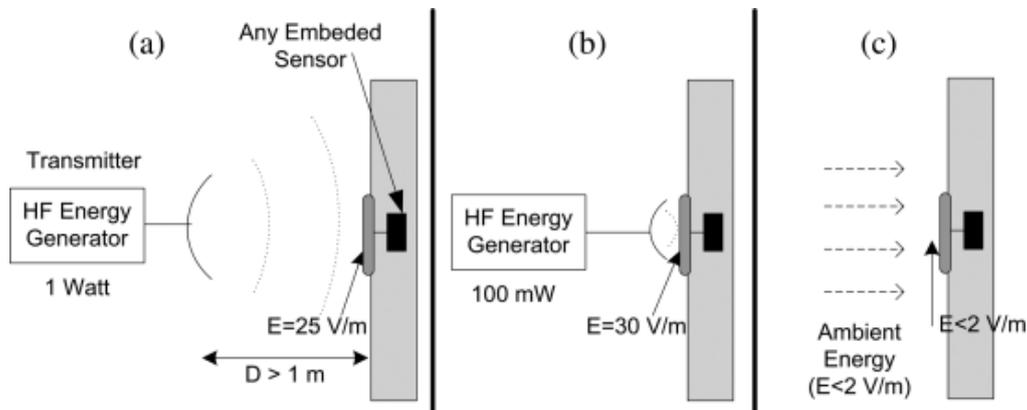


Figura 2. Escenarios de RF Energy Harvesting para la alimentación de sensor remoto. (a) Con fuente dedicada en campo lejano. (b) Fuente dedicada en campo cercano. (c) A partir de energía ambiente [16]

En la Tabla 1 [7] se hace una comparación de los dos tipos de sistemas en campo lejano, el ambiente y el dedicado.

Sistemas RF-WPH dedicado	Sistemas RF-WPH ambiente
Tienen fuentes dedicadas de RF.	Usan fuentes de RF ambientes. Estas son fuentes que no están dedicadas a la transferencia de energía.
La energía de RF no es gratis. Requiere un coste de la construcción de la fuente transmisora y de emitir RF.	La energía de RF es gratis, ya que usa fuentes ya construidas.
Son completamente controlables y por tanto adecuados para aplicaciones que requieran QoS (<i>Quality of Service</i>).	No son controlables.
Es un proveedor de energía predecible.	No es un proveedor de energía predecible.
Produce densidades de potencia elevadas.	Produce densidades de potencia bajas.

Tabla 1. Comparativa entre sistemas de RF-WPH dedicados y ambientes.

Un sistema de RF-WPH está formado por diversos componentes, y de cada uno de ellos se debe determinar los parámetros para que se adapte a la aplicación que se busca. En la Figura 3 se puede observar el esquema de los elementos [5]. En primer lugar, se encuentra la antena receptora. Esta va seguida por la red de adaptación de impedancias, IMN (*Impedance Matching Network*), cuyo objetivo es igualar la impedancia de entrada y la de salida para evitar al máximo las pérdidas por reflexión. Seguidamente se encuentra el rectificador o multiplicador de voltaje. La salida de este se conecta a un elemento que regula el valor de potencia para que se ajuste al deseado. A esta unidad se le denomina *Power management* y tras esta se tiene ya la corriente continua y los niveles de voltaje y corriente deseados para alimentar la carga.

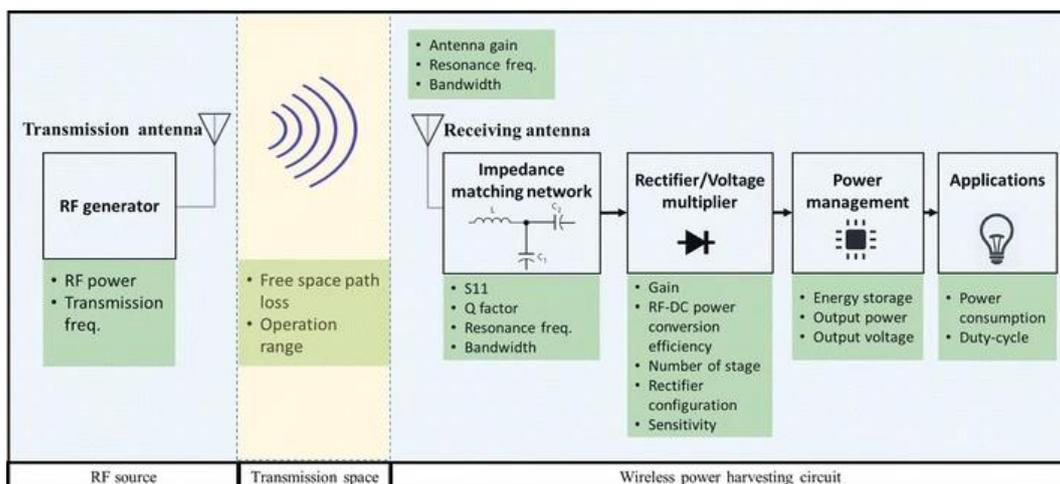


Figura 3. Diagrama de bloques de los elementos de un sistema RF-WPH [5]

En la literatura, la combinación de una antena receptora con un circuito rectificador RF-DC recibe el nombre de rectenna (*rectifier antenna*) [16]. Los artículos y proyectos que estudian los sistemas de RF-WPH o WPT se refieren al sistema por este nombre.

Dentro de los parámetros para tener en cuenta de la antena receptora se encuentran la ganancia de la antena, la frecuencia de resonancia y el ancho de banda. La ecuación que caracteriza la propagación en el espacio libre viene definida por la Ecuación (2)

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (2)$$

En la Ecuación (2) se puede observar que la potencia que llega a la antena receptora P_R , es directamente proporcional a su ganancia, G_R . Por tanto, para conseguir mayor potencia es preferible antenas con alta ganancia o *arrays*. Sin embargo, esto resulta en un mayor tamaño de la antena, no siendo adecuado para pequeños dispositivos. Así, mejorar la ganancia de la antena sin aumentar su tamaño es uno de los objetivos de diseño [24]. No obstante, la ecuación (2) aplica cuando la antena transmisora y la receptora se encuentran alineadas en la dirección de máxima radiación. Para la aplicación del dron, se debe tener en cuenta que éste se encontrará en movimiento, y por tanto también se moverá su dirección de máxima ganancia. Esto producirá que la potencia recibida caiga drásticamente cuando estas direcciones no están alineadas. Es por ello por lo que resulta preferible una antena receptora de tipo omnidireccional (Figura 4).

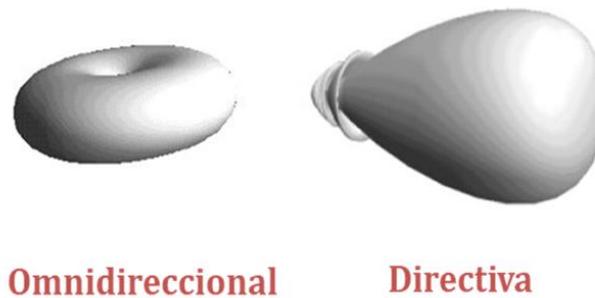


Figura 4. Diagrama de radiación de una antena omnidireccional y de una antena con alta directividad [25]

Respecto a la frecuencia, cada antena tiene su óptima, también denominada frecuencia de resonancia, que es aquella donde la inductancia y la capacitancia se cancelan y por tanto la impedancia es mínima, como se observa en la Figura 5 [5]. Esta gráfica mostrada en la Figura 5 muestra que a medida que aumenta la frecuencia el carácter capacitivo disminuye, mientras que el inductivo aumenta. Este comportamiento se da en un gran número de antenas, sobre todo en antenas tipo dipolo y monopolo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que, en otros tipos de antenas, como las espiras el comportamiento es contrario, la capacitancia aumenta y la inductancia disminuye.

Esta frecuencia de resonancia esta inversamente relacionada con las dimensiones de la antena. Cuanto menor sea la frecuencia, mayores las dimensiones de la antena, por tanto, se busca unos valores elevados de frecuencia para poder adaptarse a los pequeños dispositivos. La literatura muestra diversos ejemplos trabajando a frecuencias de la banda UHF, como en [26], donde se obtiene una eficiencia máxima del 78% a una frecuencia de 2,45 GHz.

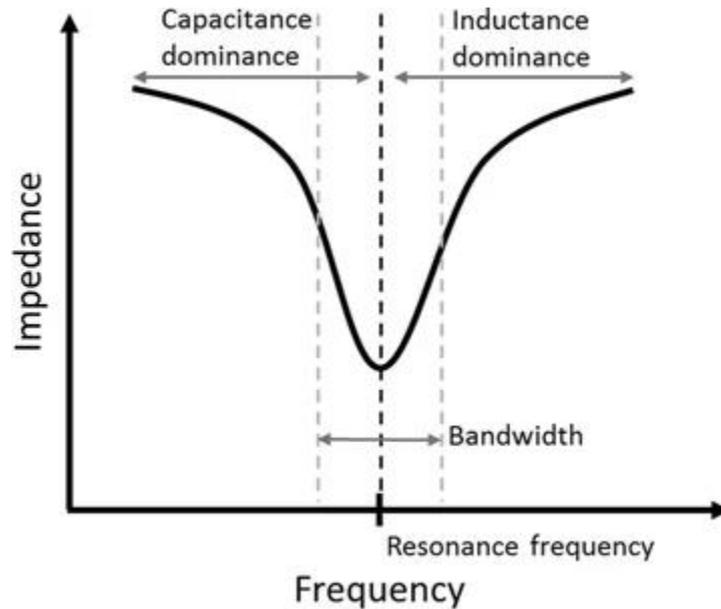


Figura 5. Relación entre impedancia, frecuencia de resonancia y ancho de banda de una antena tipo dipolo o monopolo [5]

Por último, al tratarse de una antena cuyo objetivo no es obtener una señal concreta sino la mayor cantidad de potencia posible, un mayor ancho de banda es conveniente. Este objetivo ya se desarrolla en diversos trabajos publicados como en [27]. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los componentes electrónicos posteriores sean capaces de asimilar estas frecuencias.

El siguiente elemento del sistema es la IMN. La función de esta es crucial ya que un mal diseño en este elemento puede producir un coeficiente de reflexión elevado, causando unas elevadas pérdidas de potencia. Existen diversas configuraciones de redes de adaptación de impedancias. Las tres básicas son la red en L, T y π y el esquema de estas se puede observar en la Figura 6 [5]. Conociendo la impedancia de entrada, Z_{in} , la cual es la impedancia de la antena receptora, y la de salida, Z_{out} , que es la impedancia de entrada del rectificador, se pueden obtener los valores de las impedancias de sus elementos. La dificultad en este ámbito radica en que la impedancia de entrada del rectificador es no lineal y varía con la potencia recibida por la antena. Es por ello por lo que ciertos artículos estudian la posibilidad de diseñar una red de adaptación que se amolde a las variaciones de impedancia [28].

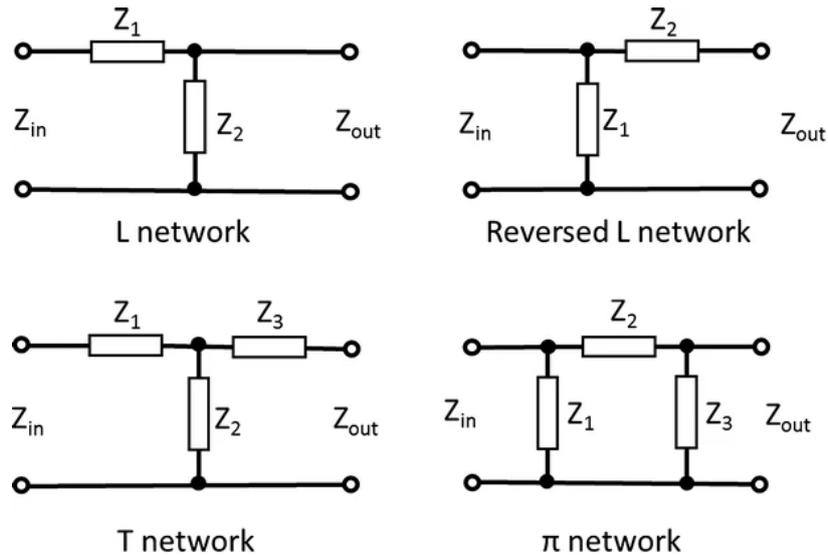
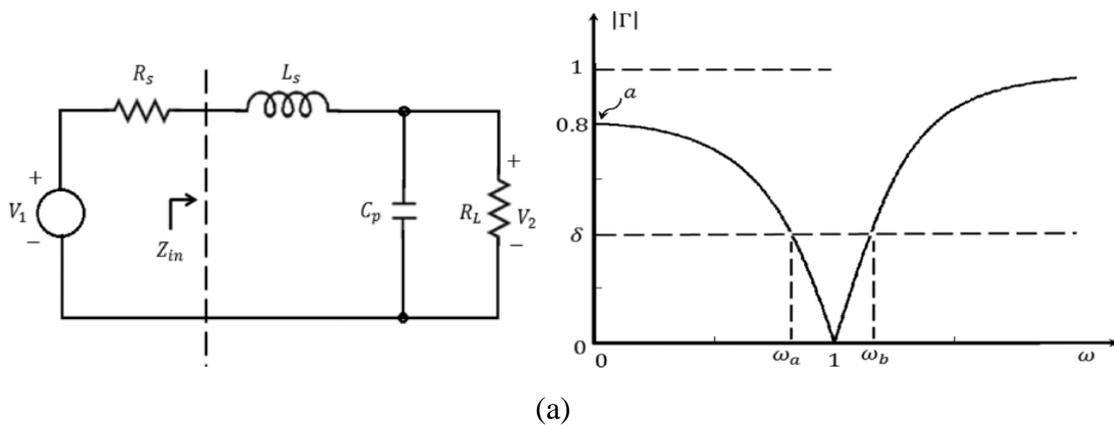


Figura 6. Configuraciones básicas en las redes de adaptación de impedancias

Por otro lado, es también importante tener en cuenta la frecuencia y el ancho de banda que la IMN puede tolerar. Así, en el artículo [29] se analiza las características que debe tener para trabajar con una, dos o tres frecuencias. En la Figura 7 se puede observar a la izquierda el esquema del circuito y a la derecha el coeficiente de reflexión en función de la frecuencia para una frecuencia (a), dos frecuencias (b) y tres frecuencias (c). Las pérdidas que se producen se deben tener en cuenta, aunque en muchos trabajos se desestimen [30].



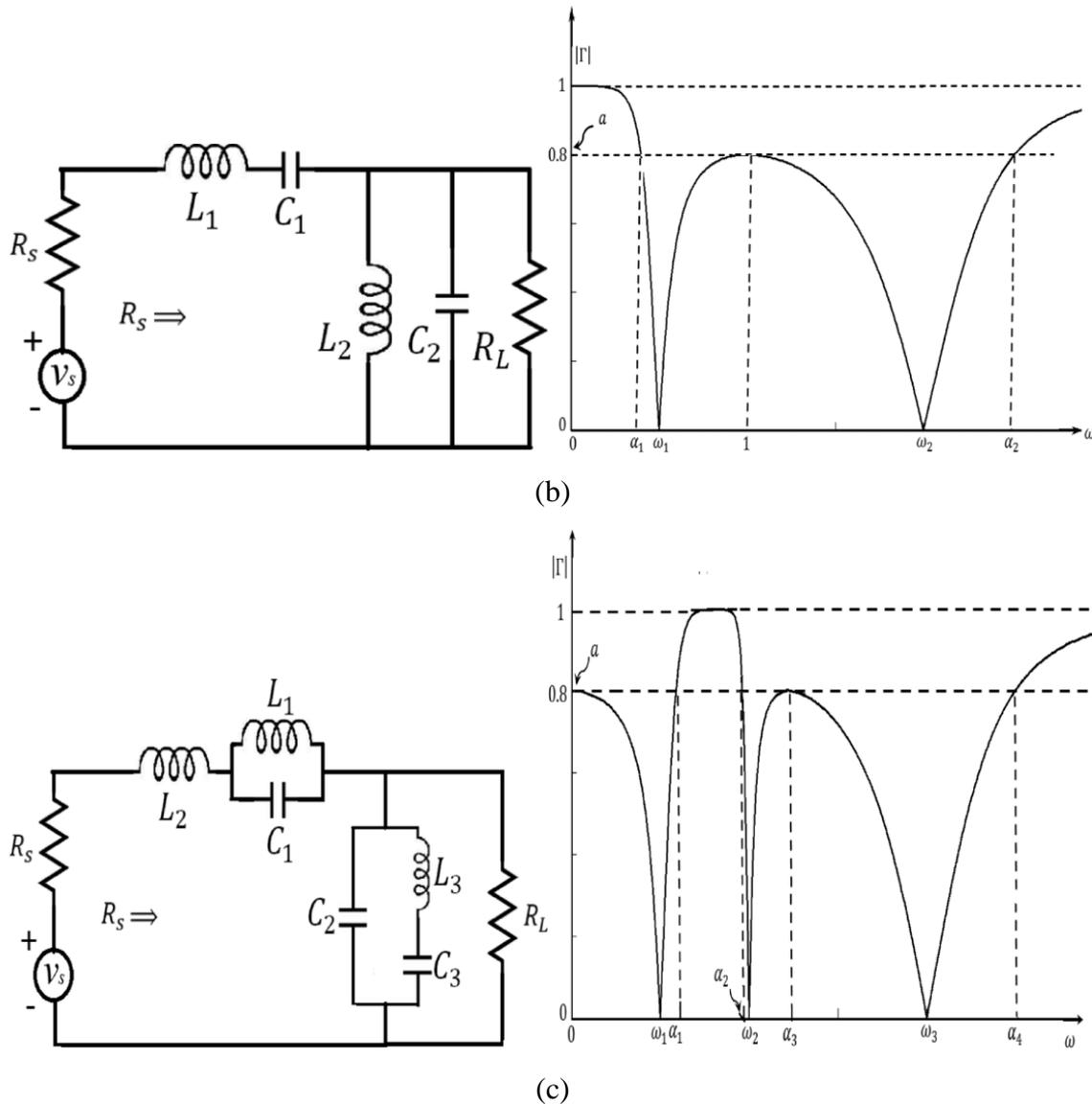


Figura 7. Circuitos de adaptación de impedancias (izquierda) y su coeficiente de reflexión (derecha) para una frecuencia (a), dos frecuencias (b) y tres frecuencias (c) [29]

Seguidamente, el rectificador convierte la señal sinusoidal de corriente alterna (CA) en corriente continua (CC) para alimentar a los sensores y actuadores. Al igual que en el caso de las IMN, existen distintas tipologías de rectificadores. Las más comunes se muestran en la Figura 8 [31]. En (a) encontramos el rectificador de media onda formado por un único diodo D1, el cual conduce únicamente en el ciclo positivo. Puesto que pierde la mitad de la señal, este método no es adecuado para *Energy Harvesting*. Seguidamente en (b) se tiene el rectificador de onda completa. En este caso el diodo D1 conduce y carga C1 durante el ciclo negativo y el diodo D2 conduce y carga C2 en el ciclo positivo, sin perderse así energía en ninguno de los ciclos y consiguiendo una tensión de salida dos veces mayor a la de entrada. Finalmente, en (c) se tiene el rectificador de puente de diodos, en el cual los diodos D2 y D3 conducen durante el ciclo positivo, y D1 y D4 durante el ciclo negativo.

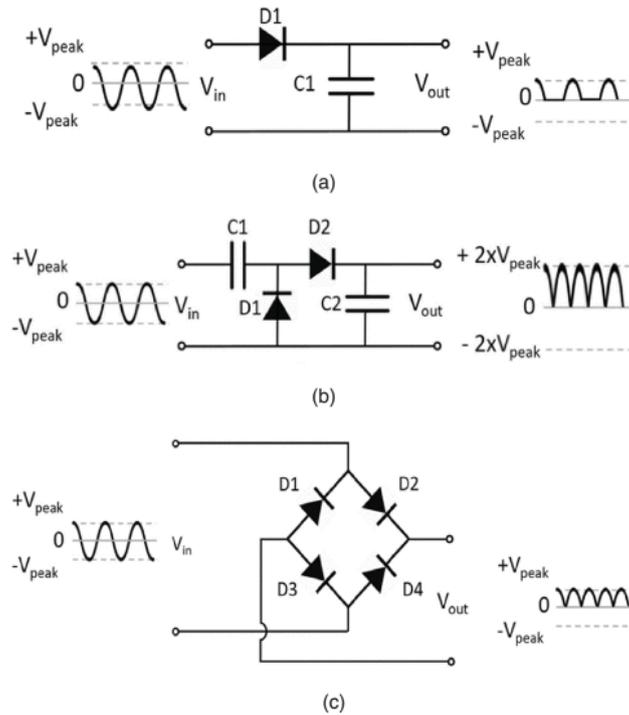


Figura 8. Técnicas de rectificación: (a) de media onda, (b) de onda completa, (c) puente de diodos

En caso de que la potencia adquirida no sea suficiente, se necesitará un multiplicador de potencia. Existen tipologías más complejas de rectificadores, como Cockroft-Walton, Dickson, y diferencial, mostrados en la Figura 9 [31]. Estos rectificadores hacen también la función de multiplicadores gracias al empleo de múltiples etapas (*stages*). Así, el voltaje a la salida de cada etapa para las tipologías mostradas en (a) y (b) viene dado por la Ecuación (3).

$$V_{out,1} = 2V_{RF} - V_{th1} - V_{th2} \quad (3)$$

V_{th1} y V_{th2} son los voltajes umbral de los transistores. A partir de esta ecuación, se puede deducir que para obtener una mayor tensión se debe disminuir o compensar el voltaje umbral de los transistores. Un ejemplo de compensación es mostrado en la Figura 10 [31], mediante una tensión V_G .

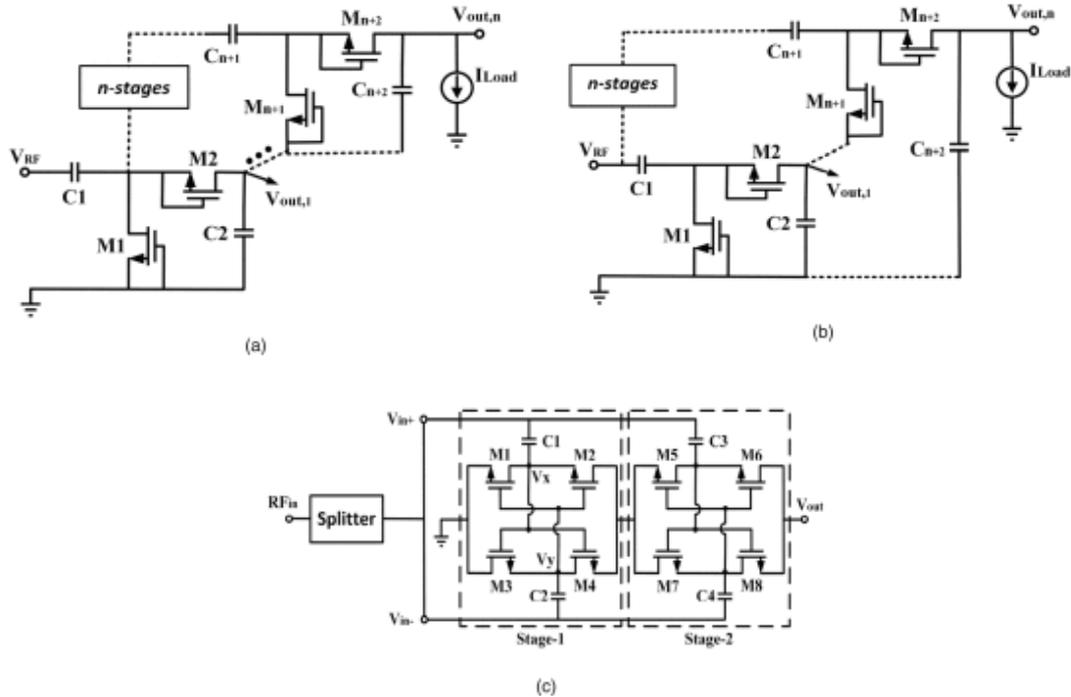


Figura 9. Tipologías de multiplicadores de potencia: (a) Cockcroft-Walton, (b) Dickson y (c) diferencial.

