

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería de  
Telecomunicación



**Diseño de antena Fabry-Pérot para  
estimación cónica del ángulo de  
llegada en la banda de 5 GHz de Wi-Fi.**

José Daniel Martínez Guillén



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

Dirigido por: David Cañete Rebenaque  
José Luis Gómez Tornero



## Agradecimientos

Por un lado, me gustaría mencionar a mis directores de este trabajo de fin de grado: David Cañete Rebenaque y José Luis Gómez Tornero; sin olvidar a Miguel Poveda, que también me ha dirigido durante la realización de este. Sin ellos no habría adquirido los conocimientos necesarios para poder elaborarlo ni la capacidad de entender lo que estoy desarrollando. Me han apoyado de principio a fin, y no solo como profesores, sino también como compañeros. Gracias.

Por otro lado, también quiero mencionar a toda mi familia. En especial, agradecer a mi abuelo Agustín, que siempre será un referente para mí. Aunque no pueda estar aquí para verme, sé que le hubiera hecho muchísima ilusión porque así me lo transmitía año tras año; y estoy seguro de que desde el cielo me estará apoyando y ayudando. También me gustaría mencionar a mi abuela María, siempre con una sonrisa y tratando de ayudar a los demás.

No me olvido de mis amigos, tanto de los que conocía antes de empezar mi etapa universitaria como de los que he conocido aquí. Puedo estar orgulloso y contento de tener los amigos que tengo. Hemos pasado momentos increíbles y estoy seguro de que nos quedan muchos más.



## Tabla de contenido

1. Introducción.....	10
1.1. Resumen. ....	10
1.2. Objetivo.....	11
1.3. Estructura.....	11
2. Conceptos teóricos.....	14
2.1. Antenas de parche.....	14
2.2. Arrays.....	16
2.3. Antena Fabry-Pérot. ....	17
2.4. Sistema de localización. ....	19
2.4.1. GPS.....	19
2.4.2. Sistema radar monopulso. ....	20
2.5. Sistemas de coordenadas empleados.....	21
2.5.1. Coordenadas $\theta$ - $\phi$ .....	21
2.5.2. Coordenadas u-v.....	22
3. Desarrollo de la antena. ....	24
3.1. Establecimiento de las medidas de la antena Fabry-Pérot.....	25
3.1.1. Análisis modo TE.....	25
3.1.2. Análisis modo TM.....	32
3.1.3. Simulaciones finales.....	39
3.2. Análisis 1D bidireccional de la antena Fabry-Pérot. ....	40
3.2.1. Análisis modo TE.....	40
3.2.2. Análisis modo TM.....	43
3.3. Análisis final de la antena Fabry Pérot 2D. ....	47
4. Estimación de la localización. ....	54
4.1. Análisis de la función monopulso.....	54
4.1.1. Prueba de la función monopulso.....	55
4.1.2. Coordenadas $\theta$ - $\phi$ .....	58
4.1.3. Coordenadas u-v.....	59
4.2. Posición del dron y cálculo de la distancia.....	60
4.3. Pseudoespectro en coordenadas u-v. ....	62
5. Ejemplos de aplicaciones.....	64
6. Conclusión y líneas futuras.....	74
7. Bibliografía.....	80



## Tabla de figuras

Figura 1 Antena de parche [UDLAP] .....	14
Figura 2 Radiación en una antena de parche [Si-Ping Gao, 2015] .....	15
Figura 3 Ejemplo de array de antenas de parche [José Manuel Nieto Escribano, 2018] .....	16
Figura 4 Funcionamiento de un interferómetro Fabry-Pérot [sneikder, 2018] .....	17
Figura 5 Ejemplo de antena Fabry-Pérot [Giampiero Lovat, 2014] .....	17
Figura 6 Radiación en una antena Fabry-Pérot [Filippo Costa, 2017] .....	18
Figura 7 Ejemplo de satélite GPS [Daniel Marín, 2014] .....	19
Figura 8 Fundamentos del sistema GPS [GPS.GOV] .....	20
Figura 9 Ejemplo de sistema radar monopulso [Ignacio Álvarez Olmos, 2018] .....	21
Figura 10 Principio del sistema monopulso [Charly Whisky, 2014] .....	21
Figura 11 Sistema de coordenadas esférico [academic] .....	22
Figura 12 Sistema de coordenadas u-v [Frahaan Hussain] .....	22
Figura 13 Antena Fabry-Pérot .....	24
Figura 14 Media sección de la antena, caso de paredes eléctricas .....	25
Figura 15 Wave Port .....	26
Figura 16 Evolución del campo E .....	26
Figura 17 Gráficas del parámetro S11 según L y H2 .....	28
Figura 18 Gráficas del parámetro S21 según L y H2 .....	30
Figura 19 Parámetros S11 y S21 para valores de L y H2 escogidos .....	30
Figura 20 Directividad para f=5.2 GHz .....	31
Figura 21 Directividad para f=5.5 GHz .....	31
Figura 22 Directividad para f=5.8 GHz .....	31
Figura 23 Directividad normalizada .....	32
Figura 24 Directividad según el eje X e Y .....	32
Figura 25 Media sección de la antena, caso de paredes magnéticas .....	33
Figura 26 Wave ports .....	33
Figura 27 Evolución del campo E .....	34
Figura 28 Gráficas del parámetro S11 según L y H2 .....	35
Figura 29 Gráficas del parámetro S21 según L y H2 .....	37
Figura 30 Parámetros S11 y S21 para valores de L y H2 escogidos .....	37
Figura 31 Directividad para f=5.2 GHz .....	38
Figura 32 Directividad para f=5.5 GHz .....	38
Figura 33 Directividad para f=5.8 GHz .....	38
Figura 34 Directividad normalizada .....	39
Figura 35 Directividad según el eje X e Y .....	39
Figura 36 Sección de la antena, caso de paredes eléctricas .....	40
Figura 37 Alimentación de la antena .....	41
Figura 38 Directividad total para f=5.2 GHz .....	41
Figura 39 Directividad total para f=5.5 GHz .....	41
Figura 40 Directividad total para f=5.8 GHz .....	42
Figura 41 Directividad normalizada .....	42
Figura 42 Directividad según el eje X e Y .....	43
Figura 43 Evolución del campo E .....	43
Figura 44 Sección de la antena, caso de paredes magnéticas .....	44
Figura 45 Alimentación de la antena .....	44
Figura 46 Evolución del campo E .....	45

Figura 47 Directividad total para $f=5.2$ GHz .....	45
Figura 48 Directividad total para $f=5.5$ GHz .....	46
Figura 49 Directividad total para $f=5.8$ GHz .....	46
Figura 50 Directividad normalizada .....	46
Figura 51 Directividad según el eje X e Y.....	47
Figura 52 Antena Fabry-Pérot diseñada.....	47
Figura 53 Alimentación de la antena Fabry-Pérot .....	48
Figura 54 Evolución del diagrama de radiación con el aumento de la frecuencia .....	48
Figura 55 Diagrama de radiación en el plano XZ .....	49
Figura 56 Diagrama de radiación en el plano YZ .....	49
Figura 57 Diagrama de radiación para 5.1 GHz .....	50
Figura 58 Diagrama de radiación para 5.2 GHz .....	50
Figura 59 Diagrama de radiación para 5.3 GHz .....	50
Figura 60 Evolución de $\theta$ con la frecuencia .....	51
Figura 61 Directividad total en plano XZ para canales de interés .....	52
Figura 62 Directividad normalizada en plano XZ para canales de interés .....	52
Figura 63 Directividad total en plano YZ para canales de interés .....	53
Figura 64 Directividad normalizada en plano YZ para canales de interés.....	53
Figura 65 Directividad total para las frecuencias de interés .....	55
Figura 66 Directividad normalizada para las frecuencias de interés .....	56
Figura 67 Funciones monopulso .....	56
Figura 68 Zona lineal de las funciones monopulso.....	57
Figura 69 Pseudoespectro angular .....	58
Figura 70 Directividad total para cada frecuencia en coordenadas $\theta-\phi$ .....	58
Figura 71 Directividad total para cada frecuencia en coordenadas u-v .....	59
Figura 72 Comparación de la señal recibida con las funciones monopulso.....	60
Figura 73 Pseudoespectro angular para un caso específico.....	61
Figura 74 Posición del dron en coordenadas u-v para un caso específico.....	61
Figura 75 Pseudoespectro angular en coordenadas $\theta-\phi$ para un caso específico .....	62
Figura 76 Pseudoespectro angular en coordenadas u-v para un caso específico .....	63
Figura 77 Directividad total y valor máximo .....	64
Figura 78 Funciones y valores monopulso .....	65
Figura 79 Pseudoespectro y FoV.....	65
Figura 80 Localización obtenida en coordenadas u-v .....	66
Figura 81 Pseudoespectro en coordenadas u-v .....	66
Figura 82 Funciones y valores monopulso .....	67
Figura 83 Pseudoespectro y FoV.....	67
Figura 84 Localización obtenida en coordenadas u-v .....	68
Figura 85 Pseudoespectro en coordenadas u-v .....	68
Figura 86 Funciones y valores monopulso .....	69
Figura 87 Pseudoespectro y FoV.....	69
Figura 88 Localización obtenida en coordenadas u-v .....	70
Figura 89 Pseudoespectro en coordenadas u-v .....	70
Figura 90 Funciones y valores monopulso .....	71
Figura 91 Pseudoespectro y FoV.....	71
Figura 92 Localización obtenida en coordenadas u-v .....	72
Figura 93 Pseudoespectro en coordenadas u-v .....	72
Figura 94 Interfaz gráfica, datos cargados .....	74