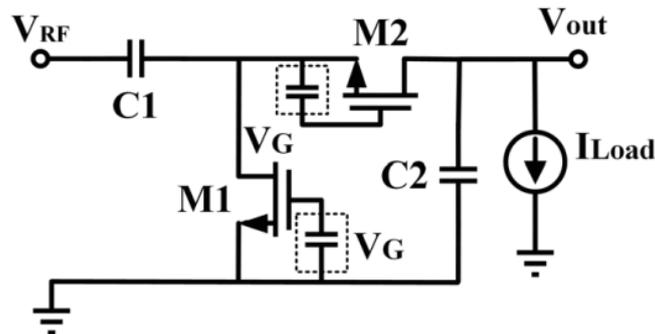


Figura 10. Compensación del voltaje de umbral del transistor

Una vez diseñado, el parámetro que define la eficiencia del rectificador es el PCE (*Power Conversion Efficiency*), definido en la Ecuación (4).

$$\eta_{PCE} = \frac{P_{out,DC}}{P_{in,RF}} \quad (4)$$

$P_{out,DC}$ es la potencia liberada a la carga a la salida y $P_{in,RF}$ es la potencia obtenida por la antena que entra al rectificador o multiplicador. Otro factor para tener en cuenta es la sensibilidad, mostrada en la Ecuación (5). Esta es la mínima potencia necesaria a la entrada para que se pueda llevar a cabo la conversión.

$$Sensibilidad (dBm) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{mín}}{1 \text{ mW}} \right) \quad (5)$$

Puesto que la densidad de potencia captada por la antena suele ser baja debido a las pérdidas en el espacio libre, resultan convenientes valores bajos de la sensibilidad. Sin embargo, esto produce pérdidas adicionales de corriente lo que conduce a una menor eficiencia [5].

Por último, a la salida del rectificador, los valores de potencia se van a ver influidos por la carga que se le aplique. Esta carga debe ser la óptima para conseguir la máxima potencia posible. Sin embargo, esta carga óptima no es siempre la misma, sino que varía según las condiciones que se den. Para ello, se usa a menudo un seguidor de punto de máxima potencia (MPPT, *Maximum Power Point Tracking*) cuya función es monitorizar la energía obtenida y determinar y regular cuál es la carga óptima [32]. En la Figura 11 [33] se muestra en una gráfica que relaciona voltaje, intensidad y potencia, cual es el MPP.

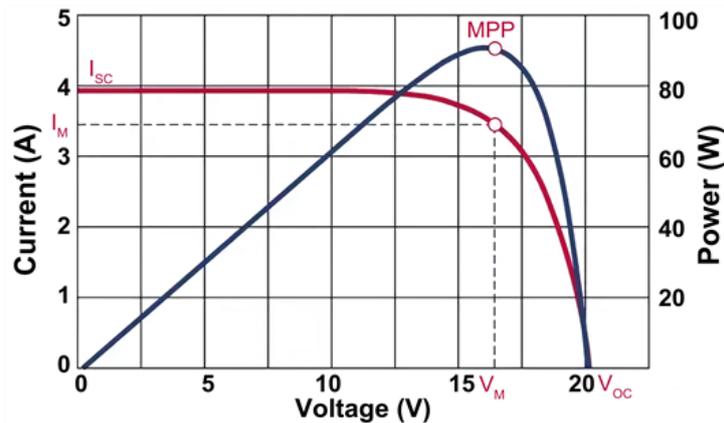


Figura 11. Curva P-V y I-V y el punto de máxima potencia (MPP)

El diseño de un sistema de RF-WPH es un proceso iterativo. Inicialmente se tiene en cuenta la aplicación y los requisitos de esta. A partir de ahí se empiezan a determinar los parámetros del sistema, como la frecuencia y la potencia necesaria a la salida para el funcionamiento de la carga. Una vez definidos los parámetros se diseña y se dimensionaliza la antena, la IMN y el multiplicador de potencia. Una vez hecho esto se toman medidas y se analizan, estudiando la eficiencia. Si estos resultados no se ajustan al objetivo, se replantean algunos de los parámetros o del diseño, realizando cambios y analizando los resultados de nuevo, hasta que estos sean los deseados. En la Figura 12 se muestra un diagrama de este proceso.

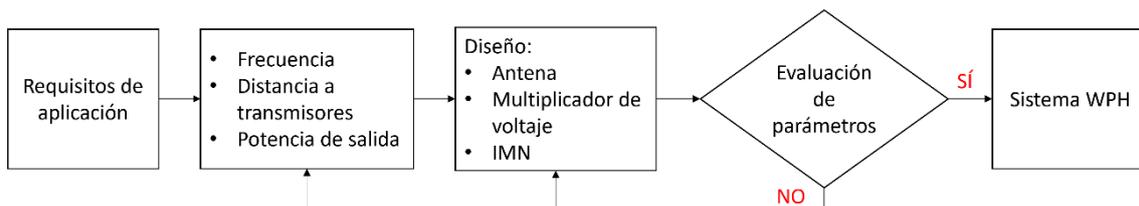


Figura 12. Proceso de diseño de un sistema RF-WPH

3. Espectro electromagnético en el entorno aeroportuario

El entorno aeroportuario se caracteriza por una gran cantidad de sistemas de telecomunicación. Estos sistemas presentan diversas funciones y es de gran importancia que se estudie la compatibilidad entre ellos para asegurar que no se producen interferencias y se garantice su correcto funcionamiento. En este apartado se realizará un resumen sobre las bandas de frecuencia atribuidas a cada sistema y se analizará cuál de ellas es la más adecuada para la aplicación de estudio. Esta distribución de frecuencias viene establecida en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) y el Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. (UIT) [34], así como en el Volumen V del Anexo 10 de la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) [35].

En este entorno se hace una diferenciación entre los sistemas específicos y los no específicos. Los primeros, se tratan de sistemas que trabajan en unas bandas dedicadas y que son considerados críticos, ya que su correcto funcionamiento es necesario para garantizar la seguridad en el transporte aéreo. Son aquellos que proporcionan servicios de navegación, comunicación, vigilancia y gestión del tráfico aéreo. Los sistemas específicos analizados en el Anexo 10 con su banda de frecuencia, vienen enumerados a continuación. Se hace una diferenciación entre frecuencias por debajo y por encima de 30 MHz.

- Por debajo de 30 MHz:
 - Servicio móvil aeronáutico (R): 2,8 – 22 MHz.
 - Radiotelefonía: 300 – 2700 Hz.
- Por encima de 30 MHz:
 - Banda 108 – 117,975 MHz: en sistemas ILS (*Instrument Landing System*), VOR (*Very High Frequency Omnidirectional Range*) y sistemas de aumentación basado en Tierra (GBAS) del GNSS.
 - Banda 117,975 – 137 MHz: para el Servicio Móvil Aeronáutico, comunicaciones aire-aire, comunicaciones en la superficie del aeródromo y como frecuencias de socorro y alerta (SAR).
 - Banda 960 – 1215 MHz: para el DME (*Distance Measuring Equipment*), GPS (L5) y el TCAS (*Traffic and Collision Avoidance System*).
 - Banda 5030,4 – 5150 MHz: para el MLS (*Microwave Landing System*) y Servicio Móvil Aeronáutico por Satélite (AMS(R)S).

Por otro lado, los sistemas no específicos no se consideran críticos y hacen uso de ellos los operadores de las aerolíneas y los pasajeros que acuden al aeropuerto. Se usan para gestiones aeroportuarias y acceso a redes de voz y datos. A continuación, se enumeran los principales sistemas con su banda de frecuencia:

- GSM 900 (*Global System for Mobile Communications*): 880 – 915 MHz y 925 – 960 MHz.
- DCS 1800 (*Digital Communication System*): 1710 – 1785 MHz y 1805 – 1880 MHz
- UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*): 1900 – 1980 MHz, 2010 – 2025 MHz, 2110 – 2170 MHz y 2500 – 2690 MHz
- TETRA (Radio Troncalizada Terrestre o *TERrestrial Trunked RAdio*): 406,1 – 430 MHz y 440 – 470 MHz
- PMR (Radio Móvil Privada o *Private Mobile Radio*): 223 – 235 MHz
- Radiotelefonía: 446 – 446,1 MHz
- Radar: frecuencias entre 1 y 5 GHz, tal como se muestra en la Tabla 2 [34]
- RFID: 2446 – 2454 MHz. Esta se trata de una aplicación de campo cercano por tanto los niveles de emisión son muy bajos para el objeto de estudio.
- Wi-Fi y WiMAX: en banda de 2,4 GHz (2400 – 2483,5 MHz), estando la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) limitada a 100 mW en interiores y 10 mW en exteriores. Además, en la banda de 5 GHz tenemos 2 subbandas, la primera 5150 – 5350 MHz con PIRE limitada a 200 mW en interiores, y la segunda 5470 – 5725 MHz con PIRE limitada a 1 W tanto en interior como exterior de recintos.
- Satélite: diversas bandas de frecuencia entre 1 y 30 o 40 GHz, como se muestra en la Tabla 3 [34]

Uso militar Servicio de Radiolocalización con carácter primario	Uso militar Servicio de Radiolocalización con carácter secundario	Uso exclusivo militar
1,215 - 1,240 GHz 1,240 - 1,260 GHz 1,260 - 1,350 GHz 3,1 - 3,4 GHz 5,255 - 5,350 GHz	2,7 - 2,9 GHz	3,4 - 3,6 GHz (Según UN-107)

Tabla 2. Bandas de frecuencia de radar y radiolocalización

	NOTA DE UTILIZACIÓN	BANDAS DE FRECUENCIAS	
SATÉLITE	UN-46	Servicio Móvil por Satélite	1525 - 1530 MHz
	UN - 48	Servicio Móvil por Satélite	1980 - 2010 MHz
			2170 - 2200 MHz
	UN - 62	10,7 - 11,7 GHz	
	UN - 65	Servicio Fijo por Satélite	13,75 - 14 GHz
	UN - 65	Servicios Móvil y Fijo por Satélite	14,3 - 14,5 GHz
	UN - 79	Servicio Fijo Enlace Ascendente	27500 - 27828,5 MHz
			28444,5 - 28948,5 MHz
			29452,5 - 29500 MHz
	UN - 94	Servicio Fijo	40,5 – 42,5 GHz
	UN - 99	GPS	1559 - 1610 MHz
	UN - 122	GALILEO	1164 - 1215 MHz
			1215 - 1300 MHz
			1300 - 1350 MHz
1559 - 1610 MHz			
5000 - 5010 MHz			
5010 - 5030 MHz			
UN - 141	Servicio Fijo Enlace Ascendente	14 - 14,5 GHz	
		29,5 - 30 GHz	

Tabla 3. Bandas de frecuencia de la comunicación por satélite

Como conclusión, se observa que las bandas frecuentadas por más sistemas que pueden proporcionar unos niveles adecuados de potencia para el objeto de estudio son aquellas bandas por encima de 1 GHz. Además, de la literatura se puede observar que ya se han diseñado diversas rectenas trabajando en estas frecuencias con una buena eficiencia [8] [26] [24] [36] [37].

4. Estudio de las características del dron

En este apartado se analizan las características del dron que volará en el entorno aeroportuario para así saber cuáles son los requisitos que se deben intentar cumplir. Para ello, se ha obtenido la información del dron que ya ha realizado pruebas en el aeropuerto de Southampton [2]. Este dron fue diseñado por la empresa Clear Flight Solutions BV, actualmente conocida como The Drone Bird Company [38].

El primer modelo es el Falcon, del cual se encuentran dos tipologías. La primera de ellas es de ala fija (*fixed-wing*) y el vuelo se realiza gracias a un motor que activa una hélice en la parte delantera. La segunda de ellas realiza el vuelo gracias al aleteo de las alas (*flapping-wing*) (Figura 13). Ambas son alimentadas por una batería LiPo (polímero de litio), pesan en torno a 800-900 gramos y presentan una autonomía de vuelo de entre 10 y 20 minutos [39]. Para el control de vuelo y obtención de datos hace uso de telemetría a través de una serie de sensores.



Figura 13. Falcon flapping-wing drone de The Drone Bird Company [39]

Además de este diseño se han desarrollado más inspirándose en la forma de otras aves. Esta es la serie AVES y existen variedad de modelos distintos (Figura 14). Estos modelos son alimentados por una batería de Li-ion (iones de litio), un mayor peso en torno a 2 kilogramos y una autonomía de vuelo mayor de hasta 1,5 horas [40] y también hacen uso de telemetría.

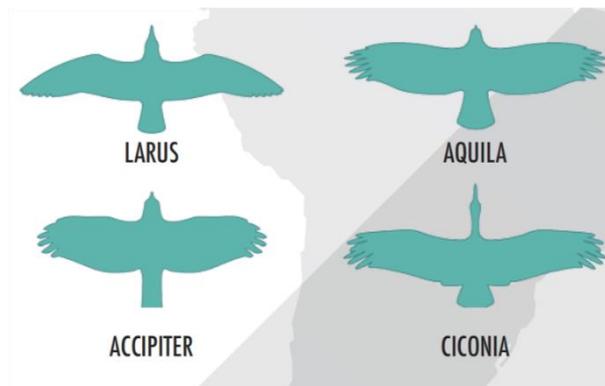


Figura 14. Modelos de la serie AVES de The Drone Bird Company

4.1. Alimentación del motor

Las baterías de polímero de litio (Li-Po) y de iones de litio (Li-ion) son las más usadas en los drones debido a sus características. Sin embargo, dentro de estos dos tipos existe una gran variedad según los valores que toman sus propiedades. Según los requisitos de los motores y actuadores que presenta el dron se debe escoger una batería que cumpla estos requisitos. La potencia aplicada al motor del dron determinará el empuje. Este empuje debe intervenir con el resto de las fuerzas logrando la sustentación del dron. Los drones más extendidos en el mercado son los drones quadrirotor, donde cada rotor genera un empuje, y la suma de las 4 componentes debe anular o superar a la fuerza peso del dron. En este caso, al tener que alimentar a 4 motores en paralelo, la batería debe ser capaz de suministrar 4 veces la corriente de cada motor.

Centrándose en el caso del Falcon fixed-wing o la serie AVES, únicamente presentan un motor y el empuje generado interviene con otras 3 fuerzas: el peso, la resistencia y la sustentación (Figura 15). La fuerza de sustentación responde a la Ecuación (6), dependiendo del coeficiente de sustentación, C_L , la densidad del aire, ρ , la velocidad, V y la superficie alar, A . El dron no adquiere una altitud excesiva ya que debe ajustarse a la normativa [41] y no debe intervenir en las servidumbres aeronáuticas. Por ello, el valor de ρ se establece en $1,2 \text{ kg/m}^3$. El valor de superficie alar, A , se obtiene a partir de la fórmula del alargamiento (Ecuación (7)), y el valor del alargamiento se ha obtenido de la referencia [42], donde aparecen los valores de AR según la forma del ala. Se ha tomado el AR del Halcón de 5,83. Sustituyendo los valores de velocidad obtenidos de las fichas de datos e igualando la sustentación al peso se obtienen los coeficientes de sustentación de la Tabla 4.

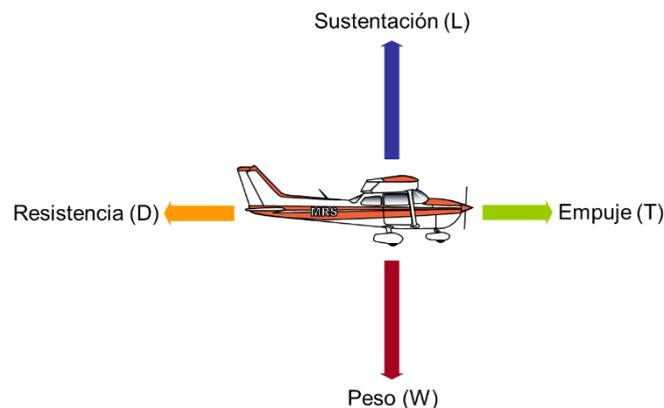


Figura 15. Fuerzas intervinientes en la dinámica de vuelo del dron

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L \quad (6)$$

$$AR = \frac{b^2}{S} \quad (7)$$

Modelo	Velocidad	Superficie alar	Peso	C_L
Falcon fixed-wing	20,83 m/s	0,21516 m ²	8,829 N	0,1576
Larus	20,83 m/s	1,07204 m ²	24,525 N	0,0879
Aguila	20,83 m/s	1,15952 m ²	34,335 N	0,1137

Tabla 4. Valores de C_L mínimos para los distintos modelos del dron

La ventaja de este dron se encuentra en la posibilidad de activar el modo de planeo, con el que no se requiere un empuje para mantener el vuelo, y por tanto el rotor puede ser apagado. Sin embargo, aún presenta una pequeña componente de resistencia lo que disminuye la velocidad lentamente, haciendo necesario encender el rotor pasado un tiempo para poder recuperar esa velocidad. Para conseguir la mayor eficiencia en el proceso de diseño se debe tener en cuenta su aerodinámica.

Lo importante a determinar para decidir el motor necesario es la resistencia aerodinámica del dron, para así saber el empuje mínimo necesario para vencer esta resistencia aerodinámica. La resistencia aerodinámica responde a la Ecuación (8). De esta se conocen los valores de densidad del aire, ρ , y velocidad, V . El valor del coeficiente de resistencia, C_D , se ha establecido en un valor de 0,027, valor que recibe los C_D de las aeronaves Cessna. El empuje, T , debe ser igual o mayor a la resistencia. Al pasar esta fuerza a gramos fuerza, se obtienen los valores de la Tabla 5.

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D \quad (8)$$

Modelo	Velocidad	Superficie alar	D (N)	T (G)
Falcon fixed-wing	20,83 m/s	0,21516 m ²	1,5124 N	154,17
Larus	20,83 m/s	1,07204 m ²	7,5354 N	768,1
Aguila	20,83 m/s	1,15952 m ²	8,1503 N	830,8

Tabla 5. Resistencia aerodinámica y empuje mínimo para los distintos modelos del dron

Observando la Tabla 6 se puede concluir que únicamente en el dron Falcon fixed-wing, el motor se puede alimentar con 11,1 V y una potencia mínima de 25,53 W.

Load Testing Data									
Ambient Temperature			I		Voltage			DC Power Supplier	
Item No.	Voltage (V)	Prop	Throttle	Current (A)	Power (W)	Thrust (G)	RPM	Efficiency (G/W)	Operating Temperature (°C)
MN3508 KV700	11.1	T-MOTOR 12*4CF	50%	2.3	25.53	280	3800	10.97	42
			65%	4.5	49.95	460	4900	9.21	
			75%	6.3	69.93	620	5300	8.87	
			85%	8.4	93.24	790	6000	8.47	
			100%	10.2	113.22	860	6400	7.60	
		T-MOTOR 13*4.4CF	50%	2.6	28.86	330	3600	11.43	44
			65%	5.2	57.72	560	4600	9.70	
			75%	7.4	82.14	720	5300	8.77	
			85%	9.8	108.78	880	5800	8.09	
			100%	12	133.20	1020	6200	7.66	
	14.8	T-MOTOR 11*3.7CF	50%	3.1	45.88	380	5300	8.28	41
			65%	5.6	82.88	630	6500	7.60	
			75%	7.9	116.92	780	7200	6.67	
			85%	10.5	155.40	960	8000	6.18	
			100%	12.7	187.96	1110	8500	5.91	
		T-MOTOR 12*4CF	50%	3.8	56.24	460	4700	8.18	48
65%			7.4	109.52	800	6300	7.30		
75%			10	148.00	1000	6900	6.76		
85%			13.5	199.80	1200	7500	6.01		
100%			16.1	238.28	1360	8100	5.71		

Notes: The test condition of temperature is motor surface temperature in 100% throttle while the motor run 10min.

Tabla 6. Propiedades del motor MN3508 KV700 de la marca T-MOTOR

El voltaje de las baterías depende del número de celdas que presenta. Cada celda presenta un voltaje nominal de 3,7 V, tanto en las baterías Li-Po como Li-ion. Así, el voltaje nominal de la batería se obtiene multiplicando el número de celdas por su voltaje nominal. A pesar de presentar el mismo voltaje nominal, las baterías Li-Po y Li-ion se diferencian en los valores de descarga (Tabla 7). El número de celdas se denomina ratio s. Teniendo en cuenta el valor de voltaje necesario, se necesita una batería de 3 o 4 celdas.

Battery	S ratio	Nominal Voltage	Fully Charged Voltage	Recommended Loaded Discharge Voltage	Recommended Resting Discharge Voltage	Fully Discharged Voltage
Li-Po	Ns	N*3,7	N*4,2	N*3,5	N*3,7	N*3,0
Li-ion	Ns	N*3,7	N*4,2	N*2,7	N*3,0	N*2,5

Tabla 7. Voltajes de las baterías Li-Po y Li-ion según el número de células

Lo que determina cuánto tiempo puede volar el dron es la capacidad de la batería. A mayor capacidad, más tiempo podrá volar el dron, pero la batería es más grande y pesa más. Por ello es que el peso de la serie AVES de drones es casi 3 veces más pesada que el Falcon.

Otra propiedad de la batería es el ratio C. La corriente máxima se determina con este ratio C mediante la Ecuación (9). De esta misma ecuación se puede obtener la corriente de carga, la cual se produce a 1C, en la Ecuación (10).

$$\text{Máxima corriente continua (A)} = \text{Ratio C} \cdot \text{Capacidad (mAH)} \quad (9)$$

$$\text{Corriente de carga (A)} = 1C \cdot \text{Capacidad (mAH)} \quad (10)$$

4.2. Alimentación de otros componentes

Como se ha visto en el apartado anterior, el motor del dron presenta un alto requerimiento energético comparado con los valores típicos de potencia obtenidos en aplicaciones de Energy Harvesting realizadas hasta hoy en día. Sin embargo, el dron presenta muchos otros componentes que requieren diferentes niveles de potencia. Para ello, un distribuidor de potencia se encarga de regular la tensión y la intensidad salientes de la batería y distribuir las a los distintos componentes ajustándolas a los valores que requiere cada uno de ellos. Es decir, a pesar de que el motor requiera en torno a 12 V, otros componentes no pueden ser alimentados con esta tensión ya que se sobrecargarían y se dañarían.

Uno de estos componentes es el controlador. Este se trata de un sistema electrónico encargado de recibir la información de los sensores y del transmisor y procesarla para controlar el vuelo. Existen varios controladores con diferentes tensiones de alimentación, sin embargo, la más común es 5 V. También se encuentran otros de 3,3 V, 2,8 V o incluso 1,8 V [43], aunque el más común y utilizado es el de 5 V.

Otro componente de menor consumo es la cámara FPV (*First Person View*). Esta cámara tiene un tiempo de respuesta al vídeo instantáneo y con tienen un retraso en la imagen (*delay*). Estas cámaras son pequeñas y ligeras y con vista gran angular [44]. El voltaje de entrada, al igual que en el caso del controlador, gira en torno a los 5 V.

5. Diseño y simulación de la antena

En el presente apartado se va a hacer uso de diversas tipologías de antenas y se va a realizar un diseño para una banda de frecuencia de $2,4\text{ GHz}$. Para ello, se ha hecho uso del programa Antenna Magus. El primer paso del procedimiento de diseño ha sido establecer los objetivos de diseño dentro del programa. Este objetivo era fundamentalmente obtener una frecuencia central, $f_0 = 2,4\text{ GHz}$. Una vez definido el objetivo de diseño y ejecutado, el programa lanza un dimensionamiento preliminar. Esta antena de partida es simulada mediante el comando *Estimate performance* para obtener cuál es el comportamiento de esta. A partir de los resultados obtenidos, se hace una corrección modificando ciertos parámetros de la antena para optimizar su comportamiento. Las tipologías analizadas se han clasificado en antenas con polarización lineal y circular, estableciendo sus ventajas y desventajas para la aplicación concreta de estudio.

5.1. Antenas con polarización lineal

La polarización de una antena viene definida por la dirección en que oscila el vector de campo eléctrico proyectada en un plano perpendicular a la dirección de propagación. Es importante que la polarización de la antena receptora concuerde con la de la señal recibida ya que en caso contrario el nivel de la señal recibida disminuye considerablemente [45].

En el caso de la polarización lineal, la proyección del vector de campo eléctrico es una línea recta. Tal como se muestra en la Figura 16, según la posición de esta línea recta se diferencia entre polarización vertical, horizontal e inclinada.

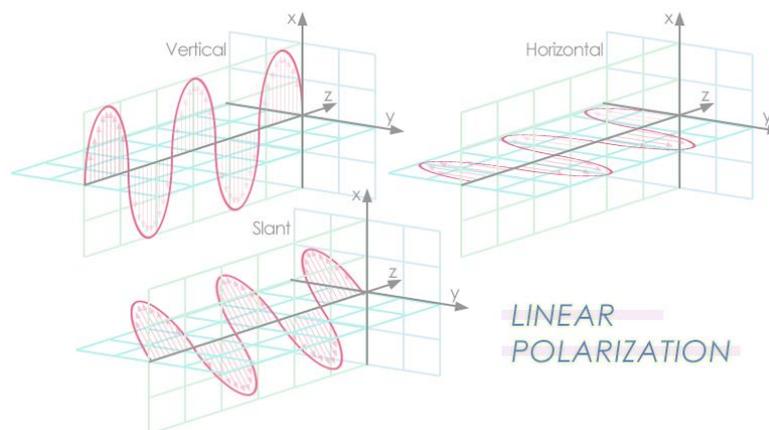


Figura 16. Tipos de polarización lineal [46]

Las tipologías de polarización lineal analizadas son variantes del monopolo, el cual tiene un diagrama de radiación omnidireccional, el cual se había concluido que era de interés para el objetivo de estudio.

5.1.1. *Inverted F* (IFA)

La antena en F invertida (IFA) es una evolución del clásico monopolo que consiste en un conductor de longitud $\lambda/4$ en vertical sobre un plano de masa. Si este se dobla de forma paralela al plano de masa se tiene la antena en L invertida, pero presenta como desventaja tener una impedancia muy baja. Para compensar esto, el punto de alimentación se conecta a un punto intermedio de la antena en L generando así la forma de F invertida Figura 17. De este modo, la impedancia se puede controlar con la distancia entre el punto de alimentación y el punto conectado a masa (S) [47].

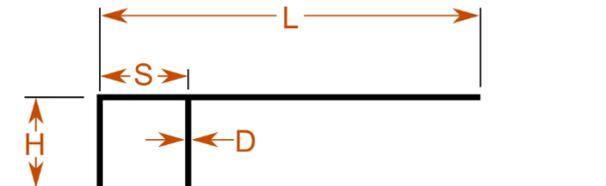
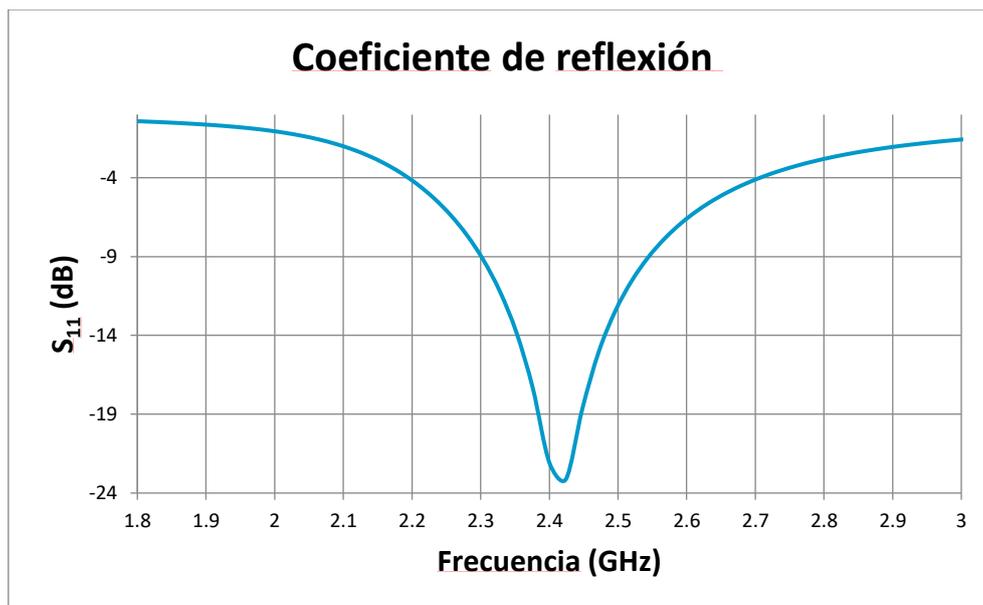


Figura 17. Vista de perfil de una antena IFA

El diseño de partida obtenido por el programa Antenna Magus presenta los parámetros de la Tabla 8. Al simularlo se obtiene la Gráfica 1 con el coeficiente de reflexión y se observa que la antena no está completamente centrada en 2,4 GHz, sino que la frecuencia de resonancia es un poco mayor.

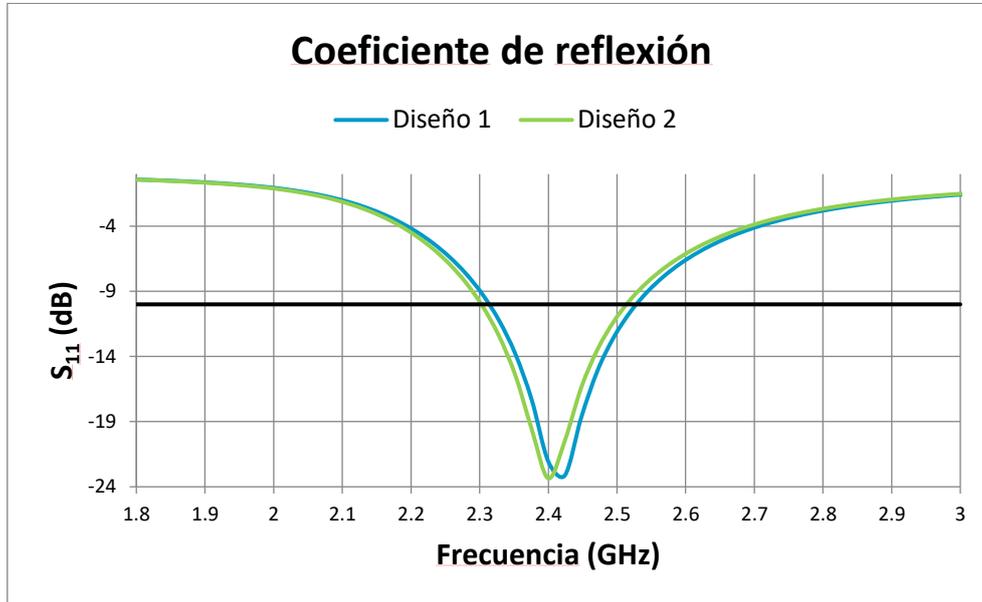
Nombre	Descripción	Valor
L	Elemento de longitud	24,4 mm
H	Elemento de altura	11,25 mm
S	Espaciado de la alimentación	3,25 mm
D	Diámetro de la alimentación	1,25 mm

Tabla 8. Parámetros del primer diseño de la antena IFA



Gráfica 1. Coeficiente de reflexión del primer diseño de la antena IFA

Siguiendo las pautas de diseño, para disminuir la frecuencia de resonancia se debe incrementar la longitud de la antena. Para ello, se modifica manualmente el parámetro L , es decir, el elemento de longitud, a un valor de $24,7 \text{ mm}$. Tras este cambio se vuelve a simular y se obtiene la Gráfica 2. El resto de los valores obtenidos tras la simulación quedan reunidos en la Tabla 9.

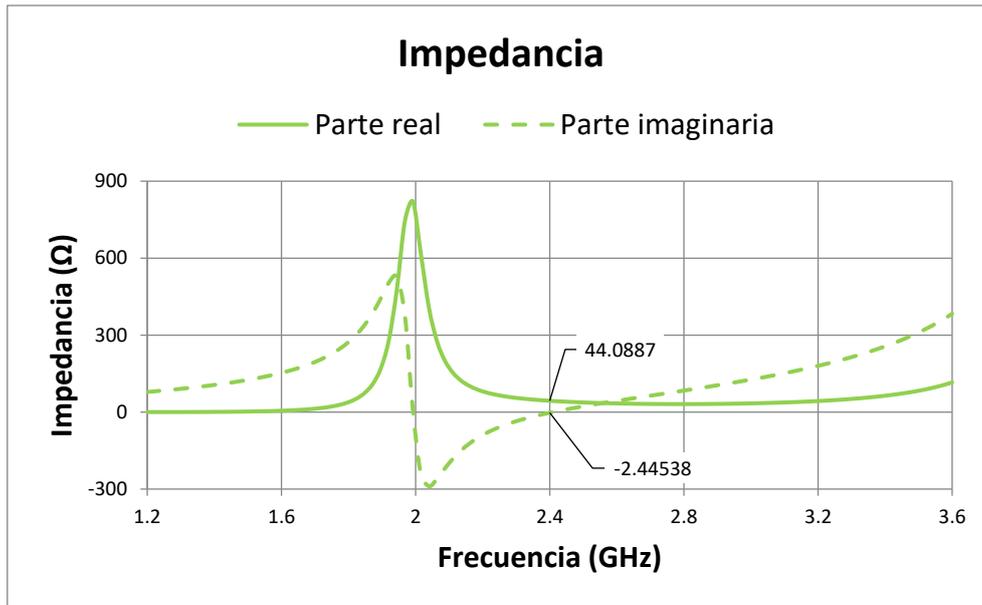


Gráfica 2. Coeficiente de reflexión para el diseño preliminar y el optimizado de la antena IFA

	Diseño 1	Diseño 2
Mínimo valor del parámetro S_{11}	$-23,13 \text{ dB}$	$-23,35 \text{ dB}$
Frecuencia en el punto de mínimo S_{11}	$2,424 \text{ GHz}$	$2,4 \text{ GHz}$
Ancho de banda (debajo de -10 dB)	$215,3 \text{ MHz}$	$212,0 \text{ MHz}$
Ancho de banda (en %)	$8,893 \%$	$8,802 \%$

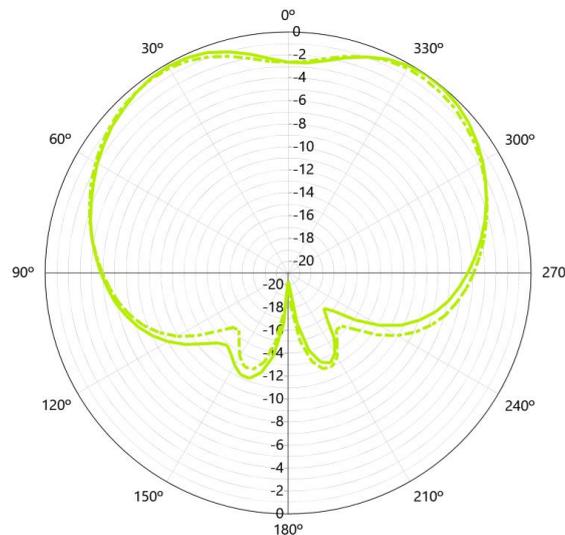
Tabla 9. Valores de simulación obtenidos para el diseño preliminar y optimizado de la antena IFA

Observando en la Gráfica 3 la impedancia de la antena optimizada respecto la frecuencia, se comprueba que esta se encuentra centrada para $2,4 \text{ GHz}$, ya que, en este punto, la parte imaginaria se anula, siendo casi 0, y la parte real es $44,09 \Omega$, muy próxima a 50Ω que es la impedancia de referencia.



Gráfica 3. Impedancia del diseño optimizado de la antena IFA

Finalmente, en la Gráfica 4 se observa el diagrama de radiación de la antena IFA en el plano vertical. Puesto que se trata de un monopolo con un plano de masa se puede ver que la radiación se encuentra desplazada hacia arriba. Sin embargo, en el plano horizontal, radia omnidireccionalmente, teniendo una muy buena recepción de todo su entorno.



Gráfica 4. Diagrama de radiación de la antena IFA con ganancia normalizada

5.1.2. Vertical trapezoidal monopole

Las operaciones multibanda en los sistemas de comunicaciones modernos han aumentado la demanda de antenas de banda ancha capaces de cubrir diversas frecuencias. Los monopolos y dipolos planos cumplen esta característica con un amplio ancho de banda. Sin embargo, aunque este tipo de antena presenta un perfil voluminoso sobre el plano de masa, muchas veces se imprimen directamente en un circuito integrado,

haciéndola más apta para ciertas aplicaciones [48]. Existen varias modalidades de elementos planos, como la elíptica, trapezoidal, rectangular con base elíptica, etc.

El elevado ancho de banda del monopolo vertical trapezoidal se debe a la base más estrechada, tal como se muestra en la Figura 18, que asegura una transición suave de la impedancia. La longitud de la antena determina la mínima frecuencia de operación. La máxima frecuencia de operación viene determinada por el ancho de la base y su distancia al plano de masa. La impedancia depende de la inclinación de los lados y el tamaño del plano de masa [49].

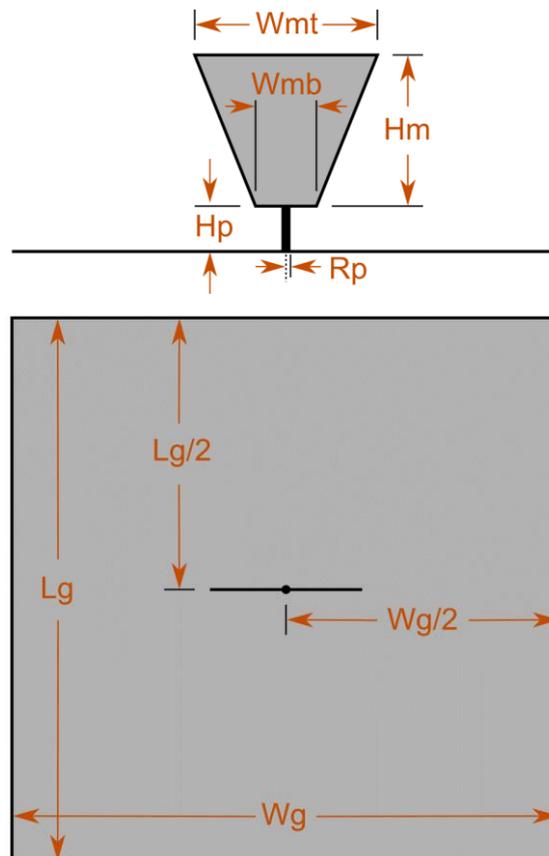
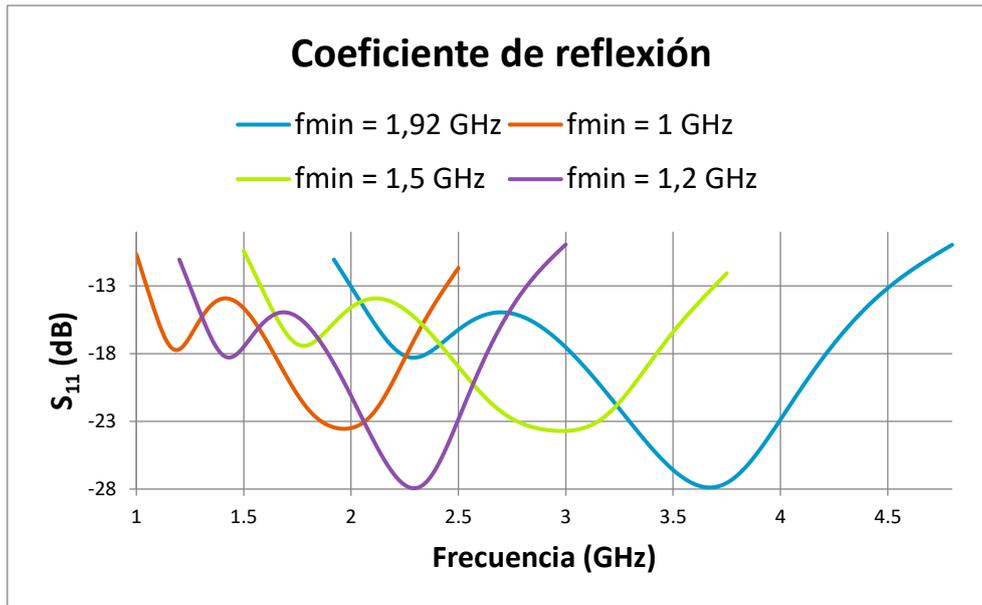


Figura 18. Vistas de alzado y planta del monopolo vertical trapezoidal

Para el diseño de la antena en el software de Antenna Magus se solicita en lugar de la frecuencia de resonancia, la frecuencia mínima. Por ello, se establecen varios diseños con distintas frecuencias mínimas y se analiza la gráfica del coeficiente de reflexión (Gráfica 5) para ver donde se encontrarían las frecuencias de resonancia y si la principal es suficientemente cercana a $2,4\text{ GHz}$. Además de la gráfica, en la Tabla 10 se recogen los datos de valor mínimo de S_{11} , frecuencia de resonancia principal y ancho de banda. Se observa que el ancho de banda en porcentaje se mantiene bastante constante, por lo que al disminuir la frecuencia mínima también disminuye el ancho de banda absoluto. El diseño que más se acerca a $2,4\text{ GHz}$ es el último realizado, sin embargo, su frecuencia para el valor mínimo de S_{11} es $2,292\text{ GHz}$. Esto significa que se debe hacer una leve modificación en las dimensiones de la antena para ajustar la frecuencia. Estas modificaciones se hacen partiendo del diseño cuya frecuencia mínima es $1,2\text{ GHz}$.



Gráfica 5. Coeficiente de reflexión del monopolo vertical trapezoidal para distintas frecuencias mínimas

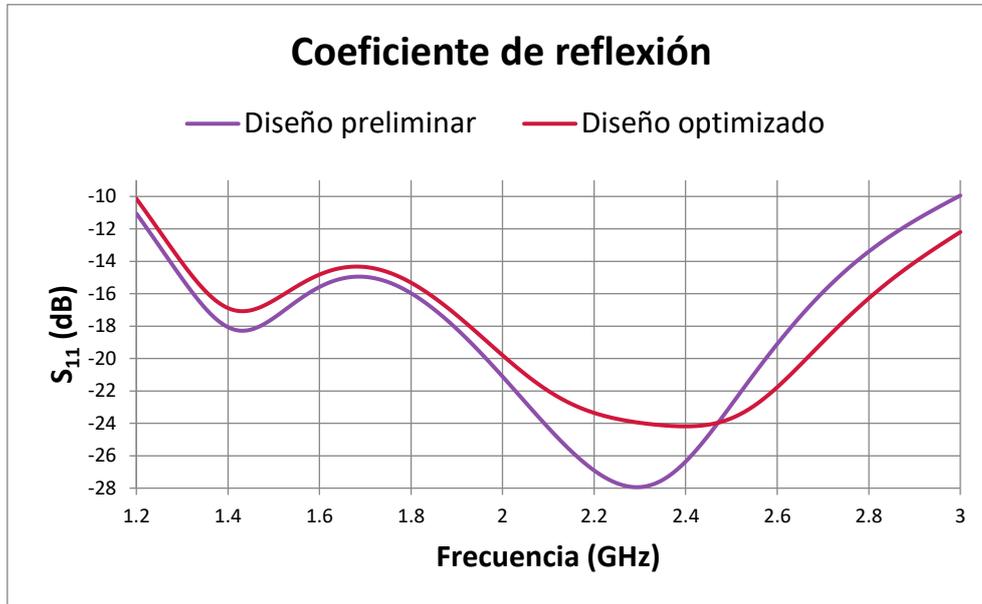
f_{min}	1,92 GHz	1 GHz	1,5 GHz	1,2 GHz
Mínimo valor del parámetro S_{11}	-27,88 dB	-23,55 dB	-23,71 dB	-27,94 dB
Frecuencia en el punto de mínimo S_{11}	3,667 GHz	1,965 GHz	2,985 GHz	2,292 GHz
Ancho de banda (debajo de -10 dB)	2,876 GHz	1,5 GHz	2,25 GHz	1,796 GHz
Ancho de banda (en %)	85,65 %	85,71 %	85,71 %	85,61 %

Tabla 10. Valores de simulación obtenidos para los primeros diseños del monopolo vertical trapezoidal

Para aumentar la frecuencia, se debe disminuir las dimensiones de la antena. Las dimensiones modificadas fueron la altura del monopolo (H_m) y el ancho de las bases inferior (W_{mb}) y superior (W_{mt}). Estas modificaciones se encuentran en la Tabla 11. Tras esto, se obtiene la Gráfica 6 en la que se puede observar como la frecuencia se ha ajustado a 2,4 GHz. Aunque el valor mínimo del S_{11} ha aumentado, continúa siendo un valor considerablemente bueno para tener una buena recepción de señal.

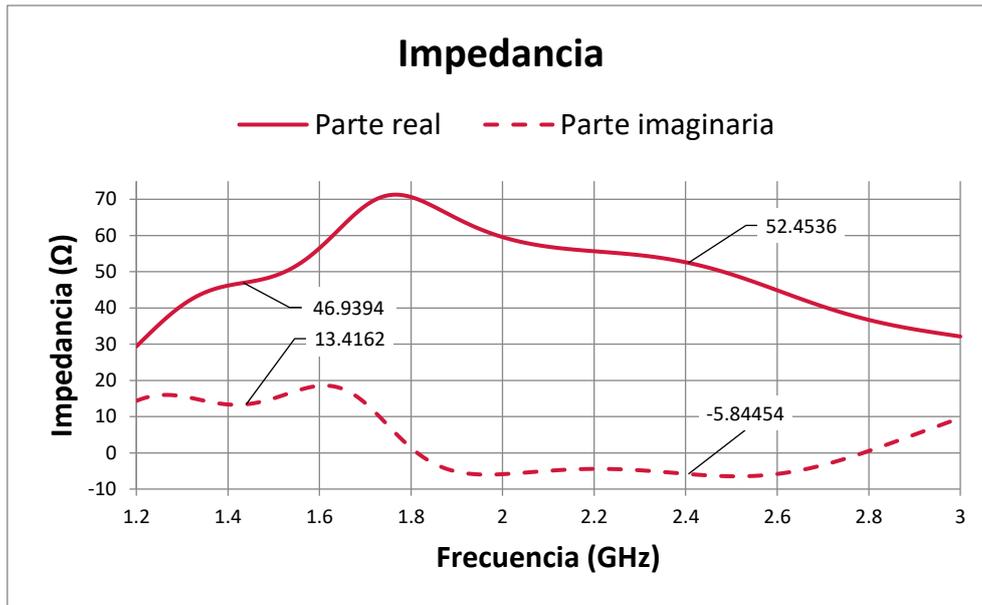
Dimensión	Diseño preliminar	Diseño optimizado
Hm	48 mm	46 mm
Wmt	48 mm	46 mm
Wmb	40 mm	38 mm

Tabla 11. Modificación en las dimensiones del diseño preliminar y optimizado del monopolo vertical trapezoidal



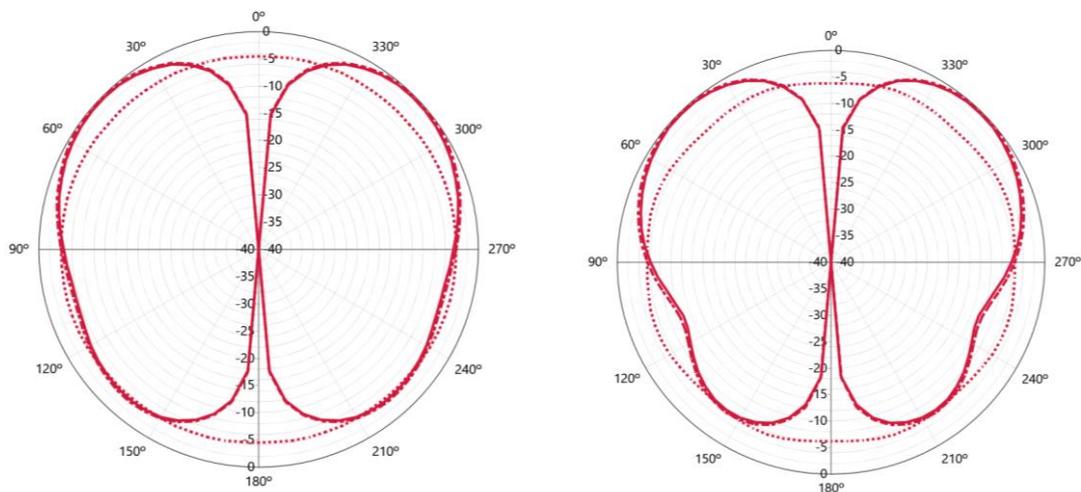
Gráfica 6. Coeficiente de reflexión del diseño preliminar y optimizado del monopolo vertical trapezoidal

Además, a simple vista se puede ver como las gráficas del coeficiente de reflexión presentan más de un pico, es decir, más de una frecuencia de resonancia. Esto se puede justificar con la gráfica de impedancia (Gráfica 7). En este caso el comportamiento es ligeramente distinto al caso de la antena IFA, ya que la frecuencia de resonancia no se da exactamente en los puntos donde la parte imaginaria se anula. Se obtienen los valores de parte real e imaginaria de la impedancia para 1,44 GHz y 2,4 GHz, que son las frecuencias con menor valor de S_{11} . A partir de ellas, se obtiene el módulo de la impedancia en valor absoluto, siendo 48,819 Ω y 52,7782 Ω respectivamente. Ambos valores son muy cercanos a 50 Ω , pero en el primer caso, para 1,44 GHz la parte imaginaria es mayor que en el segundo caso, y es por ello por lo que el mínimo valor de S_{11} es mayor y se refleja más señal.