Figura 95 Interfaz gráfica, establecida la posición del dron y RD modificado.....	75
Figura 96 Interfaz gráfica, dron posicionado.....	76
Figura 97 Interfaz gráfica, resultados ejemplo 1 .....	76
Figura 98 Interfaz gráfica, resultados ejemplo 2 .....	77
Figura 99 Interfaz gráfica, resultados ejemplo 3 .....	77



# 1. Introducción.

## 1.1. Resumen.

Los sistemas de posicionamiento global basados en constelaciones de satélites (GNSS), como el GPS, presentan una precisión habitual de unos pocos metros, lo cual es suficiente en multitud de aplicaciones y ha permitido su desarrollo comercial. Sin embargo, presentan limitaciones en entornos donde no alcanza la señal de los satélites y en aplicaciones que se requiere mayor precisión.

En el caso de aterrizaje autónomo de drones donde la plataforma tiene unas dimensiones limitadas, un error de precisión supone la pérdida del dispositivo por lo que es necesario obtener una precisión mayor de la que ofrece un GPS convencional. Si bien los dispositivos GPS comerciales disponibles para drones anuncian precisiones de hasta 0.5 metros, en la realidad raramente se puede obtener esa precisión (suele ser menor, es decir, más metros de error). Para solventar este problema existen algunas alternativas, como los sistemas RTK (Real Time Kinematic), que también se basan en la señal emitida por la constelación de los satélites. Este tipo de sistemas presentan dos inconvenientes: por un lado, son bastante caros; por otro lado, para que funcionen requieren unas condiciones de visibilidad de los satélites que no siempre se pueden conseguir.

Para abordar este problema, el presente trabajo de fin de grado pretende desarrollar un sistema de localización y aterrizaje autónomo de drones diseñando una antena Fabry-Pérot (FPA). En nuestro caso, la antena será de 23x23 parches y tendrá una longitud de 460x460 milímetros. Las antenas Fabry-Pérot generan diagramas de radiación muy directivos en su dirección perpendicular (broadside) con una estructura resonante sencilla formada por dos placas bidimensionales (una totalmente reflectante y otra parcialmente transparente). Además, tienen una característica inherente que nos proporciona un escaneo en frecuencia al variar esta, lo que permite emplearlas en aplicaciones de radar. El sistema estimará la localización del objetivo a partir de la recepción del nivel de señal (RSSI) usando un algoritmo de posicionamiento basado en la Dirección de Llegada (Direction of Arrival, DoA) también denominado Ángulo de Llegada (AoA).

Para obtener un buen sistema de localización, la antena estará orientada hacia arriba; siendo esta la plataforma de aterrizaje, y dadas sus características inherentes dispondremos de un mismo diagrama de radiación en cada antena, con un escaneo para distintas direcciones de apuntamiento según la frecuencia de trabajo. Para ello se propone operar en la banda WiFi de 5 GHz para configurar un sistema monopolso (trabajaremos de 5 a 6 GHz), la cual cuenta con diferentes canales según el rango de frecuencia en el que nos encontremos [Anexo].

El sistema estimará la localización del dron cuando se encuentre próximo a la plataforma de aterrizaje a partir de la recepción del nivel de señal RSSI y utilizando un algoritmo de posicionamiento basado en la dirección de llegada DoA. En nuestro caso, no obtendremos la posición exacta del dron, pero sabremos a qué distancia estaremos respecto a la plataforma de aterrizaje. A partir de dicha distancia, sabremos si al moverse el dron estaremos más o menos cerca del centro respecto a la posición anterior. Iterando, seremos capaces de llevar al dron al centro de la plataforma. Con el uso de unas sencillas operaciones aritméticas de procesado

digital monopolso, obtendremos una función de error de localización, a partir de la cual se estimará la distancia mencionada anteriormente.

Este trabajo propone el uso de una FPA que escanea su haz al variar la frecuencia de operación, es decir, usando la propiedad de "conical-beam frequency-scanning". Pasamos de hacer el estudio en 1D a 2D, cambiando el tamaño de los parches y la altura a la que situamos nuestro sustrato FR4 para que los resultados sean los esperados. Finalmente, con los diagramas obtenidos se programará en Matlab una técnica para estimar el ángulo de llegada de la señal WiFi, usando técnicas de procesamiento monopolso basado en la potencia recibida en cada canal.

Este proyecto es una continuación de los trabajos de fin de grado de Luis Miguel Martínez Tamargo y Eloy Andreu García. Luis Miguel utilizó una antena comercial que trabajaba en el canal WiFi de 5 GHz, mientras que Eloy mejora el diseño ampliando el FoV, usando antenas que escanean en frecuencia con un protocolo BLE sin comprometer la resolución angular usando antenas con haces muy anchos. Mi trabajo consiste en desarrollar esta vez una antena Fabry-Pérot con las dimensiones adecuadas para ayudar también en el aterrizaje asistido del dron.

## 1.2. Objetivo.

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo diseñar una antena que sea capaz de indicar y ayudar a un dron para su aterrizaje de forma autónoma, utilizando un sistema de dos coordenadas espaciales. La antena está formada por 3 milímetros de sustrato FR4, el cual tiene una permitividad relativa 4.48 y una tangente de pérdidas de 0.01. Sobre dicho sustrato están situados los numerosos parches cuadrados (23x23) de 16 milímetros de lado, quedando una antena también cuadrada de 460 milímetros de lado.

La banda de frecuencia que voy a utilizar es entre 5 y 6 GHz, basándome en la banda de 5 GHz conocida como WiFi 5, introducida en el estándar IEEE 802.11ac desde 2013. La ventaja de utilizar esta banda de frecuencia es que al no haber otras tecnologías que la utilicen, como Bluetooth, presenta muy pocas interferencias.

Para poder cumplir este objetivo, he tenido que realizar las siguientes tareas:

- Manejar el software HFSS.
- Diseñar y desarrollar la antena Fabry-Pérot sintonizada en la banda de 5 GHz de WiFi.
- Analizar los resultados obtenidos, tanto parámetros S como diagramas de radiación.
- Programación en Matlab de procesamiento monopolso usando la potencia recibida en cada canal para estimar la distancia angular al centro de la antena (ángulo cónico).
- Obtención de resultados que muestren en error angular en la estimación del ángulo cónico.
- Analizar los resultados obtenidos según diferentes posiciones del dron.

## 1.3. Estructura.

En esta primera parte se introduce un resumen general del proyecto, que consiste en el aterrizaje autónomo de drones basándonos en antenas Fabry-Pérot; además de un resumen de los objetivos principales que abarcan este trabajo de fin de grado.

En el siguiente punto se explicarán los conceptos teóricos de interés para la realización de este trabajo de fin de grado. Abarcaremos la tecnología que se va a usar y la teoría de los sistemas monopolso que nos ayudarán en el aterrizaje autónomo del dron.

En el tercer punto se explicará el desarrollo de la antena, mostrando los diferentes análisis que se han ido desarrollando hasta obtener el diseño y las medidas de la antena completa, mostrando los resultados y los diagramas que se van obteniendo.

El cuarto punto tendrá en cuenta el análisis del sistema monopolso y todo su procesado, mostrando cómo es posible determinar la distancia de nuestro dron al centro de la plataforma de aterrizaje utilizando diagramas u-v.

Finalmente, en el último punto se mostrará un análisis de los resultados y una conclusión, determinando si realmente la antena Fabry-Pérot es útil para la finalidad que abarca este proyecto.



## 2. Conceptos teóricos.

### 2.1. Antenas de parche.

Las antenas de parche son una estructura fácil de implementar, además de ser barata; y es por eso por lo que se utilizan a la hora de construir arrays. Esta tecnología está ligada a las líneas microstrip, y su procedencia deriva de dicha tecnología. La diferencia entre ambas tecnologías es que en las líneas microstrip se busca evitar las radiaciones, mientras que en las antenas de parche se busca el efecto contrario.

En su configuración más simple, una antena de parche está formada por un dieléctrico sobre el que se sitúa un parche metálico. Al otro lado del dieléctrico se situaría un plano de masa. Podemos ver esta configuración en la siguiente imagen:

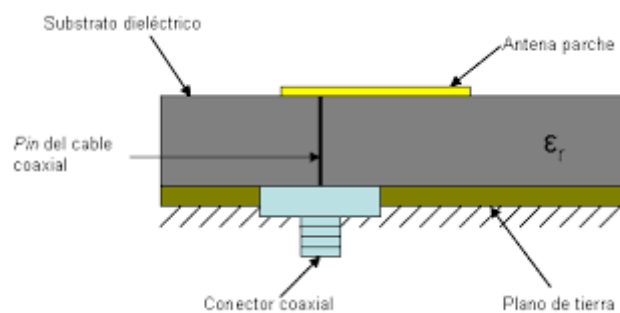


Figura 1 Antena de parche [UDLAP]

El parche puede tener cualquier forma, aunque en nuestro caso vamos a usar parches cuadrados por comodidad (16 milímetros de lado). En cuanto al substrato dieléctrico, vamos a trabajar con 3 milímetros de FR4 (permitividad relativa de 4.48 y tangente de pérdidas de 0.01). Por otro lado, la altura a la que vamos a situar el substrato respecto al plano de masa es de 28 milímetros. El análisis de por qué se han elegido estas medidas se verá más adelante.

El funcionamiento de una antena de parche se puede explicar a partir del funcionamiento de una cavidad resonante.

Una cavidad resonante ideal no presenta pérdidas y almacena energía eléctrica y magnética por igual; sin embargo, si vamos a un caso real, cualquier cavidad resonante presenta ciertas pérdidas provenientes de los elementos pasivos.

En un caso ideal, sin pérdidas, las cavidades resonantes se consiguen con volúmenes cuyas condiciones de contorno únicamente admiten las soluciones correspondientes a onda estacionaria, de las ecuaciones de Maxwell; y que se dan para ciertas frecuencias a las que se las llama frecuencias de resonancia. En un caso real, vamos a obtener un rango más amplio de frecuencias para las que son válidas las ecuaciones de Maxwell.

Las cavidades resonantes suelen formarse bajo condiciones de paredes eléctricas y magnéticas:

- Una pared eléctrica es una superficie con campo eléctrico tangencial nulo, característica propia de un conductor perfecto y que se suele relacionar con la condición de cortocircuito en teoría de circuitos.

- Una pared magnética, por el contrario, es una superficie con campo magnético tangencial nulo y se suele relacionar en teoría de circuitos con la condición de circuito abierto.

Cuando una onda electromagnética incide sobre una pared eléctrica o magnética, se produce reflexión total y se forma una onda estacionaria.

Teniendo en cuenta que podemos analizar la antena de parche a partir de la línea microstrip, podemos realizar un análisis desde la perspectiva de una línea de transmisión. En esta estructura, se imponen condiciones de contorno que únicamente pueden satisfacerse con soluciones específicas de onda electromagnética, clasificadas en modos. Estas soluciones dependerán de la longitud de nuestra línea. Existen tres tipos de modos:

- Modo TEM (transversal electromagnético): campos eléctrico y magnético transversales son nulos en las condiciones de contorno.
- Modo TE (transversal eléctrico): las soluciones derivan del campo magnético con la condición de que el campo eléctrico transversal sea nulo en las condiciones de contorno.
- Modo TM (transversal magnético): las soluciones derivan del campo eléctrico con la condición de que el campo magnético transversal sea nulo en las condiciones de contorno.

La antena de parche se comporta como una cavidad resonante compuesta por dos paredes eléctricas (el plano de masa y el parche) y cuatro paredes magnéticas.

Las frecuencias de resonancia se obtienen a partir de las ecuaciones que imponen las condiciones de contorno y la ecuación de ondas, derivada de las ecuaciones de Maxwell.

En cuanto a la radiación de este tipo de antenas, se relaciona directamente con las pérdidas de la cavidad. La potencia que se pierde es la potencia radiada. La onda se propaga a lo largo de la antena, teniendo pérdidas en su camino; y esta potencia que se pierde es la que se radia al exterior.

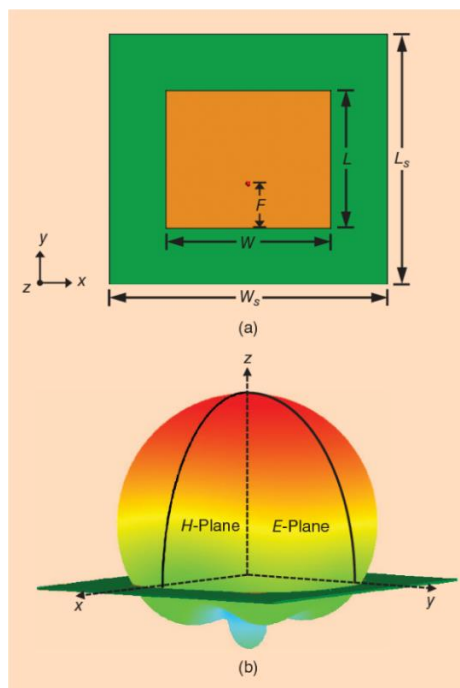


Figura 2 Radiación en una antena de parche [Si-Ping Gao, 2015]



Las principales ventajas de las antenas de parche son su bajo coste, su bajo peso, su sencillez a la hora de fabricarlas y que presentan una estructura plana. Sin embargo, también presentan algunas desventajas. Estas desventajas son que excitan ondas de superficie que conviene eliminar, presentan modos de alto orden, son de banda estrecha, tienen una baja eficiencia y tienen una baja pureza de polarización.

## 2.2. Arrays.

Un array consiste en la agrupación de varias antenas iguales, cuyas contribuciones individuales de potencia se suman y dan lugar a un nuevo diagrama de radiación. Generalmente, el nuevo diagrama de radiación del array será más directivo que la antena individual.

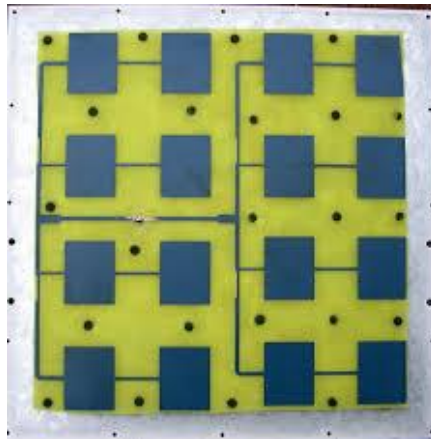


Figura 3 Ejemplo de array de antenas de parche [José Manuel Nieto Escribano, 2018]

Según cómo se coloquen los diferentes elementos del array, podemos separar tres tipos:

- Lineales: elementos agrupados en una línea.
- Planos: elementos agrupados en forma de matriz.
- Conformados: elementos situados sobre superficies con relieve.

Una antena es una fuente de radiación electromagnética, cuyas ondas siguen una propagación esférica que se puede simplificar con la siguiente ecuación:

$$\vec{E}_{rad} = E_0(\vec{r}) * e^{j*k*\vec{r}*\hat{r}}$$

Donde  $k$  es la constante de propagación de la onda y  $\hat{r}$  es la coordenada correspondiente al radio en coordenadas esféricas.

El campo radiado por el array será la suma de los campos radiados individuales. Si suponemos que los elementos del array son iguales y están equiespaciados, el campo eléctrico de cada uno en un mismo punto se diferenciará únicamente en la fase asociada al eje  $\hat{z}$ .

Podemos definir un factor de array FA a partir de la siguiente expresión:

$$FA(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N e^{j*k*i*d*\hat{z}*\hat{r}}$$

Este factor de array nos ayuda a definir el diagrama de radiación de la forma:

$$DR(\theta, \Phi) = DR(\theta, \Phi)_{elemento} * |FA|^2$$

El motivo por el que el factor de array aparece en factor absoluto es porque nos interesa un análisis a nivel de potencias (diagrama de radiación), y no de campos.