Gráfica 7. Impedancia del diseño optimizado del monopolo vertical trapezoidal

Para esta tipología de antena se observa una leve diferencia entre el diagrama de radiación para la f_{\min} y la f_0 (Gráfica 8). Para el caso de la f_0 se estrecha más el diagrama de radiación a la parte inferior, es decir, se hace más evidente el efecto del plano de masa. Sin embargo, en ambos casos, para el plano horizontal, al tratarse de un monopolo, se observa una radiación omnidireccional (línea de puntos).



Gráfica 8. Diagrama de radiación del monopolo vertical trapezoidal para $f_{\min} = 1,2$ GHz (izquierda) y para $f_0 = 2,4$ GHz (derecha) con ganancia normalizada

5.1.3. Elliptical base-strip monopole

Esta tipología de antena, al igual que el monopolo vertical trapezoidal, es un monopolo plano que presenta un elevado ancho de banda, adaptado para las operaciones multibanda.

Este tipo de antena parte del monopolo plano cuadrado alimentado desde el punto medio de uno de sus lados. Sin embargo, esta configuración no proporciona un ancho de banda elevado. Este ancho de banda se incrementa desplazando el punto de alimentación ligeramente hacia uno de sus lados. Un mayor incremento se obtiene sustituyendo la mitad inferior del cuadrado por un semicírculo [50]. En la Figura 19 se puede observar la forma del monopolo de perfil. El mejor comportamiento se da cuando H_m y W_m son iguales, y H_e es la mitad de W_m , para así ser un semicírculo perfecto.

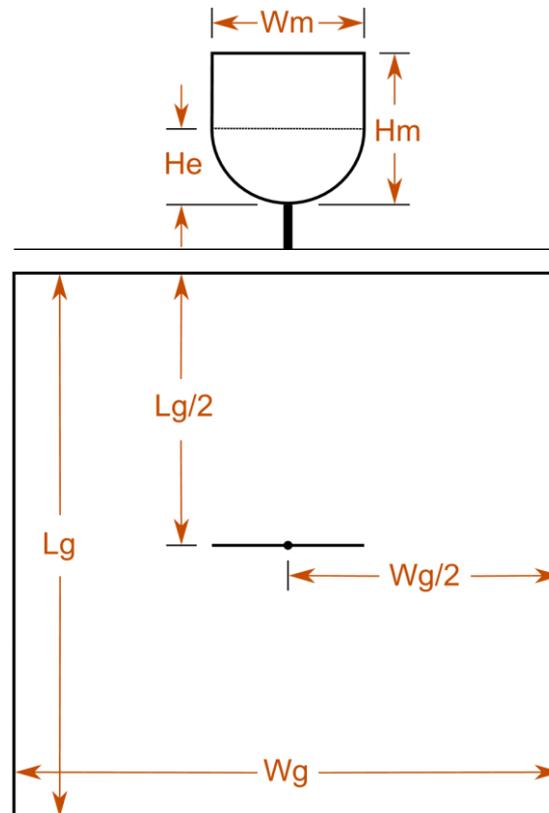


Figura 19. Vistas de alzado y de planta de un monopolo plano con base semicircular

En los objetivos de diseño solicitados por el software se encuentran la f_{min} , la cual se ha establecido en un primer diseño en $2,16 GHz$, y la impedancia, R_{in} establecida a 50Ω . Una vez establecidos los objetivos, se obtiene el primer diseño, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 12. En la Figura 20 se puede observar de forma ampliada como la alimentación puede estar levemente desplazada respecto al centro, sin embargo, tal como se muestra en la Tabla 12 se va a trabajar con una alimentación centrada, y por ello el valor de la dimensión S_f es 0.

Nombre	Descripción	Valor
Hm	Altura del monopolo	29,32 mm
Wm	Ancho del monopolo	29,32 mm
Hp	Altura del pin de alimentación	651,6 μ m
Rp	Radio del pin de alimentación	391,0 μ m
Wg	Ancho del plano de masa	117,3 mm
Lg	Longitud del plano de masa	117,3 mm
Sf	Desplazamiento de la alimentación	0 m
He	Altura de la sección circular	14,66 mm

Tabla 12. Parámetros del primer diseño del monopolo plano con base semicircular

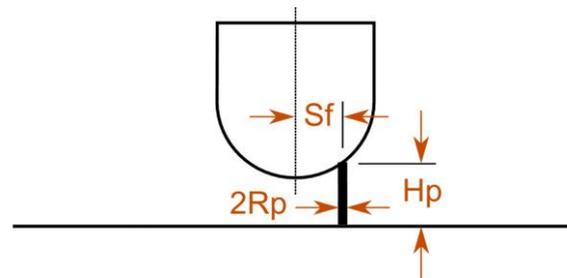
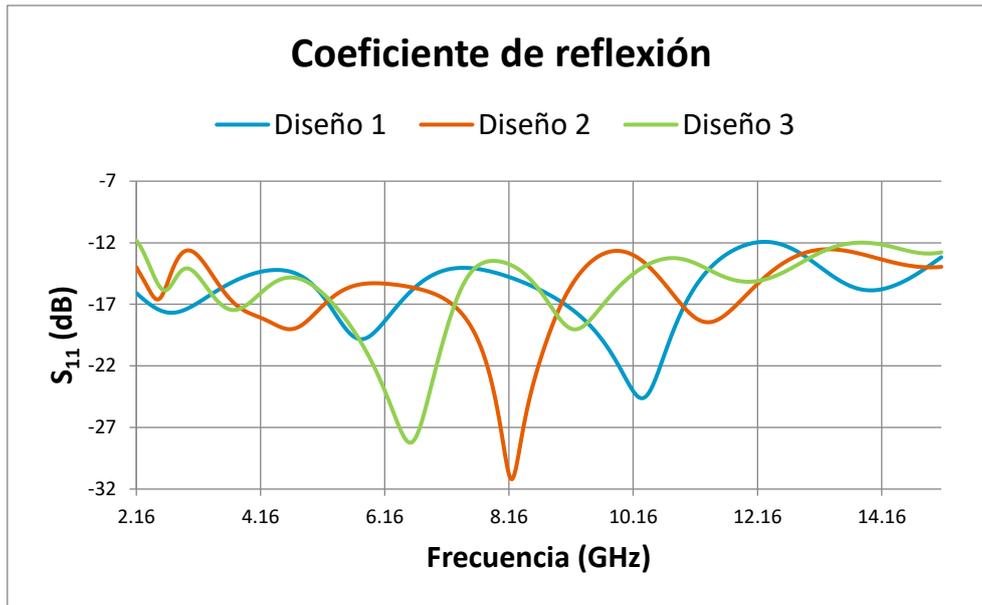


Figura 20. Ampliación de la vista de alzado del monopolo plano con base semicircular

Al simular el primer diseño, se obtiene una frecuencia de resonancia de 10,28 GHz, mucho más elevada que la deseada de 2,4 GHz. Por ello, para disminuir la frecuencia se debe aumentar las dimensiones de la antena, manteniendo siempre las relaciones de proporción mencionadas anteriormente. Estas variaciones quedan plasmadas en la Tabla 13. Tras obtener los dos nuevos diseños, denominados como Diseño 2 y Diseño 3 se simulan y se obtiene la Gráfica 9. En esta se puede observar que, pese a que la frecuencia de resonancia disminuye, lo hace levemente, sin llegar a la frecuencia deseada de 2,4 GHz.

Dimensión	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
Hm	29,32 mm	36 mm	44 mm
Wm	29,32 mm	36 mm	44 mm
He	14,66 mm	18 mm	22 mm

Tabla 13. Variación de parámetros en los diseños del monopolo plano con base semicircular

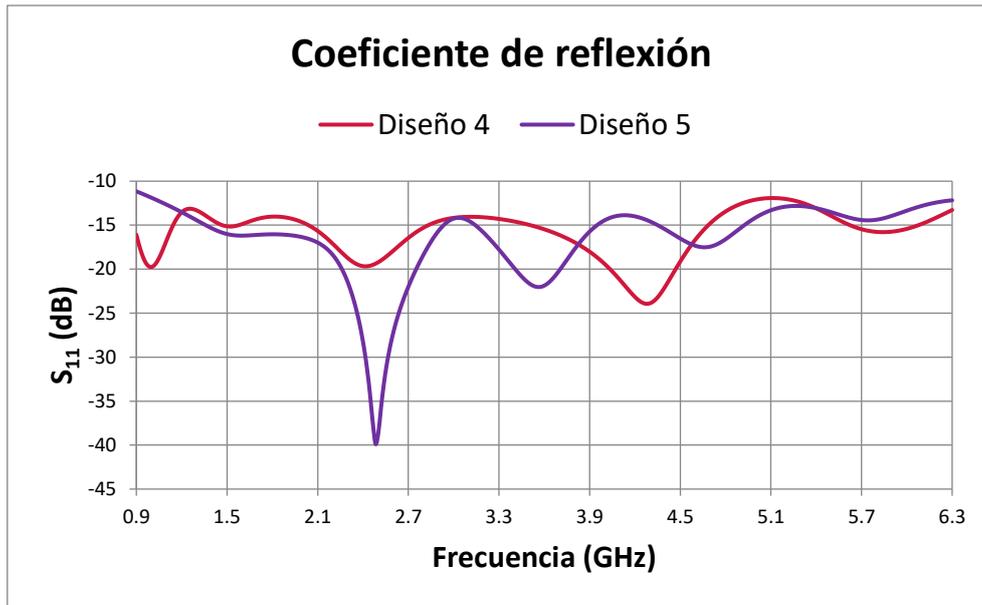


Gráfica 9. Coeficiente de reflexión de los 3 primeros diseños del monopolo plano con base semicircular

Puesto que el ancho de banda es tan elevado (en torno a los 12 GHz), se opta por empezar de nuevo pero esta vez cambiando en los objetivos de diseño la $f_{mín}$, tal como se ha hecho en el caso del monopolo vertical trapezoidal, a un valor de 900 MHz. Tras este cambio el primer diseño obtenido (Diseño 4) presenta f_0 en 4,284 GHz, por tanto, de nuevo se debe aumentar las dimensiones del monopolo para así disminuir la frecuencia de resonancia. Tras sucesivos cambios, finalmente se obtiene el diseño final (Diseño 5) con f_0 en 2,48 GHz, muy cercano a 2,4 GHz (Gráfica 10). Como se puede ver en la Tabla 14, no se ha cumplido la igualdad entre H_m y W_m para el Diseño 5. Esto se debe a que la dimensión H_e estaba limitada a 56 mm y se ha priorizado mantener la base completamente semicircular.

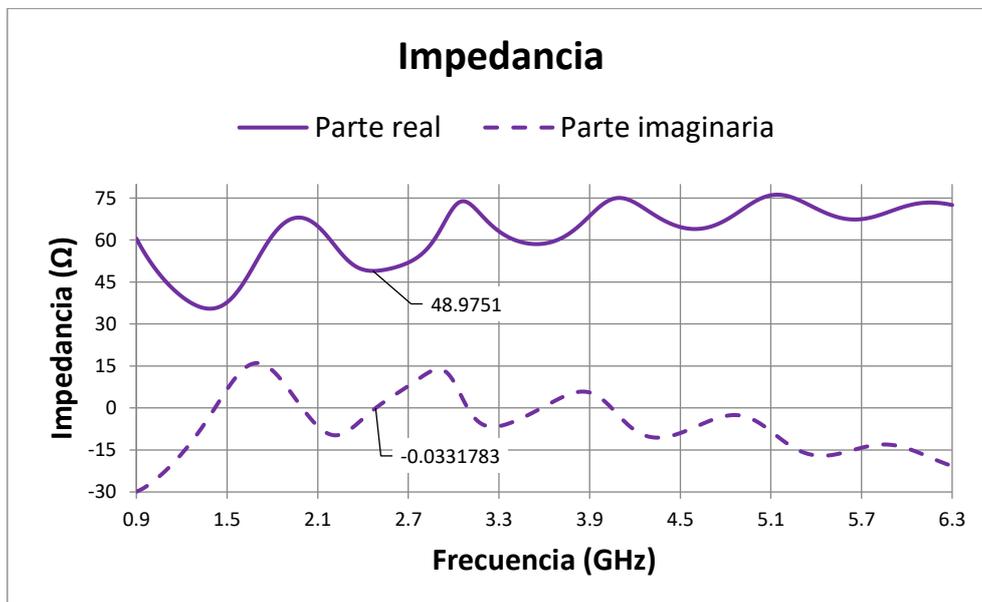
Dimensión	Diseño 4	Diseño 5
H_m	70,37 mm	115 mm
W_m	70,37 mm	112 mm
H_p	1,564 mm	1,564 mm
R_p	938,3 μm	938,3 μm
W_g	281,5 mm	281,5 mm
L_g	281,5 mm	281,5 mm
S_f	0 m	0 m
H_e	35,19 mm	56 mm

Tabla 14. Parámetros de los últimos dos diseños del monopolo con base semicircular



Gráfica 10. Coeficiente de reflexión para los últimos 2 diseños del monopolo con base semicircular

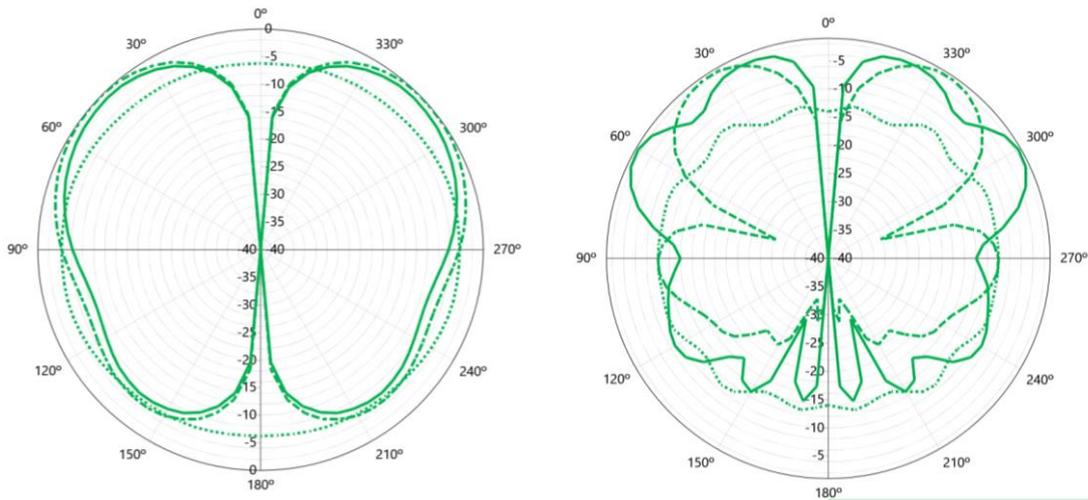
Al analizar la Gráfica 11 de la impedancia, se observan diversos puntos en los que la parte imaginaria se anula, pero solo en uno de ellos la parte real es realmente cercana a 50Ω . Esta es la razón por la que se observan diversos picos en la gráfica del coeficiente de reflexión, pero únicamente uno de ellos presenta un valor realmente bajo.



Gráfica 11. Impedancia del diseño final del monopolo con base semicircular

De forma similar a lo ocurrido con el monopolo vertical trapezoidal, se tiene diagramas de radiación distintos para la f_{min} y la f_0 (). A la izquierda se encuentra el caso de la f_{min} . Esta es muy similar al monopolo vertical trapezoidal, con un pequeño estrechamiento en la parte inferior para el caso del plano vertical y radiación omnidireccional para el caso del plano horizontal. Sin embargo, para el caso de la f_0 en la derecha, el diagrama es más irregular, presentando diversos nulos. Para el plano

horizontal la radiación sigue siendo omnidireccional, pero con ganancia menor respecto otros puntos del plano vertical.



Gráfica 12. Diagrama de radiación del monopolo de base elíptica para la $f_{\min} = 900$ MHz (izquierda) y para $f_0 = 2,4$ GHz (derecha) con ganancia normalizada

5.2. Antenas con polarización circular

Para el caso de la polarización circular, el vector de campo eléctrico mantiene en todo momento la misma longitud, pero presenta una rotación proyectándose como un círculo en el plano perpendicular a la dirección de propagación. La rotación puede tener dos direcciones posibles; si los campos giran en un sentido de la mano derecha con respecto a la dirección del desplazamiento de la onda, se denomina polarización circular derecha, mientras que, si los campos giran en un sentido de la mano izquierda, se denomina polarización circular izquierda [51]. Ambos tipos de polarizaciones se muestran en la Figura 21.

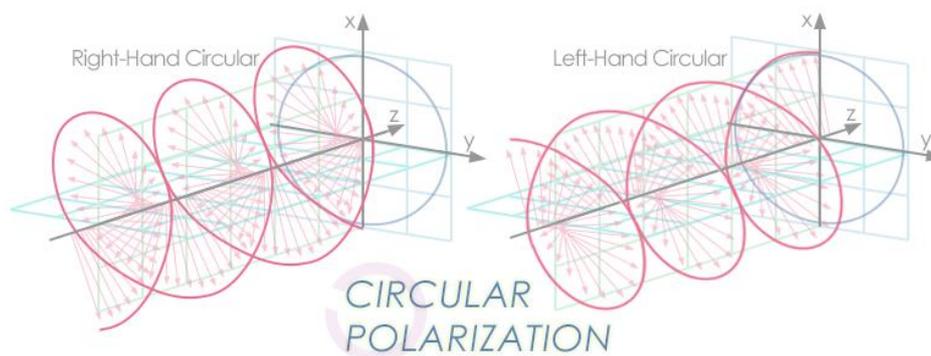


Figura 21. Tipos de polarización circular [46]

Este tipo de antenas resulta más conveniente, ya que al presentar polarización circular puede captar señal de una antena con otros tipos de polarizaciones con pocas pérdidas.

Muchos sistemas de comunicación punto a punto por satélite o terrestres usan polarización circular, y esta resulta favorable ya que no es necesario alinear las antenas para alinear su polarización, como sería el caso de las antenas de polarización lineal [52].

5.2.1. Antena *Skew Planar Wheel*

La antena *Skew Planar Wheel* pertenece al grupo de las denominadas antenas *Wheel*. Estas son aquellas formadas por diversos lazos rotados en torno al punto de alimentación. Una de las primeras antenas con este diseño fue la *Big Wheel*, formada por tres lazos orientados de forma completamente paralela al horizonte (Figura 22). Es por ello por lo que esta antena es omnidireccional con polarización horizontal. Para obtener la polarización circular, cada uno de los lazos se inclina en torno a 45° .



Figura 22. *Big Wheel* antena [53]

Existen diversas variantes de antenas *Wheel* según el número de lazos que presenta. Este puede variar entre 2 y 6 pero las más comunes son las formadas por 3 lazos, denominada *Clover leaf*, y por 4 lazos, que es la *Skew Planar Wheel*. Para la simulación se va a trabajar con esta última, cuya vista isométrica se observa en la Figura 23. Cada uno de los lazos o elementos de la antena mide una longitud de onda (Figura 24). La parte más externa y curvada mide media longitud de onda (L_a), mientras que las partes rectas que la unen con el punto de alimentación en el centro miden respectivamente un cuarto de longitud de onda (L_b) [53].

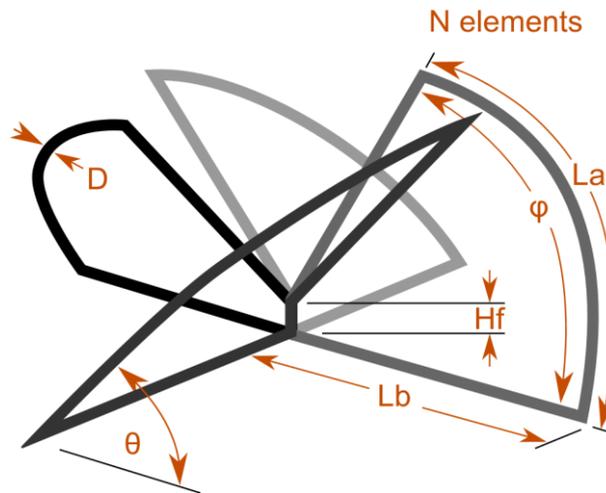


Figura 23. Vista isométrica de la antena Skew Planar Wheel

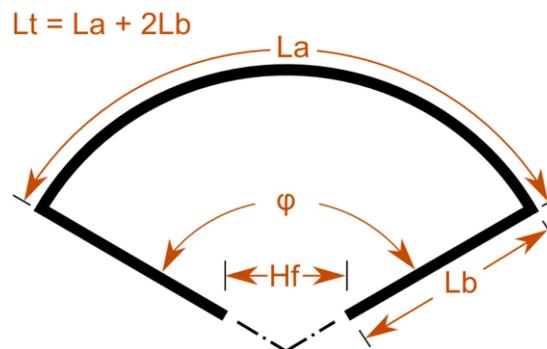
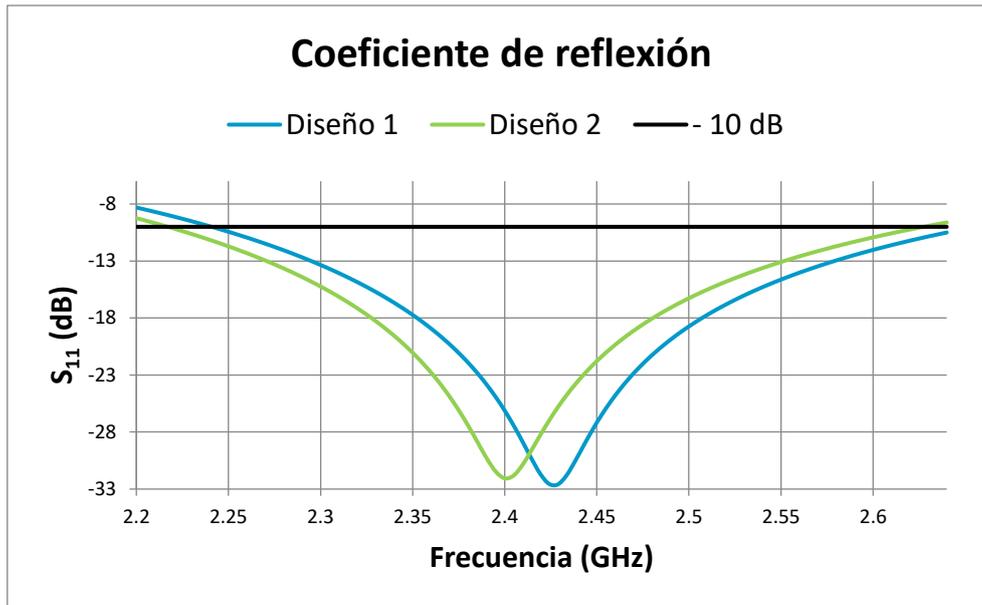


Figura 24. Vista detallada de un elemento de la antena

Para el primer diseño se establece en los objetivos una f_0 de 2,4 GHz. Además, es necesario escoger el tipo de polarización ya que determinará la orientación de la antena, y se escoge derecha (RHC, *Right-hand Circular*), y el número de hélices, que es 4. El primer diseño, obtenido por el software presenta los parámetros de la Tabla 15. Al simularlo, se obtiene una f_0 de 2,429 GHz. Esta frecuencia es mayor que la deseada, por tanto, para disminuirla, se debe aumentar las dimensiones de la antena. Inicialmente se opta por aumentar la longitud del elemento base, L_b , a 28,8 mm. Con el cambio se consigue centrar f_0 a 2,4 GHz y esto se puede observar en la Gráfica 13 donde se encuentra el coeficiente de reflexión de los dos diseños.