### 2.3. Antena Fabry-Pérot.

El nombre de este tipo de antena viene de la similitud que hay entre la disposición de los elementos y los de un interferómetro Fabry-Pérot, utilizado en óptica. El funcionamiento del interferómetro se basa en dos espejos situados en paralelo a cierta distancia, que permiten el almacenamiento y la reflexión y transmisión de luz.

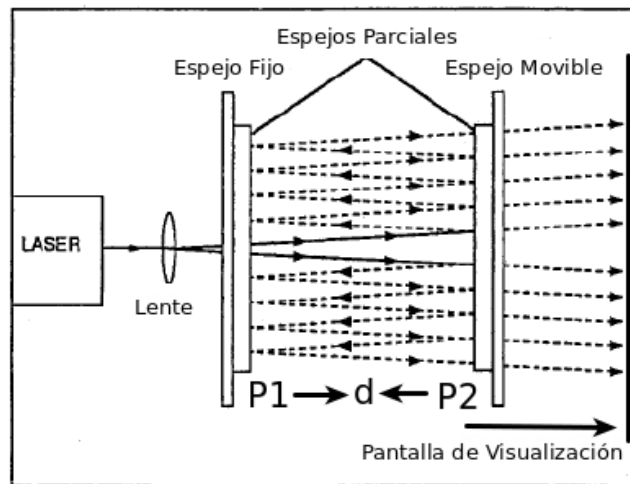


Figura 4 Funcionamiento de un interferómetro Fabry-Pérot [sneikder, 2018]

La antena Fabry-Pérot está formada por un sustrato dieléctrico limitado por un plano de masa y por una superficie parcialmente reflexiva. Se produce una excitación desde dentro, incorporando un tipo de antena como fuente. Esta excitación puede ser, por ejemplo, un dipolo eléctrico. En nuestro caso tendremos un dipolo polarizado en el eje  $\hat{y}$ .

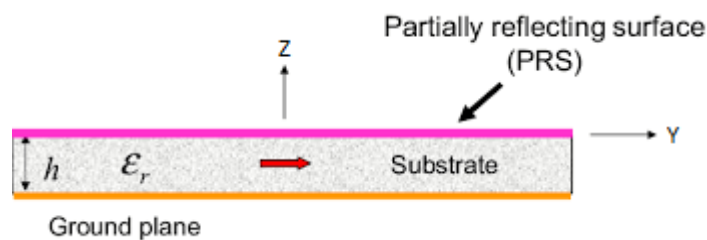


Figura 5 Ejemplo de antena Fabry-Pérot [Giampiero Lovat, 2014]

La antena Fabry-Pérot produce un diagrama muy directivo y, junto con su sencillez de fabricación y su bajo coste, la convierten en una antena muy interesante para múltiples aplicaciones.

El funcionamiento de este tipo de antena se puede explicar por teoría de rayos y por teoría de ondas:

- Modelo de rayos: se considera la fuente del interior como un emisor de rayos de luz que se propagan en todas las direcciones. A partir de cada rayo, se produce un fenómeno de difracción y reflexión en la interfaz de separación entre el sustrato y la superficie parcialmente reflexiva, de forma que los rayos transmitidos en el aire lo hacen con un ángulo menor respecto al eje  $\hat{z}$  y con una mayor directividad. Debido a que la fuente

que produce la excitación de la cavidad no es un emisor de rayos de luz, es necesario utilizar también un modelo alternativo. Este modelo es el modelo de Leaky-waves o modelo de ondas.

- Modelo de Leaky-waves: para explicar la radiación que se produce en la antena debemos recurrir a las conocidas ondas de fuga o leaky waves. Este tipo de ondas son ondas electromagnéticas guiadas que dejan escapar potencia conforme se propagan. El escape de energía se produce cuando la estructura tiene alguna vía de escape. La fuga se representa en forma de pérdidas, que será la potencia radiada. Por este motivo, el número de onda en la dirección de propagación consta de dos partes:

$$\gamma = \beta - j * \alpha$$

B se corresponde a la constante de propagación, mientras que  $\alpha$  es la magnitud referida a las pérdidas (radiación de nuestra antena). Este modelo de ondas de fuga explica perfectamente el funcionamiento de la antena Fabry-Pérot; sin embargo, se utiliza también el modelo de rayos por su sencillez y para explicar el diseño de la estructura.

El principal motivo por el que se recurre a este tipo de antenas es obtener un diagrama de radiación directivo.

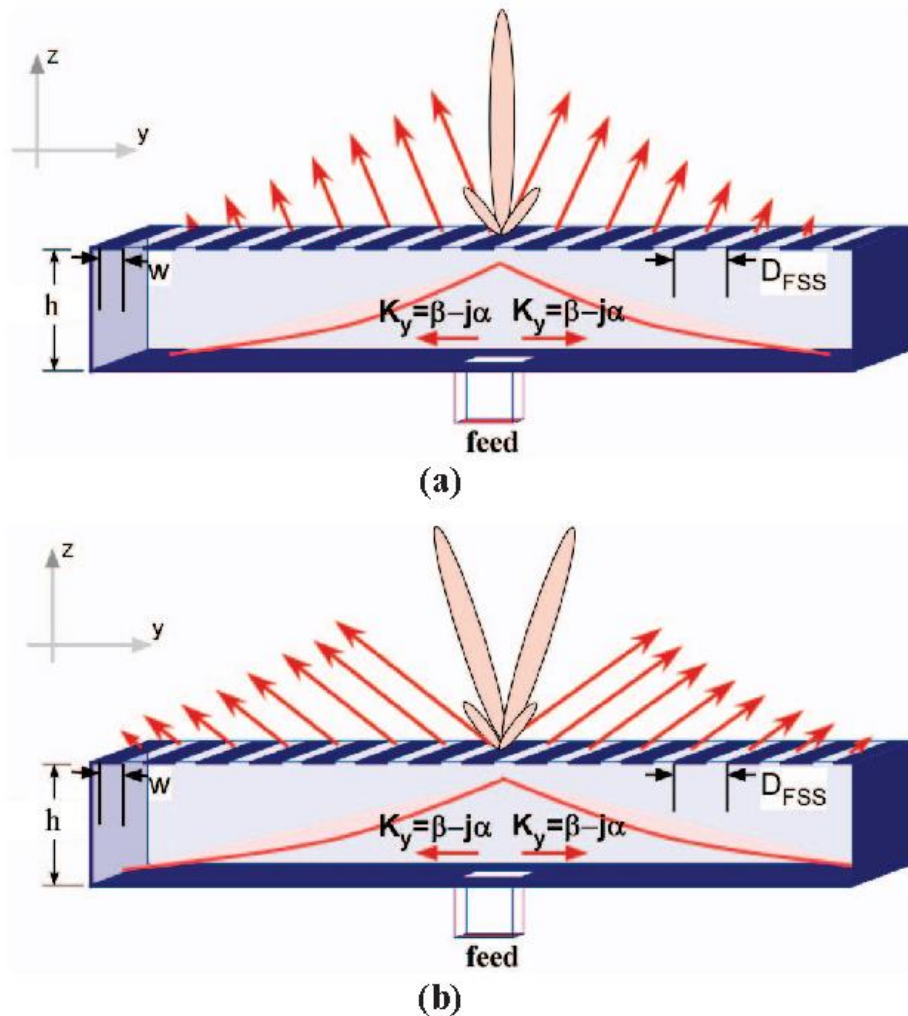


Figura 6 Radiación en una antena Fabry-Pérot [Filippo Costa, 2017]

## 2.4. Sistema de localización.

En este proyecto se van a usar dos sistemas de localización:

- Primero utilizaremos GPS con el fin de que el dron se sitúe en una zona determinada por las coordenadas terrestres de la localización de la antena. Dicha área tendrá un amplio radio para intentar evitar los posibles errores de posicionamiento que presenta la localización GPS.
- Después recurriremos a un sistema radar monopulso que se encargará del aterrizaje autónomo del dron, calculando la distancia de este al centro de la plataforma de aterrizaje.

Nuestro sistema de localización se basa en la detección del ángulo  $\theta$  de las coordenadas  $\theta$ - $\phi$  a partir del nivel de potencia recibido para cada frecuencia, obteniendo así la circunferencia de posibles posiciones en las que se encuentra el dron respecto al centro de la plataforma de aterrizaje. A partir de estos datos y tomando el dron varias posiciones, sabremos si nos estamos alejando o acercando al centro, para así poder llegar con precisión a la posición deseada.

### 2.4.1. GPS.

GPS son las siglas de Global Position System, es decir, Sistema de Posición Global. Este sistema permite conocer la posición tridimensional (longitud, latitud y altitud) de cualquier objeto o persona con cierta precisión (puede haber un error de unos pocos metros). Utiliza, generalmente, satélites de tipo MEO (satélites de órbita media) y una red de al menos 24 satélites con órbitas distribuidas para que haya, como mínimo, 4 satélites visibles por parte del receptor. Esto se debe a que, para determinar la posición, se utilizan 4 satélites o más y la trilateración, por lo que si no tuviéramos contacto visual con esos 4 satélites no podríamos saber en qué punto nos situamos. Cuantos más satélites se utilicen, mayor será la precisión de la localización; pero es necesario que en todo momento y en cualquier punto de la tierra haya al menos 4 satélites visibles.



*Figura 7 Ejemplo de satélite GPS [Daniel Marín, 2014]*

El sistema funciona de forma que el receptor localiza automáticamente, como mínimo, los 4 satélites necesarios y recibe de éstos unas señales que le indican la identificación y hora de cada uno de ellos y la información de la constelación. Con esta información, se calcula el tiempo que tardan las señales en llegar al receptor y, utilizando trilateración, el propio receptor calcula su posición.

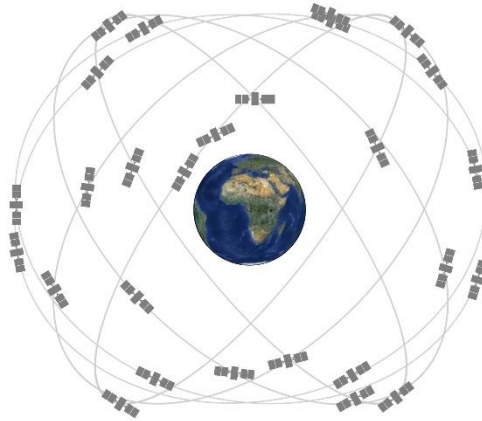


Figura 8 Fundamentos del sistema GPS [GPS.GOV]

GPS nos proporciona excelentes resultados para conocer la ubicación en la que nos encontramos; sin embargo, el poder tener un error de unos pocos metros hace que un sistema GPS no pueda usarse en nuestra aplicación. Un error de 1 metro supondría no aterrizar en la plataforma de interés y caer en otra ubicación distinta.

Existen mejoras del sistema GPS como el GPS diferencial (proporciona mayor precisión, disminuyendo el error a centímetros), pero la solución propuesta en este trabajo de fin de grado es más económica; ya que un sistema DGPS (siglas del GPS diferencial) sería muy costoso económicamente.

#### 2.4.2. Sistema radar monopolso.

Los sistemas radar monopolso se utilizan para múltiples aplicaciones que abarcan desde el control civil del tránsito aéreo hasta ciertas aplicaciones militares. Su principal objetivo es la medición y el seguimiento del ángulo de llegada (AoA) o dirección de llegada (DoA). La posición angular se obtiene comparando las señales recibidas en dos o más haces simultáneos.

El término *monopolso* proviene de la capacidad del sistema de obtener la posición angular utilizando únicamente un pulso. En la práctica, se utilizan varios pulsos para mejorar la precisión de la medida que estamos realizando: la dirección de llegada o DoA.

La principal ventaja de estos sistemas es que su funcionamiento no se ve demasiado alterado si se producen fluctuaciones de potencia, ya que la información del DoA se obtiene comparando las señales recibidas por varios haces en un instante de tiempo. Si la amplitud de la señal cambia, lo hace en todos los canales del receptor por igual, por lo que al comparar las señales no afectará dicha fluctuación.

Los sistemas monopolso pueden basarse en la comparación de la amplitud, en la comparación de la fase o en una combinación de ambas comparaciones. Sin embargo, en este proyecto vamos a trabajar con un sistema monopolso de comparación de amplitud.

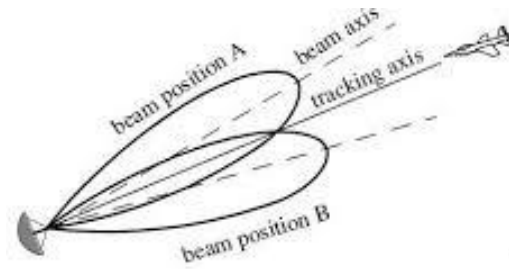


Figura 9 Ejemplo de sistema radar monopulso [Ignacio Álvarez Olmos, 2018]

El sistema monopulso de comparación de amplitud debe tener dos antenas con patrones superpuestos y sus direcciones de haz principal entrelazadas en cierto ángulo. A partir de esto, se obtienen dos patrones resultantes sumando y restando las señales de cada antena.

Los radares monopulso son similares a los sistemas de exploración cónicos, pero se encargan de dividir el haz en partes y luego enviar las dos señales resultantes. Al recibir las señales reflejadas, que han modificado su amplitud por igual, se comparan entre sí. Esto indica en qué dirección tiene un retorno más fuerte y, por lo tanto, se obtiene la dirección del dron respecto al centro de nuestra antena.

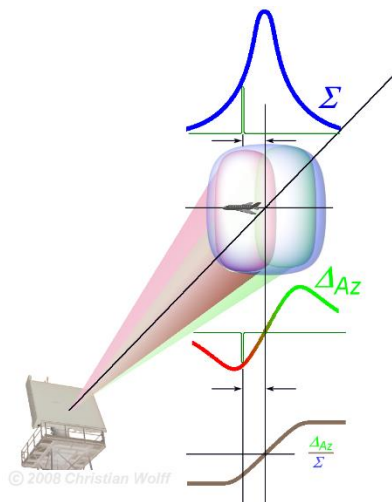


Figura 10 Principio del sistema monopulso [Charly Whisky, 2014]

## 2.5. Sistemas de coordenadas empleados.

### 2.5.1. Coordenadas $\theta$ - $\phi$ .

Este sistema de coordenadas se trata del sistema de coordenadas esférico. Se basa en las coordenadas polares y utiliza dos ángulos y una distancia para determinar la posición de un punto. Estas medidas son el radio  $r$ , el ángulo polar  $\theta$  y el ángulo azimutal  $\phi$ .

En este proyecto, vamos a utilizar tanto el ángulo azimutal como el ángulo polar; siendo este último el que vamos a calcular para determinar la posición del dron.

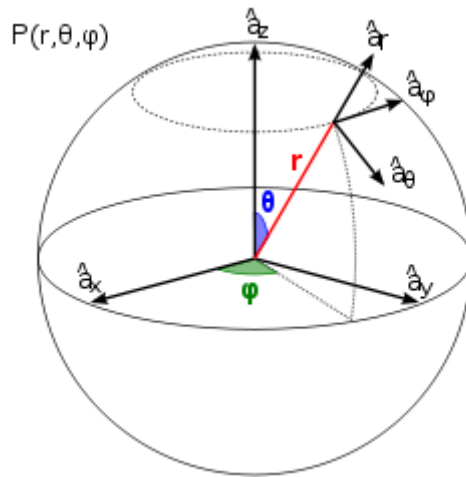


Figura 11 Sistema de coordenadas esférico [academic]

### 2.5.2. Coordenadas u-v.

El espacio de coordenadas u-v se puede obtener mediante las coordenadas  $\theta$ - $\phi$  obtenidas previamente aplicando una fórmula para cada coordenada.

$$u = \sin(\theta) * \cos(\phi)$$

$$v = \sin(\theta) * \sin(\phi)$$

Al estar determinadas ambas coordenadas por senos y cosenos, el valor máximo que puede tomar cada una es de 1. Nos sirve para tener una vista desde la parte superior del sistema de radiación.

Este sistema de coordenadas se suele emplear para el mapeado de texturas.