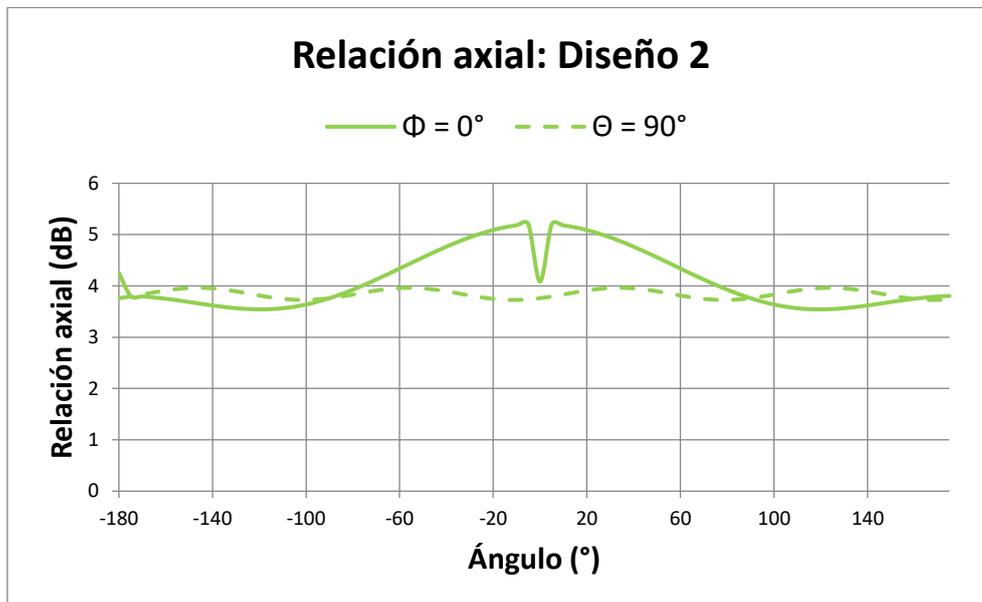
Nombre	Descripción	Valor
Hf	Altura de la alimentación	6,249 mm
Lb	Longitud del element base	28,43 mm
φ	Ángulo del arco del elemento	95 °
θ	Ángulo de inclinación	45 °
D	Diámetro del alambre	999,3 μm
N	Número de elementos	4

Tabla 15. Dimensiones del diseño 1 de la antena Skew Planar Wheel



Gráfica 13. Coeficiente de reflexión de los diseños 1 y 2 de la antena Skew Planar Wheel

Al tratarse de una antena de polarización circular, otro factor importante a tener en cuenta es la relación axial. Para garantizar que la componente vertical y horizontal de la polarización son similares, la relación axial se debe encontrar por debajo de los 3 dB. Para ello, se analiza la Gráfica 14 y se comprueba que esto no se cumple.

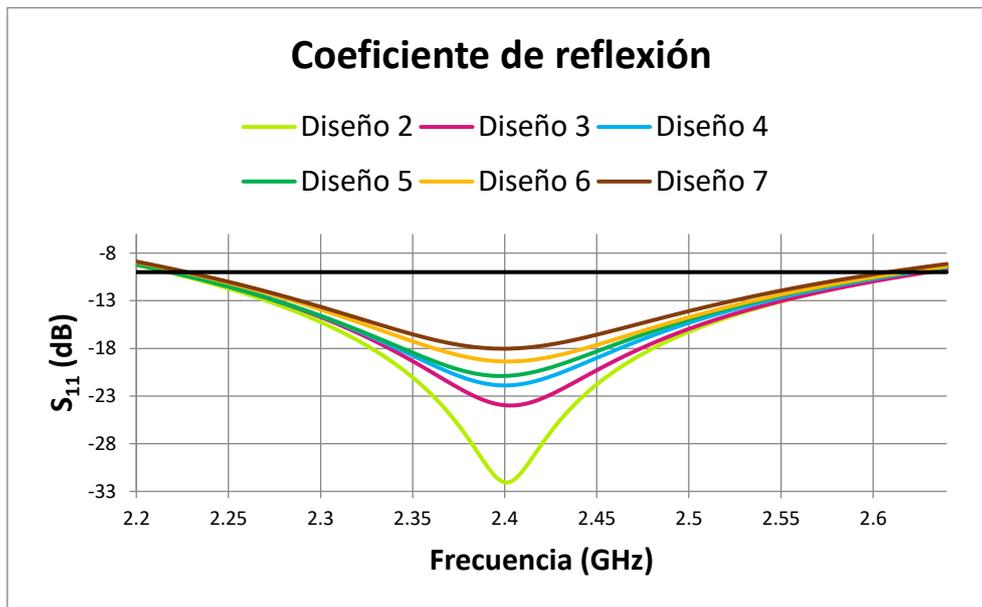


Gráfica 14. Relación axial del diseño 2 de la antena Skew Planar Wheel

Para mejorar esto, se debe disminuir el ángulo θ , ϕ o la dimensión L_b . Sin embargo, la modificación de estos parámetros afecta al coeficiente de reflexión y la frecuencia de resonancia, por lo que se deberán modificar siempre manteniendo el equilibrio. Tras sucesivas modificaciones, se obtienen los resultados de la Tabla 16 y se concluye que para mejorar la relación axial se empeora el coeficiente de reflexión (Gráfica 15). No obstante, para el último diseño, el coeficiente de reflexión en f_0 es $-18,03 \text{ dB}$, el cuál sigue siendo un buen valor.

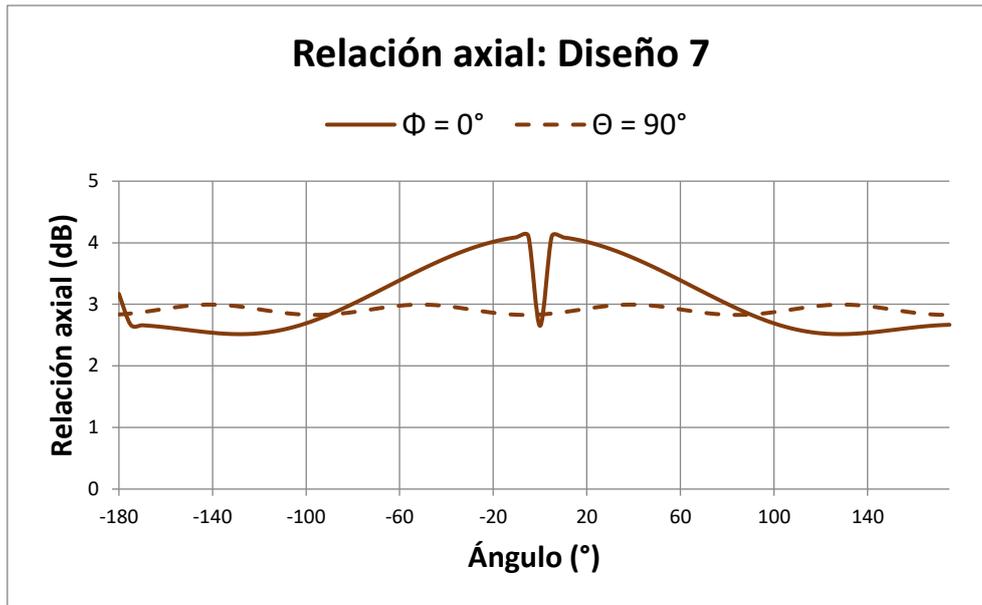
Diseño	Lb (mm)	ϕ	θ	Máx relación axial (dB)	Mín S_{11} (dB)
2	28,8	95°	45°	3,962	-32,05
3	28,8	92°	41°	3,457	-23,98
4	28,7	92°	40°	3,340	-21,98
5	28,8	91°	39°	3,230	-20,89
6	28,6	91°	38°	3,102	-19,37
7	28,5	91°	37°	2,995	-18,03

Tabla 16. Parámetros, relación axial y valor mínimo de S_{11} para los diseños 2 a 7 de la antena Skew Planar Wheel



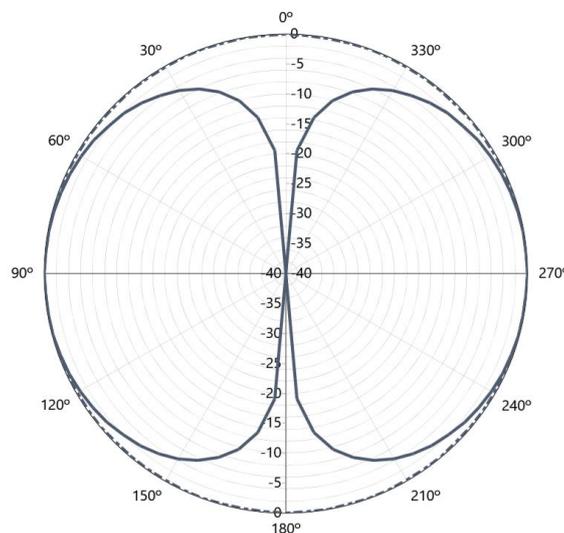
Gráfica 15. Coeficiente de reflexión para los diseños 2 a 7 de la antena Skew Planar Wheel

Finalmente, para comprobar que se ha obtenido el comportamiento deseado con el último diseño se obtiene la Gráfica 16 con la relación axial para este caso. La línea continua hace referencia al plano vertical, mientras que la discontinua, al plano horizontal. Si bien es cierto que la línea continua presenta valores por encima de 3 dB, la discontinua, que es donde presenta radiación omnidireccional, se encuentra siempre por debajo.



Gráfica 16. Relación axial del diseño final de la antena Skew Planar Wheel

Finalmente se analiza el diagrama de radiación de esta tipología de antena. Este se puede observar en la Gráfica 17 con ganancia normalizada. La antena Skew Planar Wheel presenta un diagrama de radiación típico de una antena omnidireccional. En línea discontinua tenemos el plano horizontal, en el que se encuentra una radiación homogénea en 360° y con la máxima ganancia. Al analizar el plano vertical, en línea continua se observa un ancho de banda elevado, presentando únicamente un nulo en la vertical.



Gráfica 17. Diagrama de radiación de la Skew Planar Wheel con ganancia normalizada

5.2.2. Axial-mode wire helix antenna

Las dos últimas antenas analizadas son denominadas antenas no resonantes. En este tipo de antenas el voltaje y la corriente son ondas que viajan en la misma dirección. Presentan una naturaleza no periódica. También son llamadas antenas de ondas

unidireccionales. Como las ondas se mueven en una única dirección sólo hay una onda incidente y no tiene onda reflejada. Además, no hay frecuencia de resonancia, por tanto, en lugar de trabajar con f_0 se trabaja con la frecuencia de óptima relación axial. De todas maneras, esta frecuencia depende de las dimensiones de la antena de igual manera que la frecuencia de resonancia, es decir, aumenta cuando las dimensiones de la antena disminuyen y viceversa [54].

La estructura de esta antena está definida con un conductor que da vueltas en forma de hélice (Figura 25), manteniendo de forma constante el diámetro (D_h) y el ángulo de inclinación (ϕ). El número de vueltas de la hélice (N) determinará el valor de la directividad y la ganancia, las cuales serán mayores cuando se aumente N .

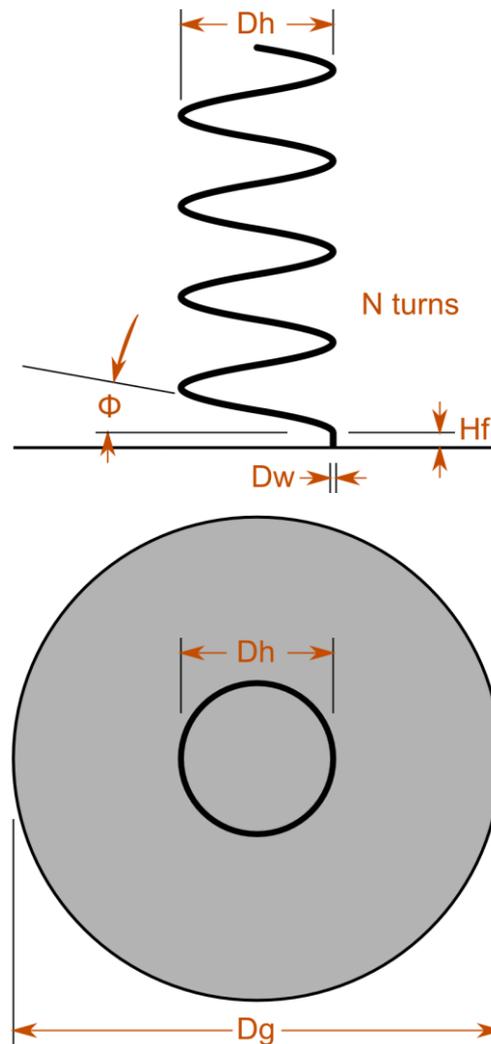


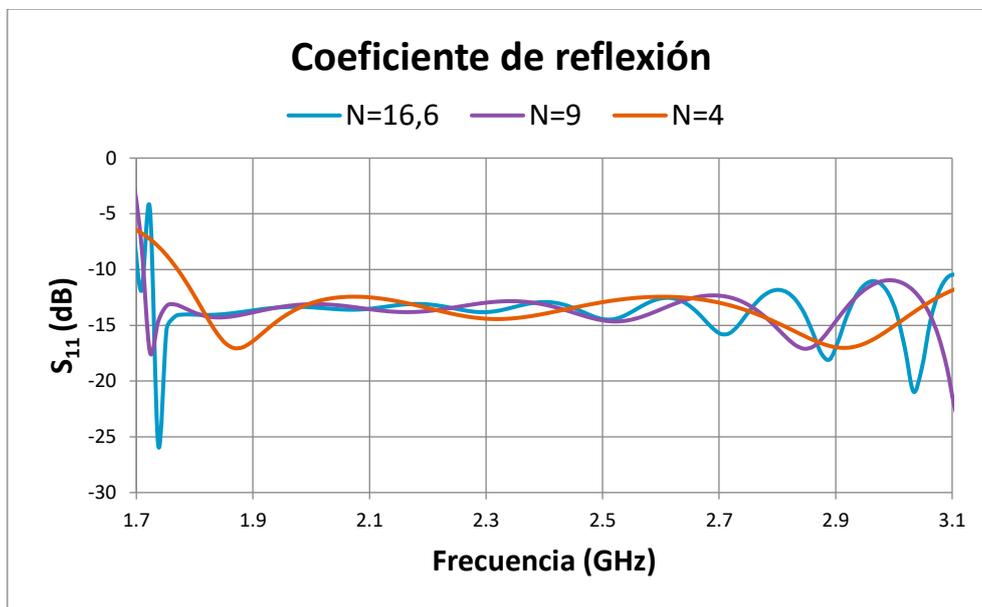
Figura 25. Vistas de alzado y planta de la antena en hélice axial

Para obtener el diseño con Antenna Magus, se establece como objetivo una frecuencia central de $2,4 \text{ GHz}$. El resto de los objetivos se dejan para que sean elegidos automáticamente por el software. Así, se obtiene el primer dimensionamiento de la antena con un número de vueltas N igual a $16,6$, siendo la altura de la antena $483,7 \text{ mm}$. Estos valores son muy elevados y poco prácticos, por lo que se elaboran un nuevos diseños, esta vez añadiendo como objetivo una ganancia menor, de 12 dB y 10 dB . Tras estos cambios, el diámetro de la hélice se mantiene constante pero sí ha disminuido el número

de vueltas a 9 y 4 respectivamente, y la altura de la antena se reduce a $264,5\text{ mm}$ y $120,4\text{ mm}$.

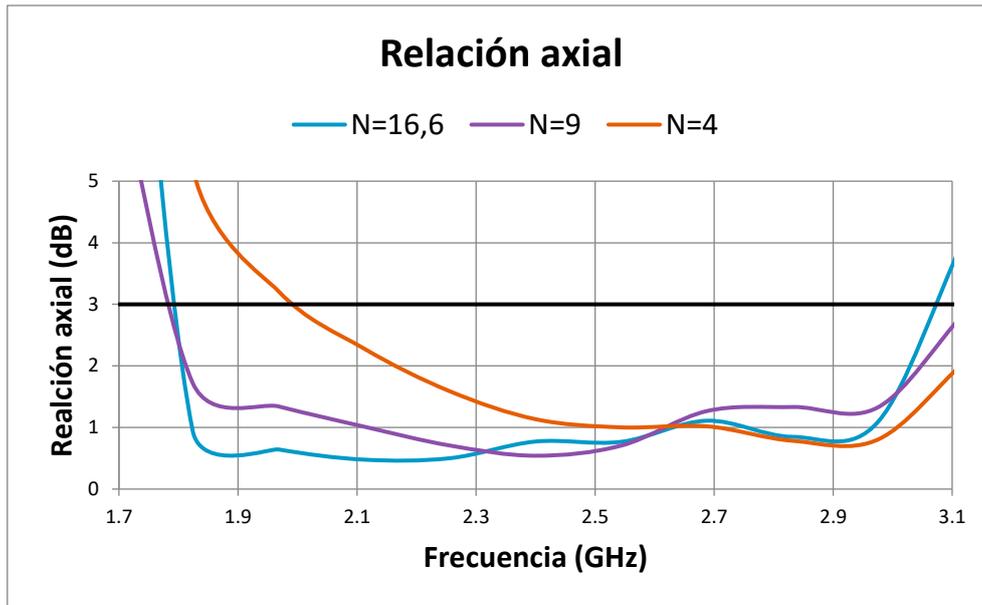
Analizando en la Gráfica 18 el coeficiente de reflexión se observa que el comportamiento no es como el de las anteriores antenas, donde encontrábamos picos donde el coeficiente disminuía de forma más o menos brusca, determinando que en ese punto se encontraba la frecuencia de resonancia. Pero como se ha mencionado, esta tipología de antena es no resonante y el coeficiente de reflexión varía de forma bastante irregular. Sin embargo, en torno a la frecuencia de $2,4\text{ GHz}$ presenta una estabilización, siempre en un valor inferior a -10 dB .

Además, se observa un ancho de banda bastante elevado de en torno a $1,3\text{ GHz}$. Sin embargo, para determinar el ancho de banda se tiene en cuenta también la relación axial respecto a la frecuencia, asegurando que esta se mantenga siempre por debajo de 3 dB .



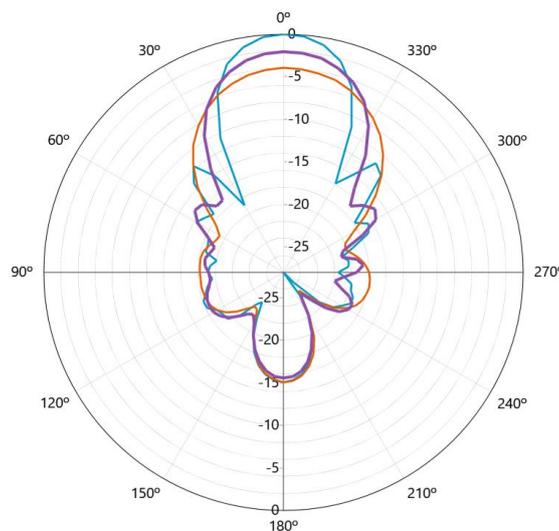
Gráfica 18. Coeficiente de reflexión de la antena en hélice axial para los 3 diseños

En lugar de hablar de frecuencia de resonancia hablamos de frecuencia central, y para determinarla se debe analizar la gráfica de la relación axial respecto a la frecuencia (Gráfica 19). Se observa que el mejor comportamiento lo presenta la antena con $N = 9$, ya que tiene la mejor relación axial para $2,4\text{ GHz}$ y un ancho de banda bastante elevado, sin embargo, las dimensiones siguen siendo bastante elevadas.



Gráfica 19. Relación axial de la antena en hélice axial para los tres diseños

En el diagrama de radiación (Gráfica 20), se observa efectivamente que, a menor número de vueltas, menor es la ganancia y por tanto la antena es menos directiva.



Gráfica 20. Diagrama de radiación de los 3 diseños de la antena en hélice axial con ganancia normalizada

5.2.3. Wire curl antena

Esta tipología de antena, al igual que la antena en hélice axial, es no resonante. Es más, se trata de una simplificación basada en esta primera, con un ángulo de inclinación $\phi = 0^\circ$ y una única espira ($N = 1$) [55]. Presenta una complejidad mayor, puesto que el radio de la espira no es constante, sino que varía con el ángulo, tal como se muestra en la Figura 26. Sin embargo, al presentar únicamente una espira y sin ángulo de inclinación, las dimensiones son menores, teniendo una menor altura (Figura 27).

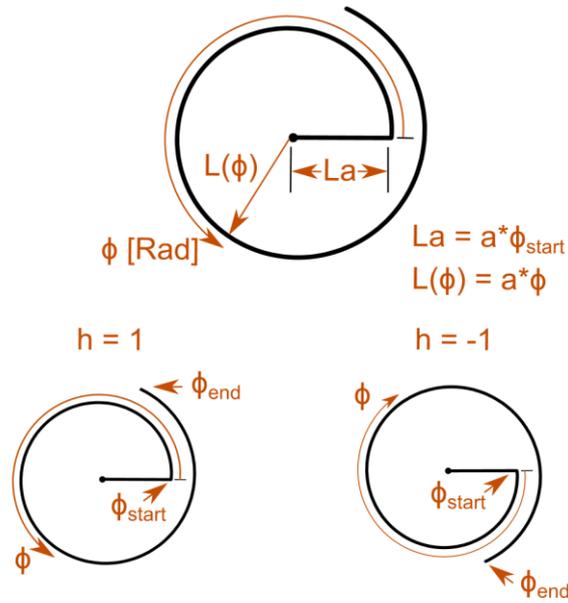


Figura 26. Vista de planta de la antena Wire Curl y función de su radio

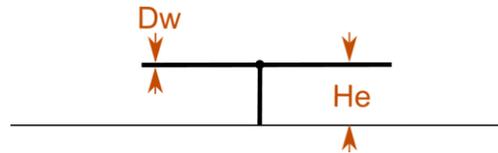
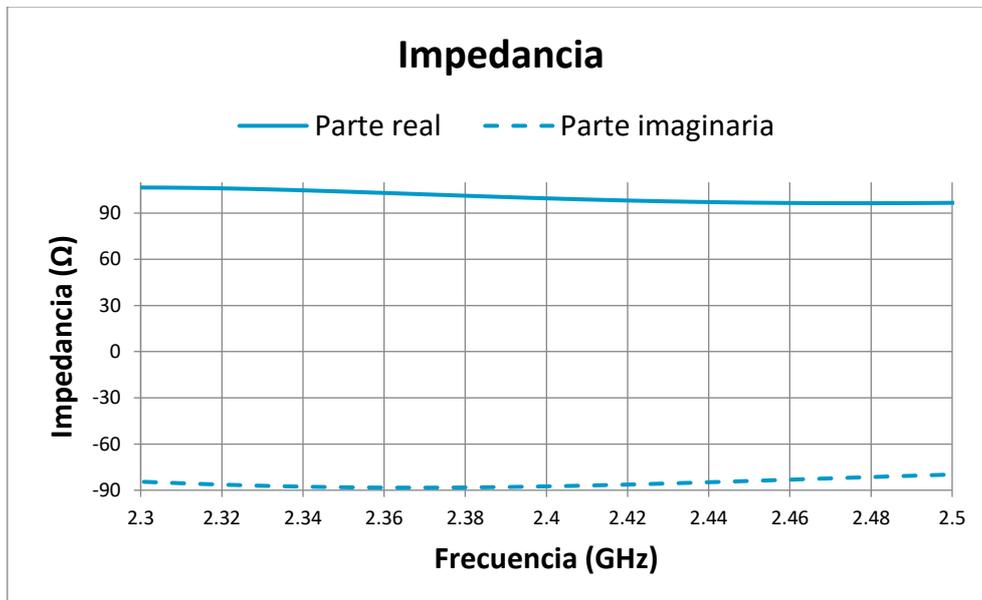


Figura 27. Vista de alzado de la antena Wire Curl

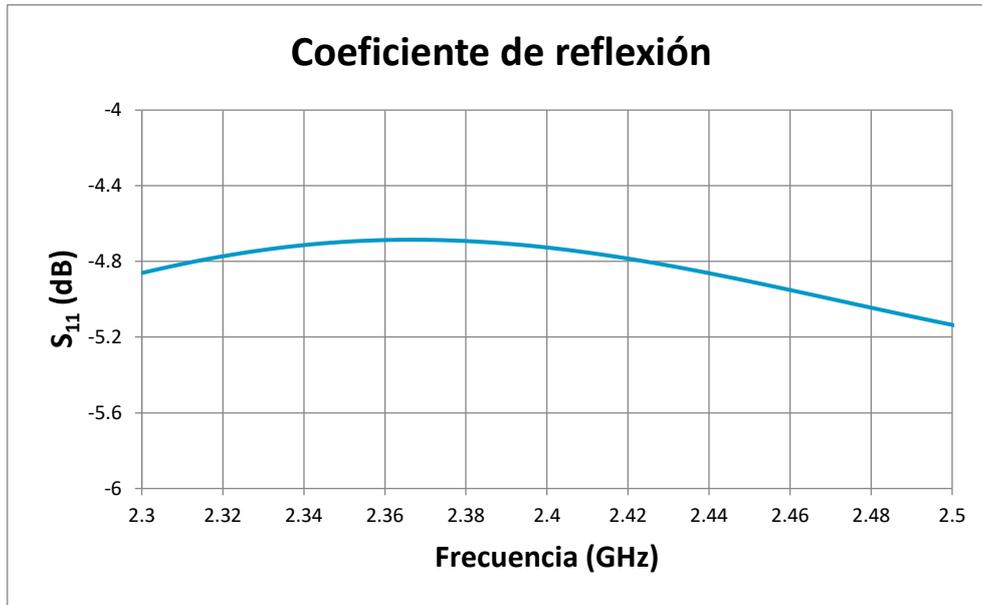
La impedancia (Gráfica 21) permanece predominantemente constante y con la parte imaginaria lejana a 0 y por ello, al igual que en el caso anterior, no se haya una frecuencia de resonancia.