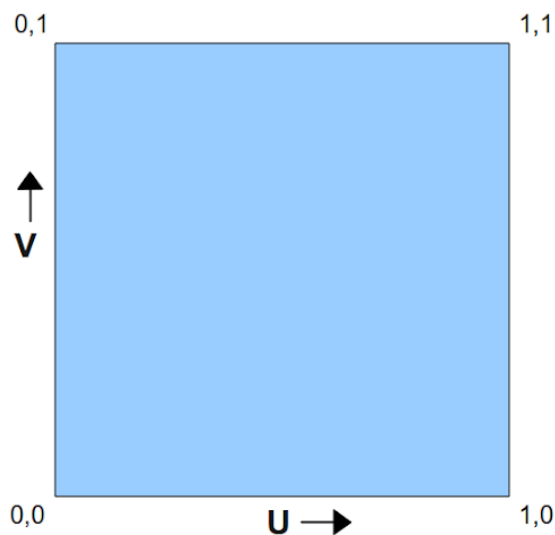


Figura 12 Sistema de coordenadas u-v [Frahman Hussain]





### 3. Desarrollo de la antena.

Sabemos que nuestra antena Fabry-Pérot va a estar compuesta por una capa de sustrato FR4, el cual presenta una permitividad relativa de 4.48 y una tangente de pérdidas dieléctrica de 0.01, y sobre el que se van a situar los parches. Desconocemos el tamaño de los parches, pero sí conocemos que vamos a dividir la antena en zonas de 20x20 milímetros y en cada zona vamos a situar un parche. La antena total será cuadrada (para tener simetría) de 460 milímetros de lado, y una medida que tendremos que optimizar será el tamaño de los parches ya mencionado para conseguir los resultados que buscamos.

Debajo del sustrato, tendremos una capa de un material esponjoso que podemos simplificar como aire, ya que tiene unas propiedades muy similares. Debajo de dicho material es donde se colocará el plano de masa; y la altura del sustrato al plano de masa será otro parámetro que tendremos que optimizar simultáneamente para que el resultado de los diagramas de radiación sea válido en nuestra aplicación.

La antena estará excitada desde el centro con una tensión polarizada en el eje  $\hat{y}$ , y colocada a una altura media entre el plano de masa y la PRS; aunque a lo largo del diseño, al hacerlo por partes, iremos situando diferentes formas de excitación, como wave ports.

A continuación, se muestra la idea de la antena Fabry-Pérot final:

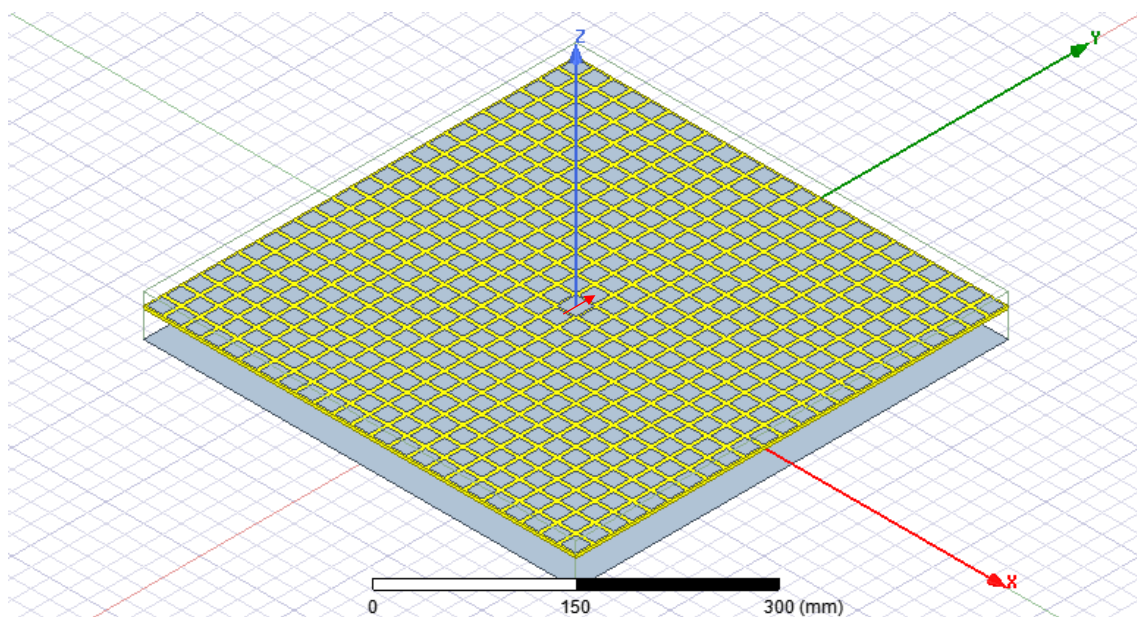


Figura 13 Antena Fabry-Pérot

A partir de esta antena, para simplificar su diseño, debemos analizarla por partes. La primera división que podemos hacer es escoger una única fila de parches del eje  $\hat{y}$  y otra fila del eje  $\hat{x}$ . La alimentación está polarizada en el eje  $\hat{y}$ , es por eso por lo que para el caso de la fila de parches situada en el eje  $\hat{x}$  hay que colorar paredes eléctricas alrededor de la antena, mientras que para el caso perpendicular debemos colocar paredes magnéticas.

Además de hacer esta división, podemos también analizar por separado en un inicio únicamente media fila de parches; es decir, desde el origen del sistema de coordenadas cartesiano representado en la figura anterior hasta el límite de la antena, tanto para el caso de paredes eléctricas como para el caso de paredes magnéticas.

### 3.1. Establecimiento de las medidas de la antena Fabry-Pérot.

Para obtener tanto el tamaño de los parches, como la altura a la que situaremos el sustrato FR4 del plano de masa, vamos a dividir el diseño en varias partes más sencillas.

Debido a la simetría de la antena final, podemos escoger únicamente una fila de parches para comprobar el buen funcionamiento de la antena total. Si los resultados son óptimos para una sección, lo serán también cuando simulemos la antena completa.

Gracias también a la simetría de cada sección, podemos empezar viendo la mitad de una de esas secciones. De esta forma, podremos empezar por un diseño sencillo y más fácil de simular, pudiendo así observar una mayor cantidad de resultados para escoger el óptimo. El diagrama de radiación debería ser simétrico, al igual que la antena, a ambos lados de la fuente de excitación de la antena.

#### 3.1.1. Análisis modo TE.

El primer paso es realizar un estudio paramétrico de una media sección de las mencionadas anteriormente y observar los parámetros S de la simulación. Para ello, vamos a usar el software HFSS, que nos ofrece la posibilidad de simular cualquier tipo de antena para después comprobar cualquier información de los resultados que nos interese.

Como la alimentación de nuestra antena será polarizada en el eje  $\hat{y}$ , tenemos que ver por separado las secciones cuya longitud abarca el  $\hat{y}$  y las secciones en las que lo hace en el eje  $\hat{x}$ . En un caso, situaremos una pared eléctrica alrededor de la antena; mientras que en el otro caso vamos a tener una pared magnética.

Primero, vamos a ver el caso en que el tenemos paredes eléctricas a lo largo de la sección de la antena. El diseño que tenemos es el siguiente:

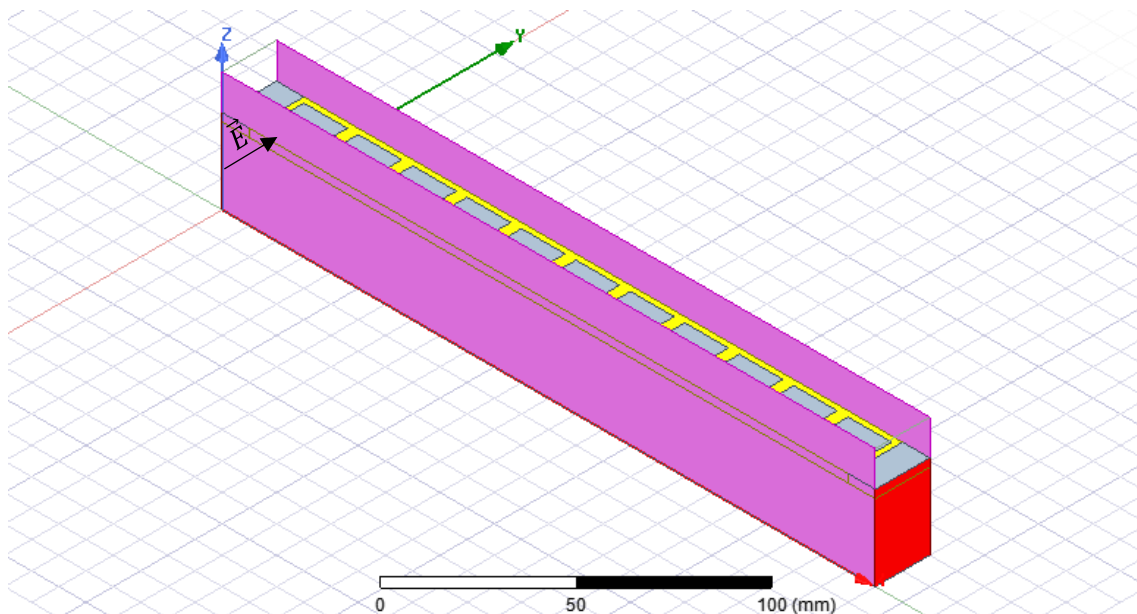


Figura 14 Media sección de la antena, caso de paredes eléctricas

En esta representación, he escogido el color amarillo para representar el sustrato FR4; el color gris para representar los parches y el plano de masa, aunque éste último no pueda apreciarse

en la imagen; el color rojo para representar los puertos (wave ports); y el rosa para la pared eléctrica (conductor perfecto) en este caso.