Gráfica 21. Impedancia de la antena Wire Curl

Debido a estos valores de impedancia, el valor del coeficiente de reflexión (Gráfica 22) es bastante elevado, no llegando a ser ni siquiera inferior a -10 dB. Esto implica que

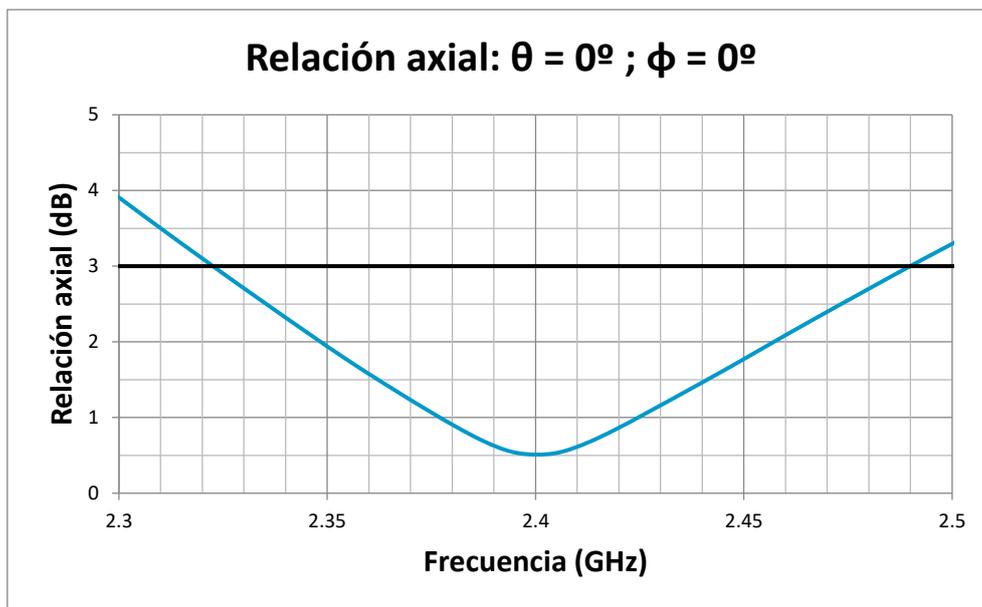
se captará señal, pero que una gran parte de ella será reflejada y por tanto la potencia de emisión necesaria es mucho mayor.



Gráfica 22. Coeficiente de reflexión de la antena Wire Curl

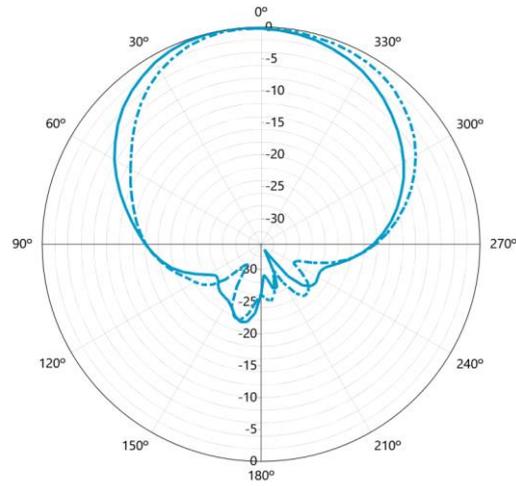
En lugar de frecuencia de resonancia, se trabaja con la frecuencia de relación axial óptima. Para ello, se analiza la Gráfica 23 de relación axial. En esta, el punto óptimo está centrado en 2,4 GHz y el ancho de banda las frecuencias que se encuentran debajo de 3 dB.

$$B = 2,49 \text{ GHz} - 2,32 \text{ GHz} = 0,17 \text{ GHz} = 170 \text{ MHz}$$



Gráfica 23. Relación axial de la antena Wire Curl

Puesto que la antena no es simétrica ya que tiene un brazo horizontal a un lado y el radio va cambiando, el diagrama de radiación no es del todo simétrico tampoco. Sin embargo, la desviación que presenta es mínima y esta se puede ver en la Gráfica 24.



Gráfica 24. Diagrama de radiación de la antena Wire Curl con ganancia normalizada

6. Diseño óptimo según requerimientos

Una vez estudiadas estas seis tipologías de antenas, tres de polarización lineal y tres de polarización circular, y analizando las gráficas y los resultados obtenidos, resulta conveniente determinar qué tipología resulta óptima para el objetivo. Puesto que la aplicación consiste en un dron que se va a encontrar en constante movimiento, no se sabe a ciencia cierta de qué dirección le va a llegar la radiación y por ello, las antenas con diagrama de radiación omnidireccional resultan más convenientes. De este modo, queda descartada la antena en hélice axial, la cual presenta una alta directividad. Los monopolos planos trapezoidal y de base elíptica sí presentan el diagrama de radiación omnidireccional, y además presentan las ventajas de tener un elevado ancho de banda y más de una frecuencia de resonancia, pudiendo así captar señal de distintos transmisores.

Sin embargo, para estos dos últimos casos se debe tener en cuenta que el resto de los componentes electrónicos del sistema RF-WPH puede no ser adecuado para trabajar en cierta frecuencia. Para solventar este problema hay diversas opciones. Una de ellas es hacer uso de componentes electrónicos también con un elevado ancho de banda. La otra es realizar dos circuitos paralelos, de forma que en cada circuito entre la potencia correspondiente a cada una de las frecuencias que es capaz de recibir el monopolo.

Otro factor para tener en cuenta es la polarización de las antenas. Como ya se ha mencionado, las antenas con polarización circular presentan la ventaja de que no se debe alinear la polarización del transmisor y receptor. Puesto que el dron se encuentra en movimiento y captaría señales de más de un sistema, es posible que la polarización de un sistema a otro difiera, siendo conveniente ser capaz de captar todas las polarizaciones posibles del entorno. Por ello, resulta mejor las antenas con polarización circular, como la *Skew Planar Wheel*.

Finalmente, otro punto a tener en cuenta también es la estructura y como de eficiente es integrar esta antena para el vuelo del dron. En el caso de los monopolos planos, presentan una elevada superficie, que puede interferir en la resistencia del aire. Por ello, para estos dos casos, la forma idónea sería diseñar la antena en un circuito integrado que pueda quedar adherido o interno al dron. En el caso de la IFA, la *Skew Planar Wheel* y la *Wire Curl* no son planas, sino que son de hilo, por lo que el aire puede transcurrir a través de ellas sin alterar en exceso las propiedades de vuelo.

Todas estas antenas han sido diseñadas para $2,4\text{ GHz}$, sin embargo, en el caso de querer aprovechar otra banda de frecuencias únicamente se debería redimensionar la antena, siendo el tamaño de la antena inversamente proporcional a la frecuencia deseada.

7. Dimensionamiento del diseño óptimo

Concluyendo en el apartado anterior, la tipología de antena óptima para la aplicación de estudio será la *Skew Planar Wheel*. Esto se debe a los siguientes factores:

- Polarización circular. Esto se debe a que al ser varias las fuentes transmisoras en el entorno aeroportuario pueden presentar polarizaciones distintas y estas se desconocen. Al tener polarización circular se garantiza buena recepción sin importar la polarización del transmisor.
- Diagrama omnidireccional. Al estar en constante movimiento el dron, el ángulo de recepción de la señal es cambiante en todo momento. Este tipo de diagrama con baja directividad garantiza que la señal se recibe de forma adecuada en los 360° del plano horizontal. Únicamente presenta un valor nulo en la vertical.
- Estructura de antena de hilo. Esto permite que la antena se pueda situar en el exterior del dron sin afectar en gran medida a su aerodinámica. La estructura de hilo conductor permite que el viento pase entre ellos sin afectar en gran medida. La estructura además contribuye a un reducido peso de la antena.

Las dimensiones del diseño final, aquel que presentaba un resultado adecuado para la relación axial, presenta las dimensiones finales que se observan en la Tabla 17.

Nombre	Descripción	Valor
Hf	Altura de la alimentación	6,249 mm
Lb	Longitud del elemento base	28,5 mm
ϕ	Ángulo del elemento de arco	91 °
θ	Ángulo de inclinación	37 °
D	Diámetro del conductor	999,3 μ m
N	Número de elementos	4

Tabla 17. Dimensiones básicas del diseño final óptimo de la antena

A partir de estas dimensiones, se pueden obtener en la Tabla 18 las dimensiones derivadas, las cuales son el resultado de cálculos geométricos a partir de las básicas descritas anteriormente. Esta tabla se puede obtener directamente exportando los resultados del programa Antenna Magus. Sin embargo, también se pueden obtener numéricamente. Por ejemplo, a partir de la longitud del arco y el ángulo se puede obtener el radio de este arco en la Ecuación (11), el cual puede ser útil para usar una base para dar la curvatura deseada.

$$R = \frac{La}{\phi} = \frac{50,14 \text{ mm}}{91^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}} = 31,57 \text{ mm} \quad (11)$$

Además, también se puede calcular la longitud de onda de la señal para comprobar si se ajusta, o en su defecto, se acerca al valor que se tiene de la longitud del elemento base. Así, la longitud de onda se obtiene a partir de la Ecuación (12). Esta es un poco mayor que la real, sin embargo, hay mucho otros factores que influyen, y se puede considerar que se ajusta de forma adecuada.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2,4 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}} = 0,125 \text{ m} = 125 \text{ mm} \quad (12)$$

Nombre	Descripción	Valor
X	Dimensión X de la antena	58,00 mm
Y	Dimensión Y de la antena	58,00 mm
Z	Dimensión Z de la antena	20,00 mm
La	Longitud del arco del elemento	50,14 mm
Lt	Longitud total del elemento	107,1 mm
Da	Diámetro de la antena ($2 \cdot Lb$)	57 mm

Tabla 18. Dimensiones derivadas del diseño final óptimo de la antena

Se ha obtenido, haciendo uso de las dimensiones básicas y de otras derivadas auxiliares obtenidas, el modelado 3D de la antena mediante uso de la herramienta AutoCAD, siendo éste el que se muestra en la Figura 19. Cada uno de los elementos presenta dos extremos, uno se conecta a la parte inferior de la alimentación y el otro a la parte superior. La alimentación de la antena se realiza mediante un cable coaxial, por lo que el extremo superior se conecta al conductor principal del coaxial, y el inferior al conductor secundario, la malla.

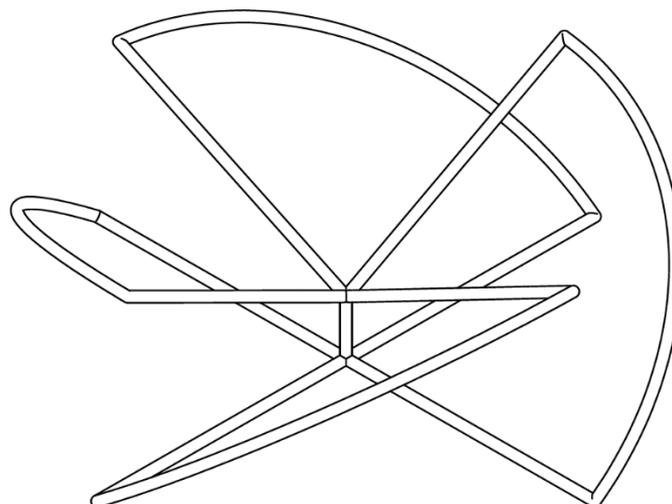


Tabla 19. Vista isométrica de la antena Skew Planar Wheel obtenida mediante modelado en AutoCAD

8. Conclusiones

Para llevar a cabo el uso del Energy Harvesting en una aplicación en concreto se debe analizar una gran cantidad de factores, para garantizar el correcto funcionamiento. Del estudio bibliográfico, se concluye que los niveles energéticos adquiridos hasta el momento en aplicaciones de RF-WPH es limitado. Por este motivo, no se puede garantizar la autonomía completa del dron haciendo uso de la energía adquirida por el sistema, pero si un leve aumento de la duración de esta mediante la alimentación de algunos componentes de menor potencia.

Seguidamente se ha observado que el entorno aeroportuario es un ambiente con una elevada presencia de radiación electromagnética. Sin embargo, esta está presente en bandas de frecuencia muy diferentes, que abarcan desde unos pocos MHz, hasta frecuencias del orden de 10 GHz cuando se trata de señales de satélites. Pese a que este abanico sea muy grande, el sistema de *Energy Harvesting* se va a centrar en una de ellas, o en unas pocas cercanas. Es por ello por lo que se debe realizar un estudio más exhaustivo de cada aeropuerto en concreto, teniendo en cuenta dónde se encuentran los transmisores de los que se quiere aprovechar la radiación y la potencia y dirección en la que radian, para así poder obtener con más precisión la potencia que llegará al receptor. Cada aeropuerto o aeródromo presenta una distribución más o menos distinta y por ello debe ser analizada.

Las frecuencias más empleadas hasta hoy para las aplicaciones de RF-WPH suelen ser frecuencias elevadas, de 900 MHz en adelante, ya que esto contribuye a tamaños de antena menores y más fáciles de integrar en nuestro sistema.

Respecto al diseño, pese a que se ha escogido una tipología concreta para la aplicación, se podría haber analizado gran cantidad de tipologías más, estudiando que cumple las características deseadas para nuestro objetivo. Una vez obtenida la antena, el proceso seguiría simulando las siguientes etapas con los dispositivos electrónicos, realizando un proceso iterativo, que podría implicar la modificación de la antena o de la electrónica.

Finalmente, pese a que, como se ha mencionado al principio, el valor energético que proporciona un sistema RF-WPH es limitado, este se puede combinar con otros como el solar o el piezoeléctrico. Estos dos son los que mejor se ajustarían, debido a que, durante el vuelo, el dron no recibe sombra de ningún componente, y a que las mismas vibraciones producidas por el movimiento del dron pueden realimentar el sistema de *Energy Harvesting*.

Este sistema de *Energy Harvesting* puede ser trasladado a otras posibles aplicaciones en el entorno aeroportuario en las que se desee hacer uso de sensores y dispositivos electrónicos de baja potencia, ajustando que la potencia obtenida se ajuste a la deseada.

Referencias

- [1] L. Z. Lleó, «AENA llevará a aeropuertos de toda España los drones que protegen los aviones de las aves,» *El Confidencial Digital*, 17 julio 2020.
- [2] «Drones para el control de aves en el Aeropuerto de Southampton,» Ferrovial, [En línea]. Available: <https://www.ferrovial.com/es-es/negocio/proyectos/drones-control-de-aves-aeropuerto-de-southampton/>. [Último acceso: 7 mayo 2022].
- [3] N. G. R. Silva, «Energía Nuclear. Ventajas y peligros,» de *Hipótesis: apuntes científicos uniandinos*, núm. 16, 2014, pp. 64-71.
- [4] M. Domínguez, «¿Qué es Energy Harvesting? Extracción de energía ambiente,» caloryfrio.com, 23 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/que-es-energy-harvesting-energia-ambiental.html>.
- [5] L. Tran, H. Cha y W. Park, «RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications.,» *Micro and Nano Systems Letters*, vol. 5, n° 14, 2017.
- [6] M. K. Hosain, A. Z. Kouzani, M. F. Samad y S. J. Tye, «A Miniature Energy Harvesting Rectenna for Operating a Head-Mountable Deep Brain Stimulation Device,» *IEEE Access*, vol. 3, pp. 223-234, 2015.
- [7] «An Overview of RF Energy Harvesting – Working and Applications,» IOT Design Pro, 19 marzo 2021. [En línea]. Available: <https://iotdesignpro.com/articles/an-overview-of-rf-energy-harvesting-its-working-and-applications>. [Último acceso: 06 mayo 2022].
- [8] C. C. C. Lin y J. Gong, «A Wearable Rectenna to Harvest Low-Power RF Energy for Wireless Healthcare Applications,» de *2018 11th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, Beijing, China, 2018.
- [9] H. S. Kim, J.-H. Kim y J. Kim, «A Review of Piezoelectric Energy Harvesting Based on Vibration,» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 12, n° 6, pp. 1129-1141, Diciembre 2011.
- [10] H. Sharma, A. Haque y Z. A. Jaffery, «An Efficient Solar Energy Harvesting System for Wireless Sensor Nodes,» *2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, pp. 461-464, 2018.
- [11] EcoInventos, «¿Cómo funcionan las células solares fotovoltaicas?,» 4 febrero 2019. [En línea]. Available: <https://ecoinventos.com/celulas-solares-fotovoltaicas/>. [Último acceso: 11 mayo 2022].

- [12] Enel Green Power, «Célula fotovoltaica,» [En línea]. Available: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-solar/celula-fotovoltaica>. [Último acceso: 6 mayo 2022].
- [13] K. T. Selvan y R. Janaswamy, «Fraunhofer and Fresnel Distances : Unified derivation for aperture antennas,» *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 59, nº 4, pp. 12-15, 2017.
- [14] A. D. Yaghjw, «An Overview of Near Field Antenna Measurements,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vols. %1 de %2AP-34, nº 1, pp. 30-45, 1986.
- [15] «Los límites entre el campo cercano y el campo lejano,» CEMDAL. Consultoría de Compatibilidad Electromagnética, 4 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.cemdal.com/2016/09/04/los-l%C3%ADmites-entre-el-campo-cercano-y-el-campo-lejano/>.
- [16] V. Marian, B. Allard, C. Vollaire y J. Verdier, «Strategy for Microwave Energy Harvesting From Ambient Field or a Feeding Source,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, nº 11, pp. 4481-4491, 2012.
- [17] Y. Tikhov, I. -J. Song y Y. -H. Min, «Rectenna Design for Passive RFID Transponders,» de *2007 European Conference on Wireless Technologies*, Munich, Germany, 2007.
- [18] J. T. H. e. al., «21.8 An all-in-one (Qi, PMA and A4WP) 2.5W fully integrated wireless battery charger IC for wearable applications,» de *2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, San Francisco, USA, 2016.
- [19] «Qi (estándar de electricidad por inducción),» Wikipedia. La enciclopedia libre, [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Qi_\(est%C3%A1ndar_de_electricidad_por_inducci%C3%B3n\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Qi_(est%C3%A1ndar_de_electricidad_por_inducci%C3%B3n)). [Último acceso: 4 mayo 2022].
- [20] Q. Tian y L. Jia, «WPC Qi mobile device Rx coil design and optimization,» de *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, New Orleans, LA, USA, 2020.
- [21] D. Pérez, «Conoce los estándares de carga inalámbrica: WPC, PMA y A4WP,» *El Español*, 14 marzo 2015. [En línea]. Available: <http://www.shorturl.at/tFHX3>. [Último acceso: 5 mayo 2022].
- [22] A. C. F. R. H. J. Visser y J. A. C. Theeuwes, «Ambient RF Energy Scavenging: GSM and WLAN Power Density Measurements,» de *2008 38th European Microwave Conference*, Amsterdam, Países Bajos, 2008.
- [23] S. Kim y W. Yang, «Single feed wideband circular polarised patch antenna,» *Electron. Lett.*, vol. 43, nº 13, pp. 703-704, 2007.

- [24] H. Sun, «An Enhanced Rectenna Using Differentially-Fed Rectifier for Wireless Power Transmission,» *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 32-35, 2016.
- [25] «Antena de GPS y Sistemas GPS Mejorados,» Leedeo Engineering 2021. Líderes en servicios de Ingeniería y RAMS, 18 octubre 2019. [En línea]. Available: <https://www.leedeo.es/l/antena-de-gps-y-sistemas-gps-mejorados/>. [Último acceso: 14 junio 2022].
- [26] H. S. a. W. Geyi, «A New Rectenna With All-Polarization-Receiving Capability for Wireless Power Transmission,» *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 814-817, 2016.
- [27] Q. W. a. J. L. F. Zhang, «A Simple T-shaped Wide-band Slot Antenna for Rectenna System,» de *2008 China-Japan Joint Microwave Conference*, Shanghai, China, 2008.
- [28] D. Lauder y Y. Sun, «Design Considerations of Antennas and Adaptive Impedance Matching Networks for RF Energy Harvesting,» de *2020 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, Sofia, Bulgaria, 2020.
- [29] S. C. D. Roy, «Characteristics of Single- and Multiple-Frequency Impedance Matching Networks,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 62, nº 3, pp. 222-225, 2015.
- [30] Y. C. a. C. Chiu, «Characterization of the lossyness of matching networks for RF energy-harvesting rectennas,» de *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Paris, France, 2017.
- [31] L. R. e. al., «The Advancement of Radio Frequency Energy Harvesters (RFEHs) as a Revolutionary Approach for Solving Energy Crisis in Wireless Communication Devices: A Review,» *IEEE Access*, vol. 9, pp. 106107-106139, 2021.
- [32] P. Musilek, M. Prauzek, P. Krömer, J. Rodway y T. Bartoň, «Chapter 4 - Intelligent Energy Management for Environmental Monitoring Systems,» de *Smart Sensors Networks: Communication Technologies and Intelligent Applications*, Academic Press, 2017, pp. 67-94.
- [33] B. M., A. M. y S. Alghuwainem, «Maximum Power Point Tracker Controller Using Fuzzy Logic Control with Battery Load for Photovoltaics Systems,» *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 12, pp. 163-181, 2021.
- [34] Grupo de Nuevas Actividades Profesionales, *Elementos Técnicos para la Gestión de Frecuencias en Espacios Complejos: Entornos Aeronáuticos*, Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2009.
- [35] Organización de Aviación Civil, Anexo 10, *Telecomunicaciones aeronáuticas. Volumen V - Utilización del espectro de radiofrecuencias aeronáuticas*, Montreal, Quebec, Canadá, 2013.