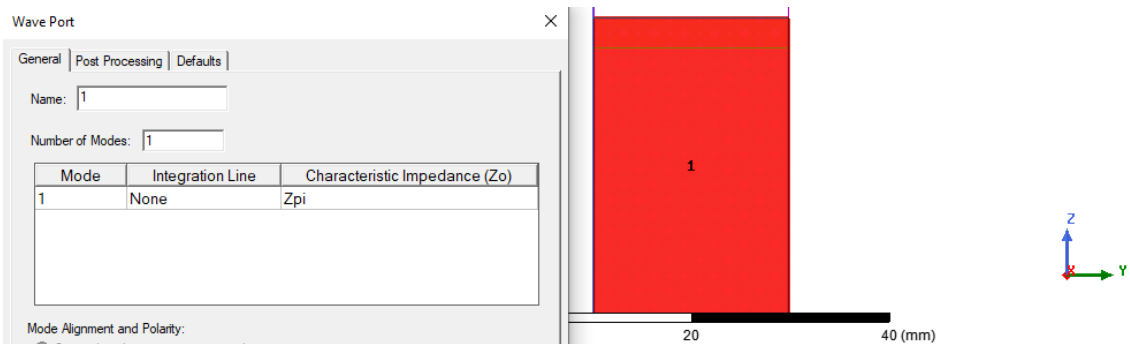


Figura 15 Wave Port

El campo eléctrico  $\vec{E}$  está polarizado en el eje  $\hat{y}$ , mientras que el campo magnético  $\vec{H}$  tomará dirección perpendicular y estará situado en el plano XZ. Podemos ver el campo  $\vec{E}$  en la siguiente figura:

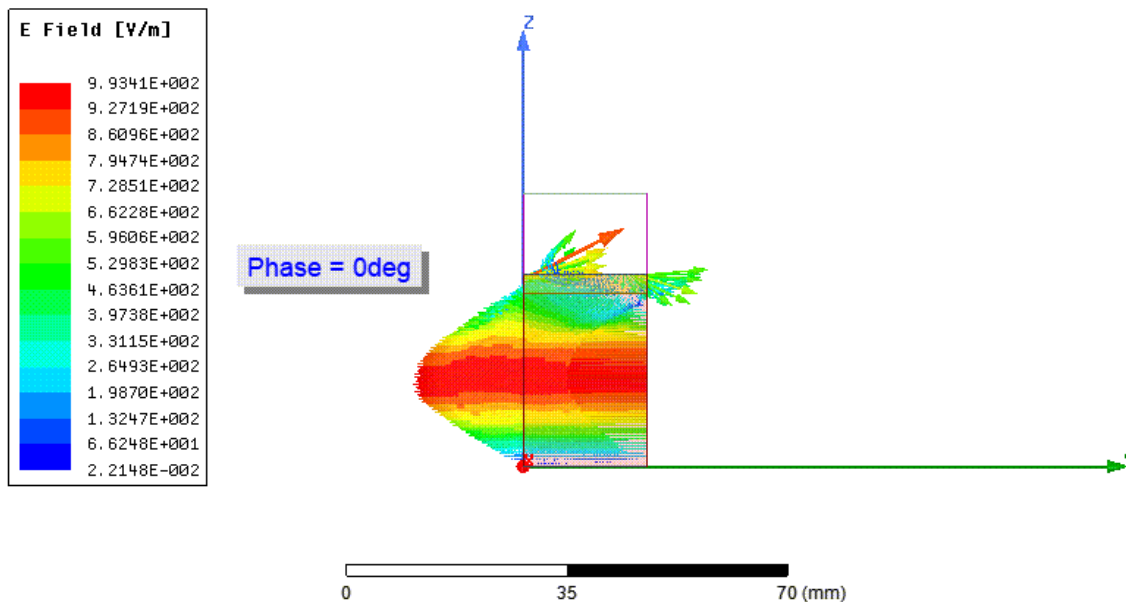


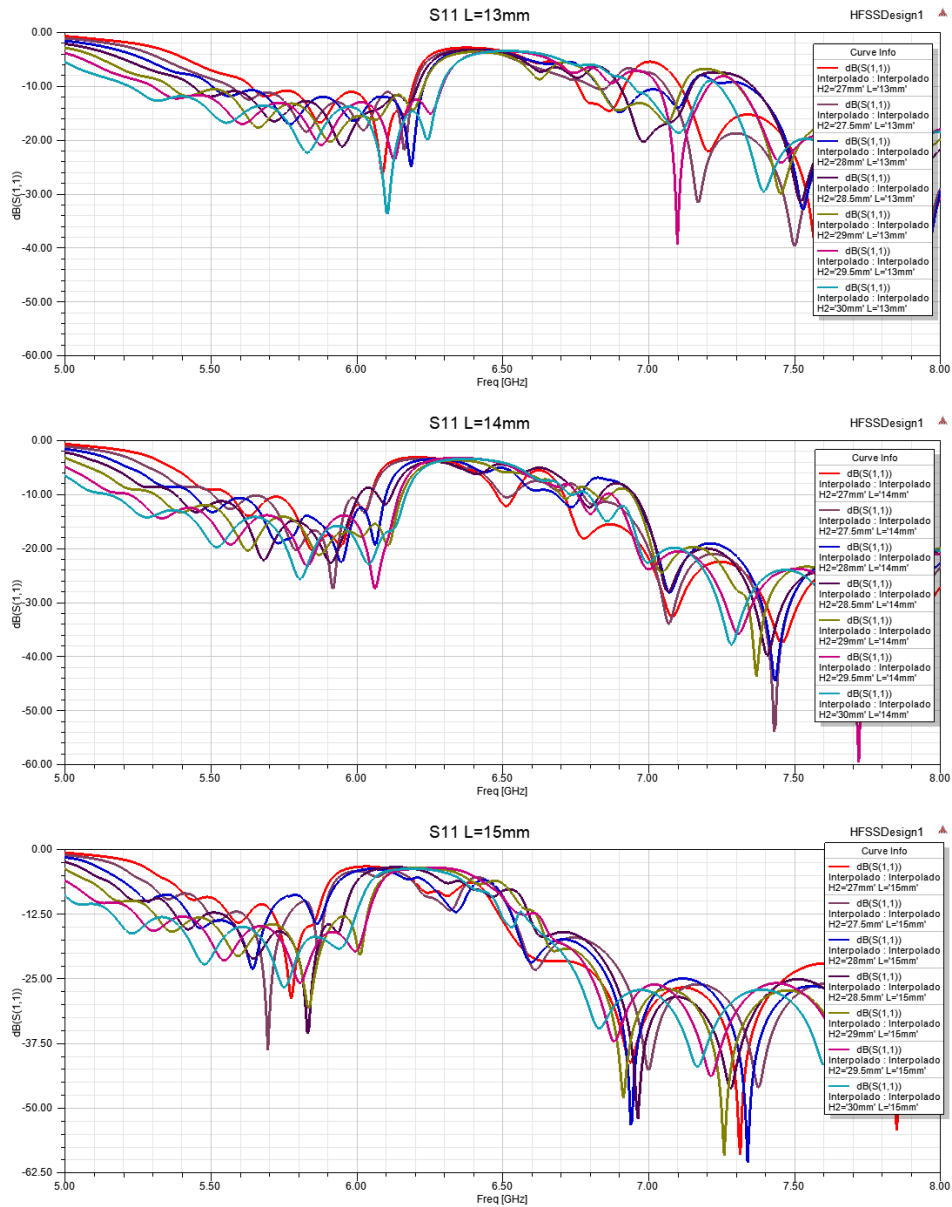
Figura 16 Evolución del campo E

HFSS nos ofrece la posibilidad de establecer las medidas de la antena en función de parámetros para así, en el caso de querer modificar una medida, se modifique la antena en su totalidad. Las medidas que hemos elegido fijas son el tamaño del sustrato FR4 (3 milímetros de grosor) y la división en secciones cuadradas de 20 milímetros de lado en las que situamos los parches. El tamaño de los parches y la altura del sustrato FR4 al plano de masa se ha dejado en función de los parámetros H2 y L, que irán tomando diferentes valores.