- [36] P. Lu, J. L. X. Yang y B. Wang, «A Compact Frequency Reconfigurable Rectenna for 5.2- and 5.8-GHz Wireless Power Transmission,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, n° 11, pp. 6006-6010, Nov 2015.
- [37] J. O. McSpadden, L. Fan y K. Chang, «Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8-GHz rectenna,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, n° 12, pp. 2053-2060, Dic 1998.
- [38] «The Drone Bird Company,» [En línea]. Available: <https://www.thedronebird.com/>.
- [39] «Robird / AVES/ AVES Falcon Bird,» Eagle Eye Solutions, [En línea]. Available: <https://eagle-eye.ch/en/robird-2/>.
- [40] «AVES,» The Drone Bird Company, [En línea]. Available: <https://www.thedronebird.com/aves/>.
- [41] «Normativa de Drones en España 2022,» One Air, [En línea]. Available: <https://www.oneair.es/normativa-drones-espana-aesa/>.
- [42] J. G. García, *Metodología para el diseño de ornitópteros*, Sevilla: Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, 2021.
- [43] MCI Capacitación, «Primeros pasos con Microcontroladores,» Circuitos Electrónicos, Conceptos, 18 junio 2019. [En línea]. Available: <https://cursos.mcielectronics.cl/2019/06/18/microcontroladores-y-alimentacion/>.
- [44] «Cámaras para drones,» NOVODRONE, [En línea]. Available: <https://novodrone.com/tipos-de-camaras-para-drones/>.
- [45] «Antenna Polarization,» Electronics Notes, [En línea]. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/antenna-theory/polarisation-polarization.php>. [Último acceso: 19 junio 2022].
- [46] «Intro to Antenna Polarization,» JEM Engineering, octubre 2020. [En línea]. Available: <https://jemengineering.com/blog-intro-to-antenna-polarization/>. [Último acceso: 16 junio 2022].
- [47] «Inverted-F antenna,» Wikipedia, [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Inverted-F_antenna. [Último acceso: 19 junio 2022].
- [48] J. Volakis, *Antenna Engineering Handbook 4th Ed*, McGraw-Hill Education, 2009.
- [49] A. K. Singh y M. R. Tripathy, «Planar Trapezoidal Monopole Antenna for TVWS CPE,» de *2018 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Pune, India, 2018.
- [50] P. V. Anob, K. P. Ray y G. Kumar, «Wideband orthogonal square monopole antennas with semi-circular base,» de *IEEE Antennas and*

- Propagation Society International Symposium. 2001 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No.01CH37229)*, Boston, MA, USA, 2001.
- [51] «Polarización electromagnética,» Wikipedia, [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Polarizaci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica. [Último acceso: 19 junio 2022].
- [52] H. T. Hui y K. Y. Y. E. K. N. Chan, «The Low-Profile Hemispherical Helical Antenna With Circular Polarisation radiation Over a Wide Angular Range,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, nº 6, p. 1415 – 1418, 2003.
- [53] D. Clingerman, «Wheel Antennas,» W6OAL Antennas, [En línea]. Available: <https://hamtv.com/wheel.html>.
- [54] «Non-Resonant and Resonant Antennas,» Cadence Design Systems, [En línea]. Available: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2022-non-resonant-and-resonant-antennas>. [Último acceso: 29 junio 2022].
- [55] H. Nakano, S. Okuzawa, K. Ohishi, H. Mimaki y J. Yamauchi, «A curl antenna,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 41, nº 11, pp. 1570-1575, 1993.



DOCUMENTO 2: PLIEGO DE CONDICIONES

1.	Objeto	64
2.	Generalidades	64
2.1.	Ejecución	64
2.2.	Control de calidad	64
3.	Componentes y materiales	65
3.1.	Hilo conductor	65
3.2.	Soldadura	66
3.3.	Cable coaxial.....	66

1. Objeto

El presente Pliego de Condiciones reúne todo aquello que se debe cumplir en la elaboración de la antena para la aplicación de Energy Harvesting diseñada y descrita en la Memoria, así como los materiales que se utilizan en su construcción.

La aceptación de las partes contratantes de las especificaciones expuestas en este documento obliga a ambas a su cumplimiento. En caso de que algunos detalles relevantes sean omitidos causando dudas durante la ejecución del proyecto se deberá actuar siguiendo una buena práctica, con el objetivo de maximizar la calidad del producto final.

El principal objetivo de este documento es asegurar al usuario una antena que garantice un buen funcionamiento en el sistema RF-WPH, aumentando así la vida útil de la batería del dron y contribuyendo a su aplicación de forma más ecológica.

El proyecto de estudio del Energy Harvesting en el entorno aeroportuario dispone de la siguiente documentación:

- Memoria
- Pliego de condiciones
- Presupuesto
- Planos
- Anexos

Esta documentación es de obligado cumplimiento. Otra documentación que se pueda encontrar en el proyecto es meramente informativa.

2. Generalidades

2.1. Ejecución

- a) Cualquier operación que se realice al material debe seguir las especificaciones presentes en la documentación del proyecto, tanto escrita como gráfica, referidas a la geometría y propiedades.
- b) Finalizada la fabricación, se realizarán las mediciones necesarias para asegurar el cumplimiento del requisito en a) y se harán pruebas para el control de calidad.

2.2. Control de calidad

Una vez terminada la fabricación de la antena se realizarán unas pruebas para asegurar el adecuado funcionamiento de ésta. Según el resultado obtenido, se podrá aceptar o rechazar el producto.

Se realiza una prueba con la antena fabricada, la cual será la antena receptora y un transmisor a una distancia conocida. Se conecta la antena transmisora a un generador de señal y a una fuente de alimentación de potencia conocida. La antena receptora que ha sido fabricada se conecta a un detector de señal y a un medidor de relación de onda estacionaria. Calculando a partir de los datos el coeficiente de reflexión y la ganancia, se determina si la antena receptora se ajusta a las condiciones necesarias y obtenidas de la simulación. De ser así, se certificará el producto con un sello de calidad.

3. Componentes y materiales

3.1. Hilo conductor

La antena Skew Planar Wheel se trata de una antena de hilo. Su estructura debe ser rígida, para así evitar posibles deformaciones en la geometría de esta que puedan afectar a su funcionamiento. Por ello, el material empleado para este hilo conductor no debe ser fácilmente maleable. El material para emplear es el acero recubierto de cobre. Este material asegura la fortaleza mecánica, la resistencia a la corrosión y una buena conductividad, asegurando así una mejor recepción. Se puede hacer uso de una de las variantes presentes, en función de su conductividad (Tabla 20).

IACS	21 %	30 %	40 %	53 %
Área de cobre	14 %	25 %	35 %	49 %
Área de acero	86 %	75 %	65 %	51 %
Densidad	7,96 g/cm ³	8,08 g/cm ³	8,20 g/cm ³	8,35 g/cm ³
Módulo de elasticidad	190 gPa	183 gPa	176 gPa	166 gPa
Coefficiente de dilatación lineal	1,77 · 10 ⁻⁵ l/°C	1,84 · 10 ⁻⁵ l/°C	1,90 · 10 ⁻⁵ l/°C	1,98 · 10 ⁻⁵ l/°C
Coefficiente de variación con la resistencia	0,00378 l/°C	0,00378 l/°C	0,00378 l/°C	0,00378 l/°C

Tabla 20. Propiedades de aceros recubiertos de cobre

Para el desarrollo de una antena más ligera con un menor presupuesto, se emplea aluminio recubierto de cobre, ateniéndose a posibles deformaciones por la propiedad elevadamente dúctil del material y por consiguiente unos resultados que difieren a los simulados en el presente proyecto. Sus propiedades se muestran en la Tabla 21.

Características	66 % IACS
Área de aluminio	85 %
Área de cobre	15 %
Densidad	3,63 g/cm ³
Resistividad eléctrica	26,13 mm ² Ω/km
Conductividad en alta frecuencia	Área de cobre
Módulo de elasticidad	7 GPa
Coefficiente de dilatación linear	2,30 · 10 ⁻⁵ l/oC
Coefficiente de variación a la resistencia	0,00402 l/oC

Tabla 21. Propiedades del aluminio recubierto de cobre

El diámetro del hilo conductor debe ser constante y seguir las medidas en las especificaciones de diseño para asegurar el deseado comportamiento. Debe ser adquirido asegurando que cumple los pertinentes controles de calidad.

3.2. Soldadura

Tras dotar de la geometría deseada a hilo conductor este se suelda al cable coaxial. Para ello, se emplea como material de soldadura una aleación de estaño y plomo. La composición deseada de este material es de 60 % estaño y 40 % plomo. Este es el material empleado en casos generales. Para asegurar una mejor adaptación al material se puede hacer uso de estaño-zinc o cadmio-zinc para la soldadura de aluminio. Otro material de soldadura óptimo es cadmio-plata empleado en soldaduras de cobre. Cualquier otro tipo de aleación para soldadura queda descartado.

Al adquirir este material se debe asegurar que los porcentajes de aleación son los deseados y que no presenta impurezas, ya que estas pueden afectar significativamente al comportamiento de la antena.

Durante el proceso de soldado, se debe controlar atentamente la temperatura del soldador, de forma que esto no altere las propiedades del hilo conductor. La cantidad de aleación de soldadura empleada debe ser la justa para una buena fijación del hilo conductor, sin excederse para evitar una concentración y pérdida de energía en esos puntos.

3.3. Cable coaxial

Se trata de un cable que presenta dos conductores en un mismo eje. El primero de estos conductores es una malla metálica trenzada en forma de cilindro exterior, y funciona como conductor de retorno y blindaje del interior. El segundo conductor es un cable de

cobre en el centro, de mayor importancia puesto que transporta la información. Ambos conductores son separados por una capa aislante en forma de corona circular. Por encima de la malla hay otro material aislante, normalmente termoplástico PVC (policloruro de vinilo), PE (poliestireno) o PCP (policloropreno).

De los distintos tipos de cable coaxial se debe trabajar con RG316. Sus especificaciones vienen resumidas en la Tabla 22.

Conductor	Acero chapado en cobre revestido de plata
Dieléctrico	PTFE puro
Malla	Trenza de cobre plateado
Revestimiento	Etileno propileno fluorado
Impedancia característica	$50 \pm 2 \Omega$
Voltaje máximo	1200 V
Temperatura de operación	De -55 °C a 200 °C
Velocidad de propagación	69,5 % de la velocidad de la luz
Máxima frecuencia	3 GHz
Atenuación en la frecuencia máxima	47 dB por ft
Potencia en la máxima frecuencia	93 W

Tabla 22. Propiedades del cable coaxial RG316



DOCUMENTO 3: PRESUPUESTO

1. Introducción	69
2. Presupuesto de la mano de obra	69
3. Presupuesto del material.....	70
4. Presupuesto de licencias de software	71
5. Presupuesto de ejecución material, por contrata y base de licitación	71

1. Introducción

En este documento se analiza el presupuesto del proyecto calculando los distintos costes que requiere y así determinar su viabilidad económica. Estos costes se han dividido en tres categorías: la mano de obra, los materiales y las licencias de software. En los tres casos, se ha tenido en cuenta el coste según la cantidad de tiempo que requería cada una de las partidas.

A partir de estos costes, se ha obtenido el presupuesto de ejecución material, el presupuesto de ejecución por contrata y, por último, el presupuesto general, también llamada presupuesto base de licitación.

Cada una de las partidas del presupuesto se ha asignado a un código, cuya clasificación es acorde a la Tabla 23.

Código	Descripción del código
MO	Mano de obra
MQ	Maquinaria
LS	Licencias de software

Tabla 23. Códigos de las partidas del presupuesto

2. Presupuesto de la mano de obra

En este apartado se describen los precios de mano de obra del proyecto. Se han considerado las horas dedicadas por la estudiante y la tutora del proyecto. Para el caso de la estudiante, al tratarse de una persona aún no graduada en ingeniería se ha considerado el precio mínimo para prácticas en empresa que se establece en la Normativa UPV de Prácticas en Empresa. Esta bolsa mínima, en el documento aprobado en mayo de 2021 se establece en 4,30 €/h.

En el caso de la tutora del proyecto, se tiene en cuenta la retribución anual de un Profesor/a Titular de Universidad, obtenido de las tablas retributivas PDI para el ejercicio 2022, el cual es de 35983,94 €/año. Para obtener cual sería el precio por hora (Ecuación (13)), es necesario saber cuántas horas se trabajan al año. Atendiendo a la normativa vigente en materia de trabajo (BOE-A-2022-3029 y Art. 38 del ET), corresponden 30 días de vacaciones al año y 14 festivos, y considerando una jornada laboral de 8 horas, el número de horas trabajado se obtiene con la Ecuación (14).

$$\frac{\text{horas}}{\text{año}} = \left(\frac{\text{días}}{\text{año}} - \frac{d_{\text{vacaciones, festivos}}}{\text{año}} \right) \cdot \left(\frac{\text{horas}}{\text{día}} \right) = 2568 \text{ h/año} \quad (13)$$

$$\frac{\text{Coste tutora}}{\text{hora}} = \frac{\text{Retribución anual}}{\frac{\text{horas}}{\text{año}}} = 14,01 \text{ €/h} \quad (14)$$

Respecto al tiempo dedicado, para el caso del estudiante encontramos 50 horas de estudio bibliográfico, 45 para el diseño y simulación con el programa y 120 de redacción, así como 5 para las reuniones de seguimiento realizadas con la tutora y unas 35 para la elaboración de planos en AutoCAD. En el caso de la tutora, además de las 5 horas de reuniones en las que ha participado, se consideran también 5 horas de revisión de los progresos que la estudiante ha ido proporcionando.

Tras multiplicar las horas dedicadas por el coste horario se obtiene el cuadro de precios presente en la Tabla 24 para la mano de obra.

Código	Descripción	Horas	Coste (€/h)	Importe (€)
MO.1	Estudiante en prácticas de Ingeniería Aeroespacial	250	4,30 €/h	1075 €
MO.2	Profesora titular (tutora)	10	14,01 €/h	140,10 €
Precio total de la mano de obra				1215,10 €

Tabla 24. Cuadro de precios de la mano de obra

3. Presupuesto del material

Para el cálculo de los precios del material, se ha calculado su amortización teniendo en cuenta el coeficiente de amortización lineal máximo proporcionado por la Agencia Tributaria. El coste anual, viene definido a partir de la Ecuación (15) y a partir de él se obtiene el coste del material para el tiempo utilizado con la Ecuación (16). Una vez calculados, los precios quedan recogidos en la Tabla 25.

$$\frac{\text{Coste}}{\text{año}} = \text{Base amortizable} \cdot \text{Coeficiente máx} \quad (15)$$

$$\text{Coste} = \frac{\text{Coste}}{\text{año}} \cdot t_{\text{uso}} \quad (16)$$

Código	Descripción	Coste inicial (€)	Coeficiente máximo (%)	Tiempo uso (mes)	Importe (€)
MQ.1	Ordenador	850 €	25 %	5	88,54 €
Precio total de los materiales					88,54 €

Tabla 25. Cuadro de precios de los materiales

4. Presupuesto de licencias de software

En este último apartado del presupuesto se analizan los gastos debidos a las licencias de los softwares usados para el desarrollo del proyecto y se recogen en la Tabla 26. Entre ellos se encuentran Microsoft 365 para la redacción, la elaboración de gráficas y cálculos, las reuniones y presentaciones, y Antenna Magus, para el diseño y simulación de las distintas soluciones.

Teniendo en cuenta suscripciones anuales o mensuales de la licencia, se obtiene el coste horario y se multiplica por las horas empleadas.

Código	Descripción	Precio de licencia	Meses	Importe (€)
LS.1	Microsoft 365 Empresa Básico	5,10 €/mes	5	25,50 €
LS.2	Antenna Magus Professional	3158 €/año	3	789,50 €
LS.3	AutoCAD	291 €/mes	1	291 €
Precio total de las licencias de software				1106 €

Tabla 26. Cuadro de precios de las licencias de software

5. Presupuesto de ejecución material, por contrata y base de licitación

Primeramente, el presupuesto de ejecución material se calcula sumando los presupuestos parciales de mano de obra, de materiales y de licencias de software obtenidos anteriormente, y se añade un 25 % del total debido a costes indirectos.

Seguidamente, para obtener el presupuesto de ejecución por contrata se toma el presupuesto de ejecución material y se añade una partida de gastos generales, que corresponde a un 13 % de este último.

Finalmente, el presupuesto base de licitación se obtiene aplicando el IVA (21 %) sobre el presupuesto de ejecución por contrata.

Presupuesto Parcial Mano de Obra	1215,10 €
Presupuesto Parcial Materiales	88,54 €
Presupuesto Parcial Licencias de Software	1106 €
Total Parcial	2409,64 €
Costes indirectos (25 %)	602,41 €
Total Ejecución Material	3012,05 €

El presupuesto de Ejecución Material asciende a la expresada cantidad de TRES MIL DOCE EUROS CON CINCO CÉNTIMOS

Presupuesto de Ejecución Material	3012,05 €
Gastos Generales (13%)	391,57 €
Beneficio Industrial (0%)	0 €
Total Ejecución por Contrata	3403,62 €

El presupuesto de Ejecución por Contrata asciende a la expresada cantidad de TRES MIL CUATROCIENTOS TRES EUROS CON SESENTA Y DOS CÉNTIMOS

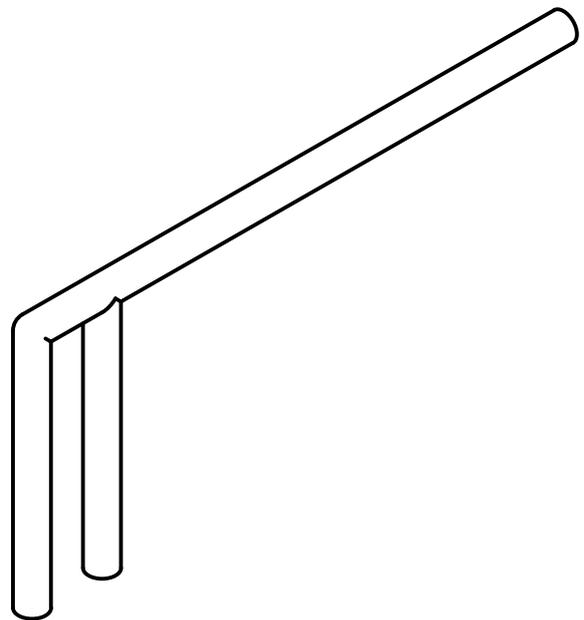
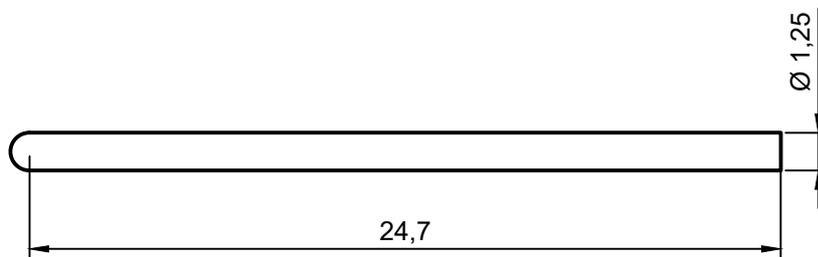
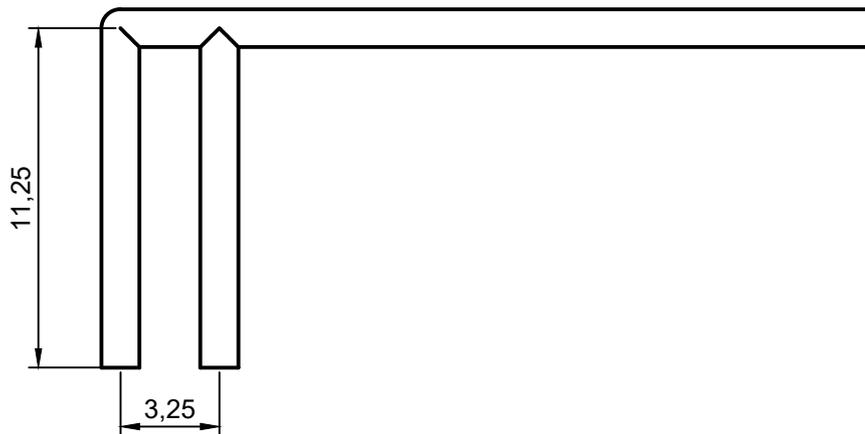
Presupuesto de Ejecución por Contrata	3403,62 €
IVA (21%)	714,76 €
Total Base de Licitación	4118,34 €

El presupuesto Base de Licitación asciende a la expresada cantidad de CUATRO MIL CIENTO DIEZ Y OCHO EUROS CON TRENTA Y CUATRO CÉNTIMOS

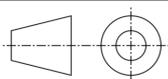


DOCUMENTO 4: PLANOS

1. Inverted F Antenna	74
2. Vertical Trapezoidal Monopole	75
3. Elliptical base-strip monopole	76
4. Skew Planar Wheel	77
5. Axial-mode Wire Helix Antenna	79
6. Wire Curl Antenna	80



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



PROYECTO

ESTUDIO DEL ENERGY HARVESTING

ESCALA

DESCRIPCIÓN

4:1

INVERTED F ANTENNA (IFA)

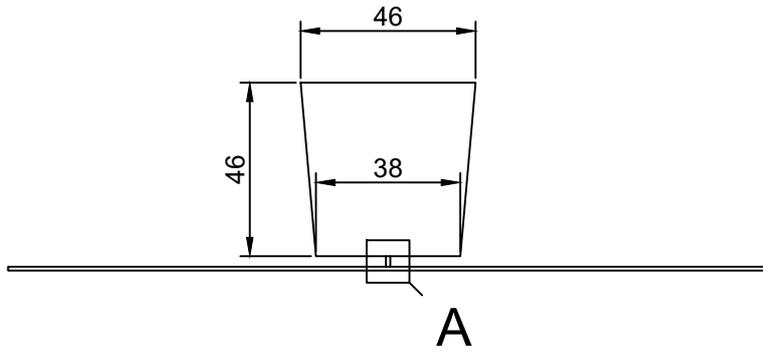
FECHA

20/08/2022

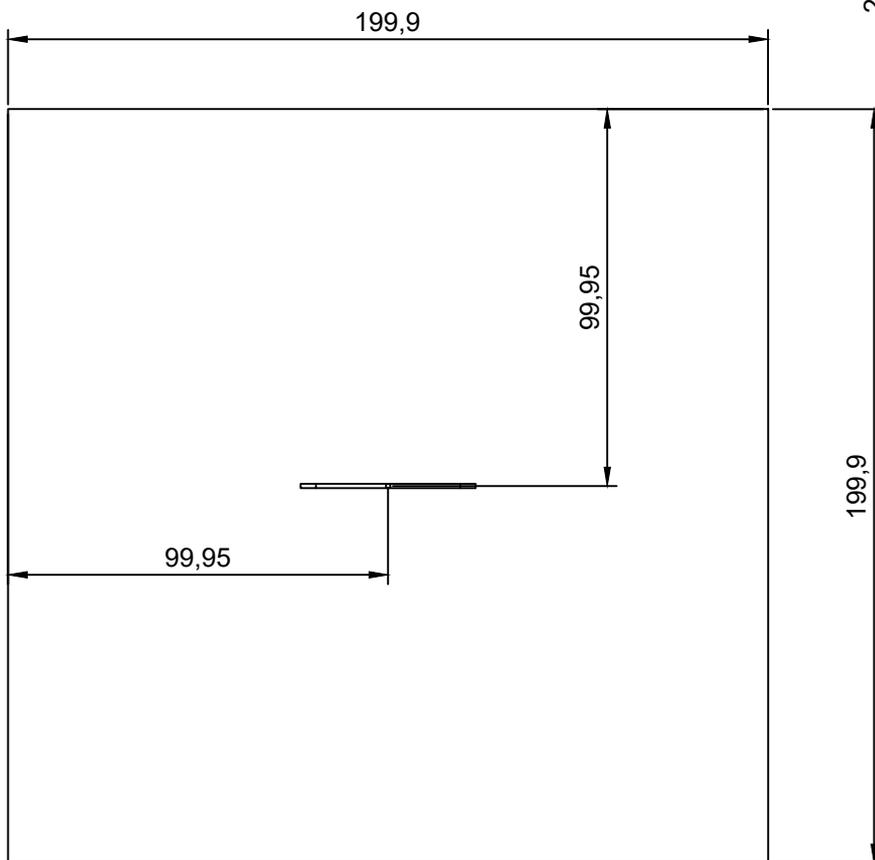
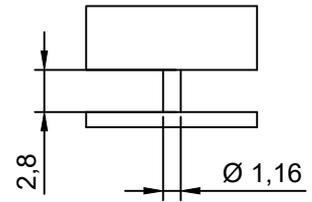
HOJA 1 DE 7

DIBUJADO

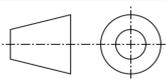
EVELYN LISSETH ROJANO FERNANDEZ



A (2:1)



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



PROYECTO

ESTUDIO DEL ENERGY HARVESTING

ESCALA

DESCRIPCIÓN

1:2

VERTICAL TRAPEZOIDAL MONOPOLE

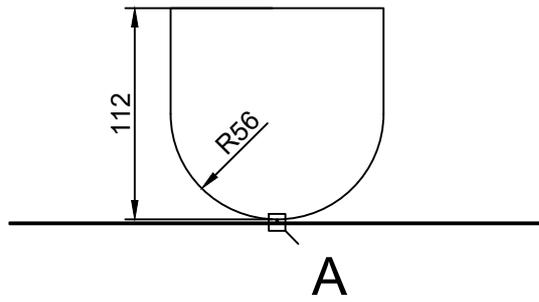
FECHA

21/08/2022

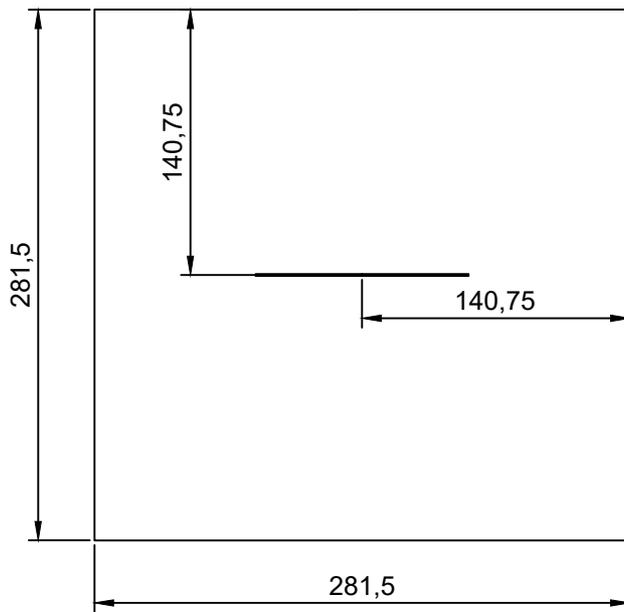
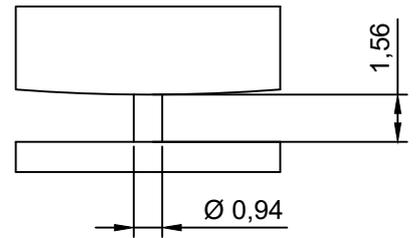
HOJA 2 DE 7

DIBUJADO

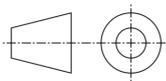
EVELYN LISSETH ROJANO FERNANDEZ



A (4:1)



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



PROYECTO

ESTUDIO DEL ENERGY HARVESTING

ESCALA

DESCRIPCIÓN

1:4

ELLIPTICAL BASE STRIP MONOPOLE

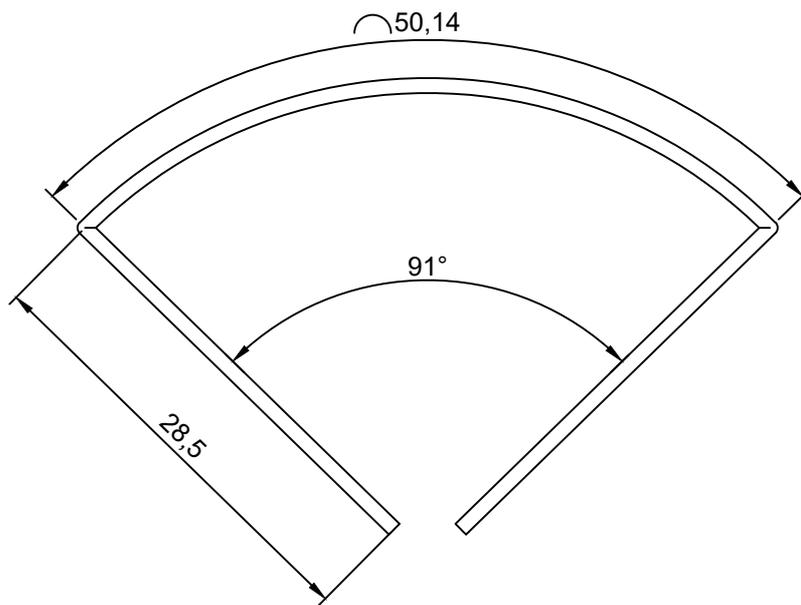
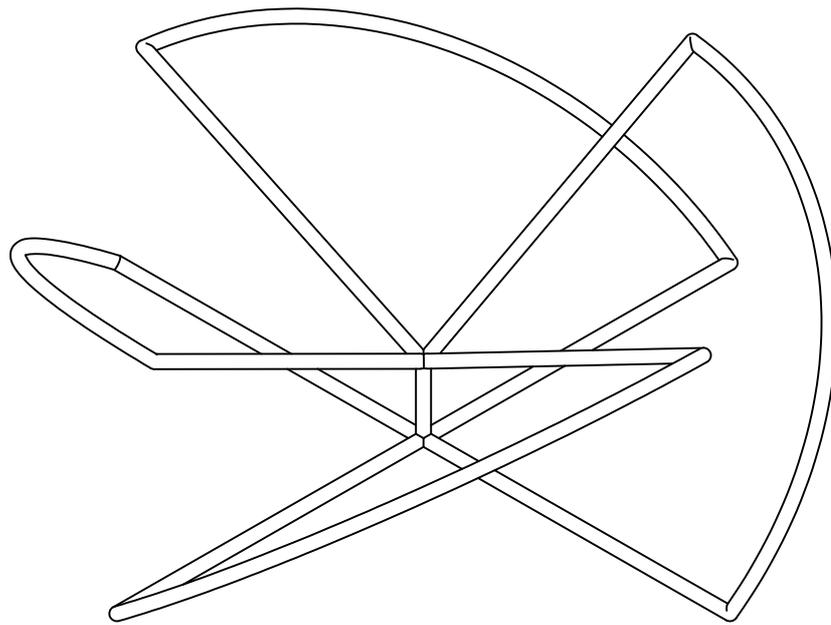
FECHA

21/08/2022

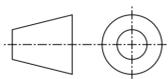
HOJA 3 DE 7

DIBUJADO

EVELYN LISSETH ROJANO FERNANDEZ



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



PROYECTO

ESTUDIO DEL ENERGY HARVESTING

ESCALA

DESCRIPCIÓN

2:1

SKEW PLANAR WHEEL

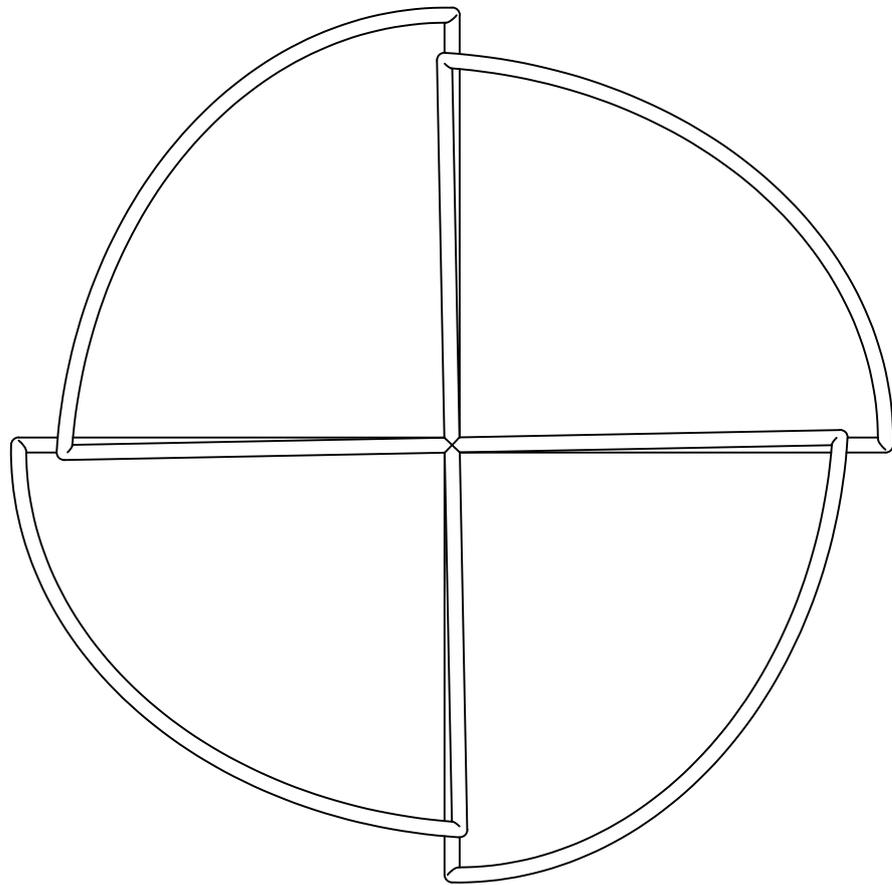
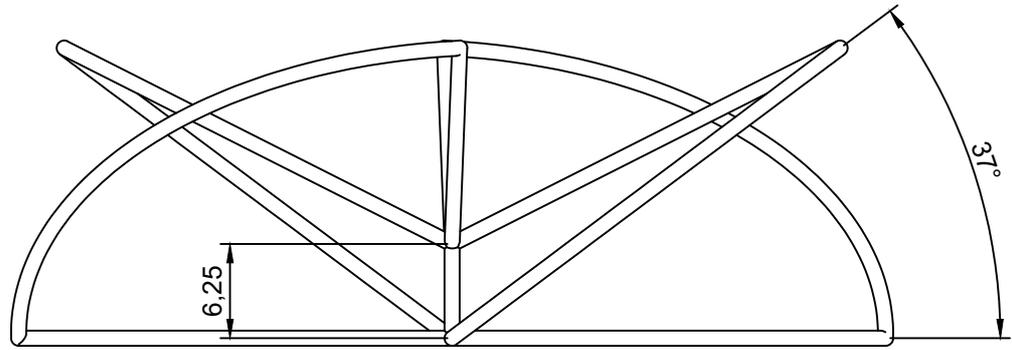
FECHA

20/08/2022

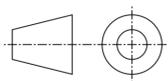
HOJA 4 DE 7

DIBUJADO

EVELYN LISSETH ROJANO FERNANDEZ



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



PROYECTO

ESTUDIO DEL ENERGY HARVESTING

ESCALA

DESCRIPCIÓN

2:1

SKEW PLANAR WHEEL

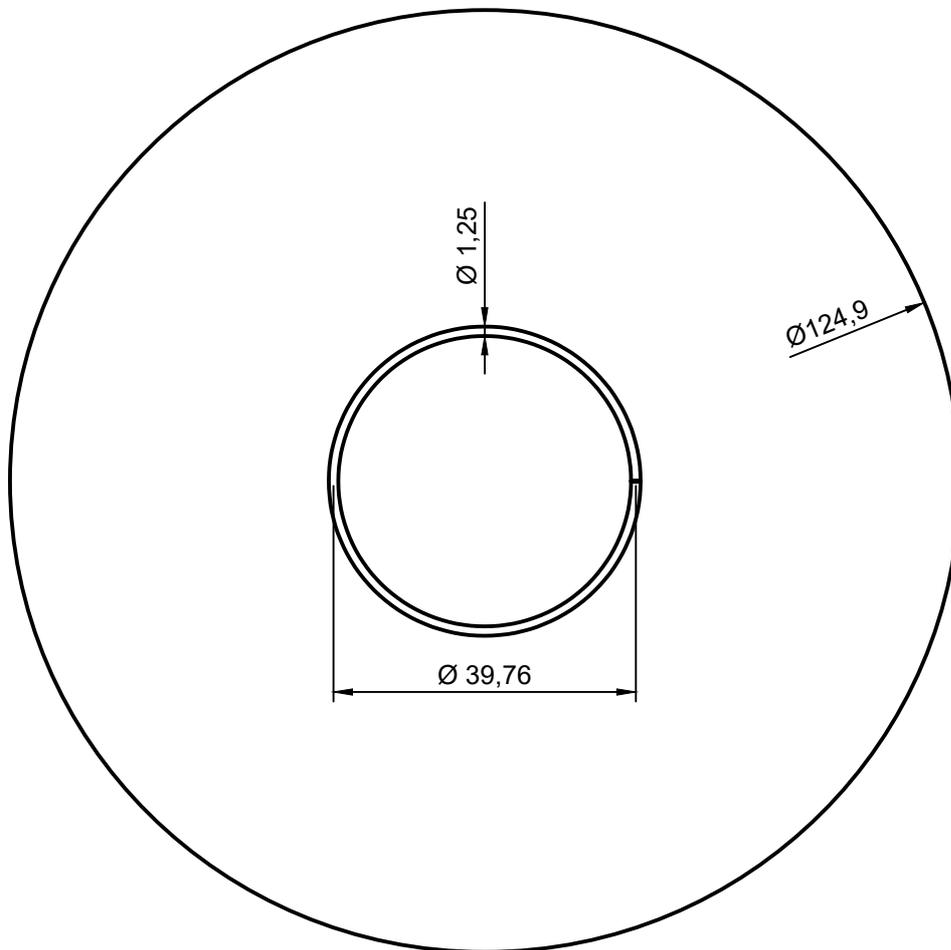
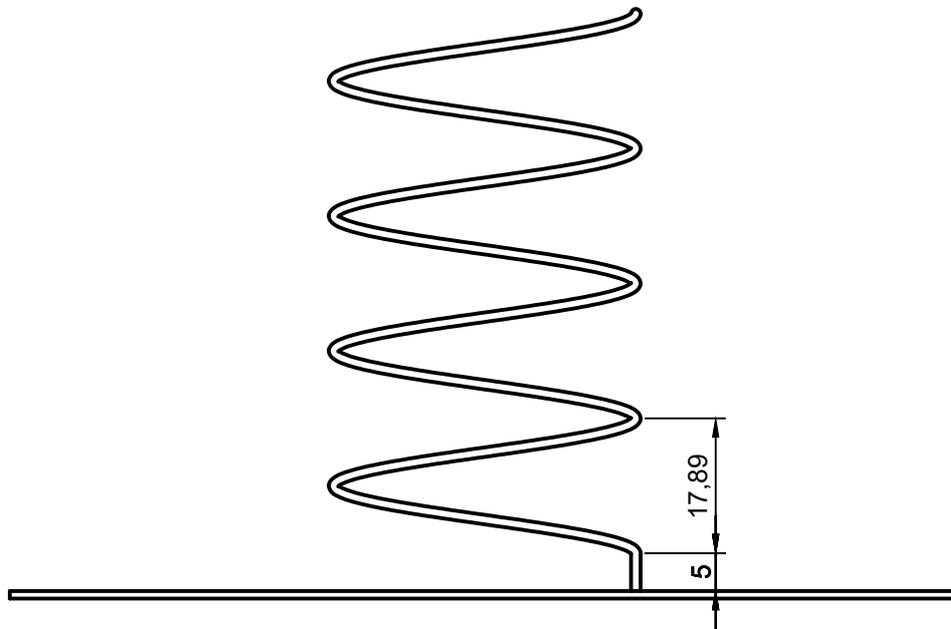
FECHA

20/08/2022

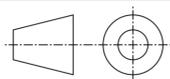
HOJA 5 DE 7

DIBUJADO

EVELYN LISSETH ROJANO FERNANDEZ



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



PROYECTO

ESTUDIO DEL ENERGY HARVESTING

ESCALA

DESCRIPCIÓN

1:1

AXIAL-MODE WIRE HELIX ANTENNA

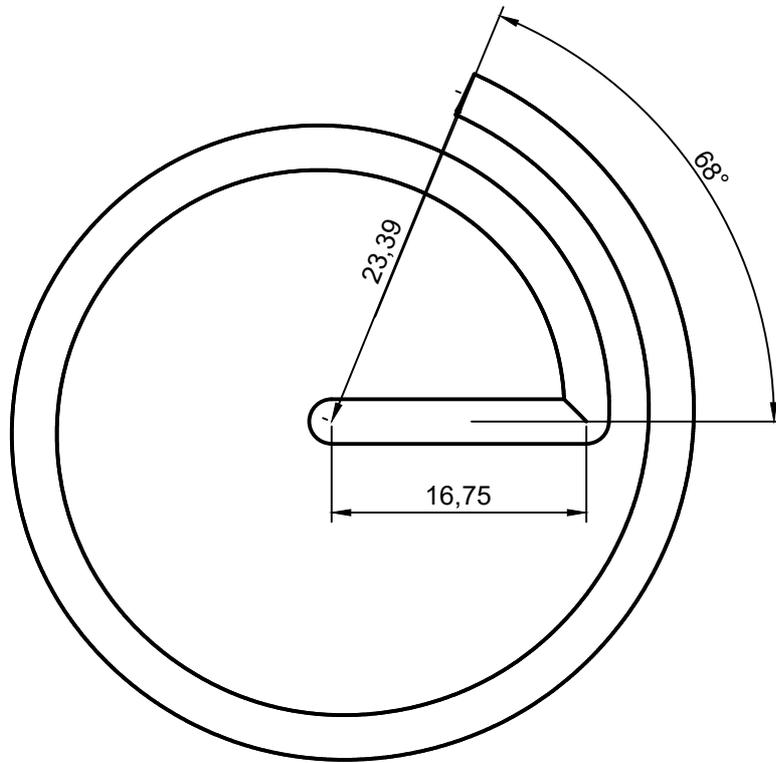
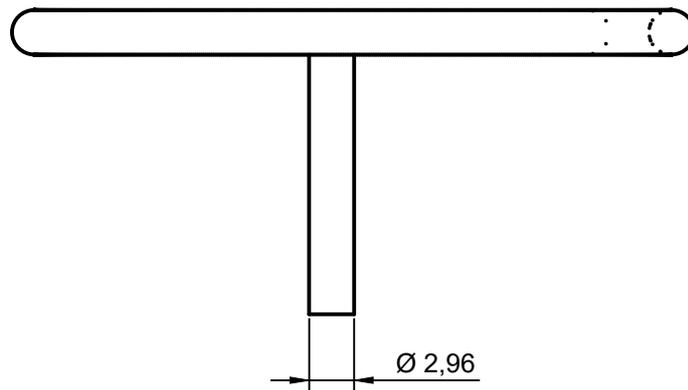
FECHA

20/08/2022

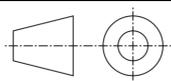
HOJA 6 DE 7

DIBUJADO

EVELYN LISSETH ROJANO FERNANDEZ



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



PROYECTO

ESTUDIO DEL ENERGY HARVESTING

ESCALA

DESCRIPCIÓN

2:1

WIRE CURL ANTENNA

FECHA

21/08/2022

HOJA 7 DE 7

DIBUJADO

EVELYN LISSETH ROJANO FERNANDEZ



DOCUMENTO 5: ANEXOS

1. The Drone Bird Company	82
1.1. Falcon Fixed-wing.....	82
1.2. Falcon Flapping-wing	83
1.3. Aquila	84
1.4. Larus.....	85

PERFORMANCE:

Max flight time 20 minutes
Max flight speed 75Km/h
Max windspeed constant 20kts; gusting 28kts

MEASUREMENTS:

Weight 850 grams; 900 grams with camera
Wingspan 112cm
Length 52 cm

ELECTRONICS:

LiPo battery
Telemetry

SAFETY:

Return-to-Launch, home or any chosen point
Auto-start automatic stable and controlled take-off
Loiter mode at any phase of flight
Ability to activate gliding mode at any flight phase
other than take-off phase

CAMERA: (optional)

Resolution: 720p
Framerate: 60fps
FOV: 150°

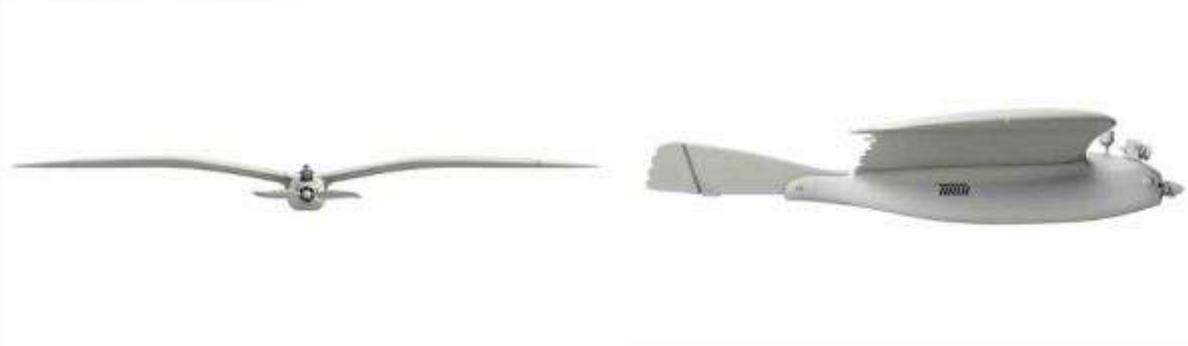
ANALOG (MICRO):

Latency: 4ms
Day/Night: Color/B&W
Image: 16:9 & 4:3 (switchable)



MATERIALS:

Carbon composite tail; 3D-printed, reinforced TPU body with carbon; laser-cut hand painted wings – EPP type coated with super thin rubber and reinforced with carbon; paint job customizable



PERFORMANCE:

Max flight time 10 minutes
Max flight speed 60km/h
Max windspeed constant 20kts; gusting 25kts

MEASUREMENTS:

Weight 800 grams; 850 with camera
Wingspan 112cm
Length 60 cm

ELECTRONICS:

Telemetry

SAFETY:

Return-to-Launch, home or any chosen point
Auto-start automatic stable and controlled take-off
Loiter mode at any phase of flight
Ability to activate gliding mode at any flight phase other than take-off phase

CAMERA: (optional)

Resolution: 720p
Framerate: 60fps
FOV: 150°

ANALOG (MICRO):

Latency: 4ms
Day/Night: Color/B&W
Image: 16:9 & 4:3 (switchable)



MATERIALS:

Carbon composite tail; 3D-printed, reinforced TPU body with carbon; laser-cut hand painted wings – EPP type coated with super thin rubber and reinforced with carbon; paint job customizable



PERFORMANCE:

Max flight time 90 minutes
Max flight speed 75km/h
Max windspeed constant 25kts; 28kts gusting
Cruise speed up to 43km/h (12m/s)
Range up to 40km
Operational radius of 15km
Payload max 500 grams
Operational ceiling 10,000m AMSL
Minimum covert height 50m
Temperature limits -10°C to +40°C
Real-time telemetry link
Automatic launch and landing
Various autonomous modes
Paint job customizable

MEASUREMENTS:

Weight 2.2 to 3.5 kilos
Wingspan up to 2.6m
Length 710 mm

ELECTRONICS:

Li-ion battery
Interchangeable sensor modules
Payload conform customer specification

APPLICATIONS:

Classical ISR – tactical observation, mapping and charting
Infrastructure control – critical infrastructure monitoring
Search and rescue – thermal and visible light search;
coordinate estimation
Surveying and remote sensing – orthomosaic, photo-
grammetry, mapping and surveying



PERFORMANCE:

Max flight time 90 minutes
Max flight speed 75km/h
Max windspeed constant 25kts; 28kts gusting
Cruise speed up to 43km/h (12m/s)
Range up to 40km
Operational radius of 15km
Payload max 500 grams
Operational ceiling 10.000m AMSL
Minimum covert height 50m
Temperature limits -10°C to +40°C
Real-time telemetry link
Automatic launch and landing
Various autonomous modes
Paint job customizable

MEASUREMENTS:

Weight 2.2 to 2.5 kilos
Wingspan up to 2.5m
Length 719 mm

ELECTRONICS:

Li-ion battery
Interchangeable sensor modules
Payload conform customer specification

APPLICATIONS:

Classical ISR – tactical observation, mapping and charting
Infrastructure control – critical infrastructure monitoring
Search and rescue – thermal and visible light search;
coordinate estimation
Surveying and remote sensing – orthomosaic, photo-
grammetry, mapping and surveying