El primer paso será observar cómo son los parámetros S en función de la altura H2 y el tamaño L de los parches que se escojan. He decidido que la altura H2 tome valores desde 27 milímetros hasta 30 milímetros en saltos de 0.5 milímetros; mientras que el lado de los parches cuadrados tome valores desde 13 milímetros hasta 18 milímetros, cambiando en saltos de 1 milímetro. Para cada combinación de medidas, tenemos que ver la variación de los parámetros S. Más en concreto, voy a fijarme en el parámetro  $S_{11}$  y  $S_{21}$ .

No queremos que llegue demasiada potencia al final de la antena, ya que sería potencia que no se está radiando y estamos desaprovechando. Eso lo observamos con el parámetro  $S_{21}$ . Tampoco queremos que se refleje demasiada potencia de vuelta a la fuente de excitación de la antena; y esto último se puede comprobar observando la variación del parámetro  $S_{11}$ .

Primero, voy a fijarme en la reflexión observando el parámetro  $S_{11}$ . Las gráficas obtenidas son las siguientes:



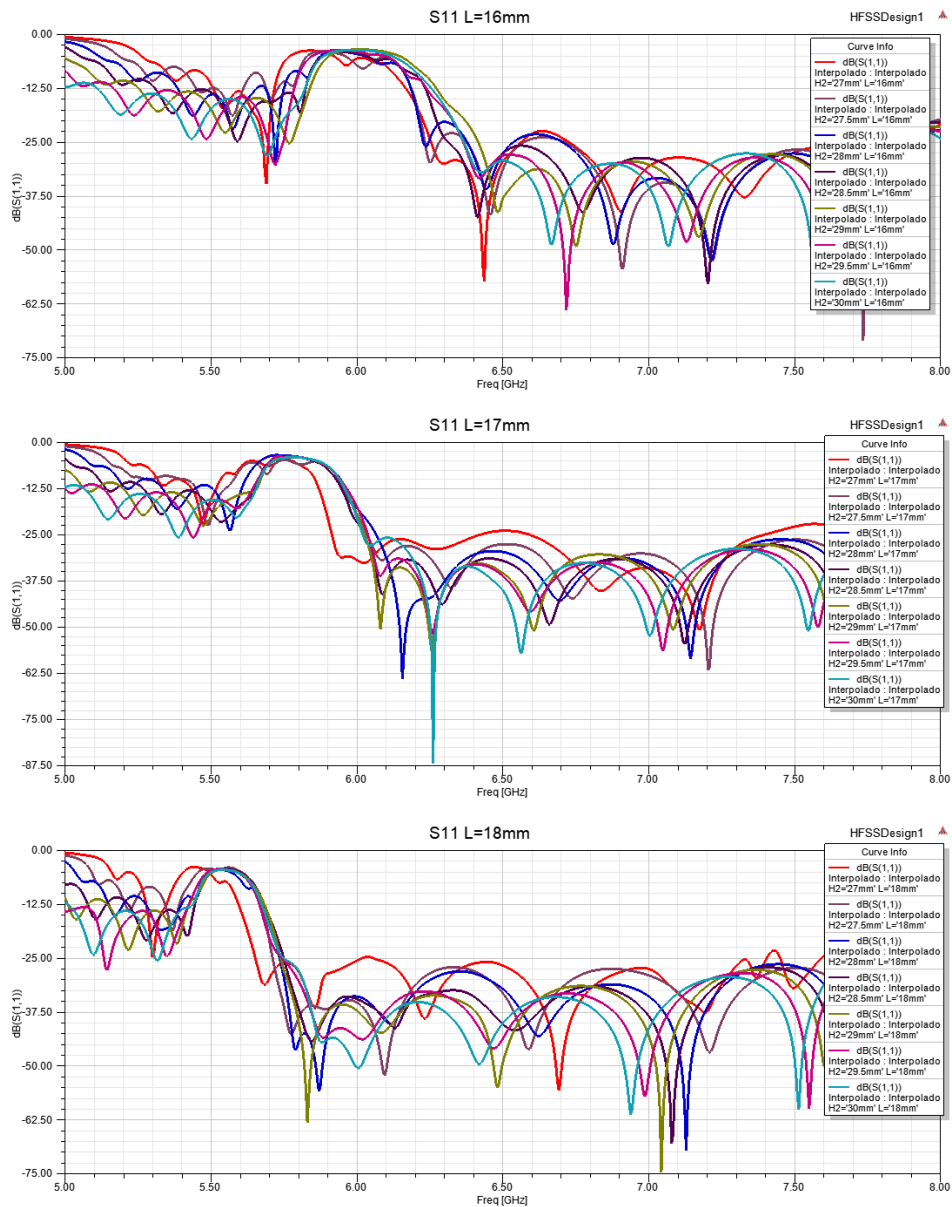
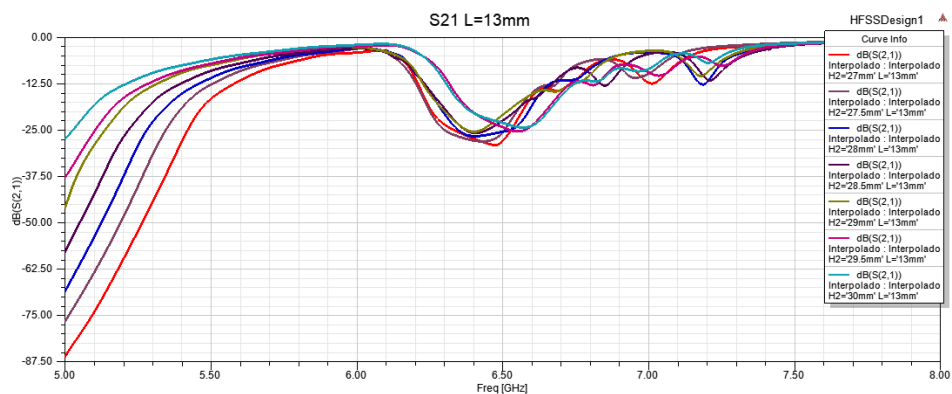
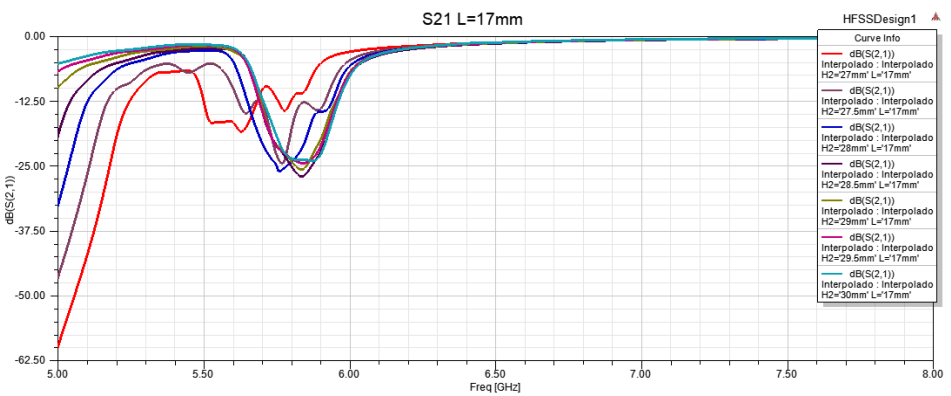
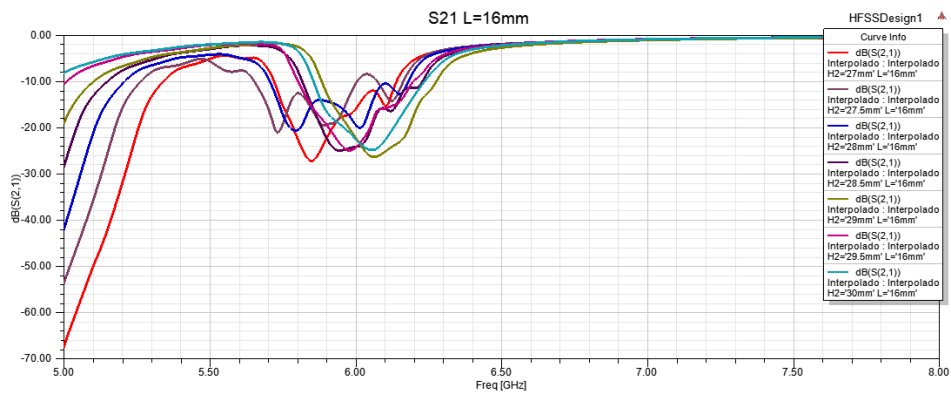
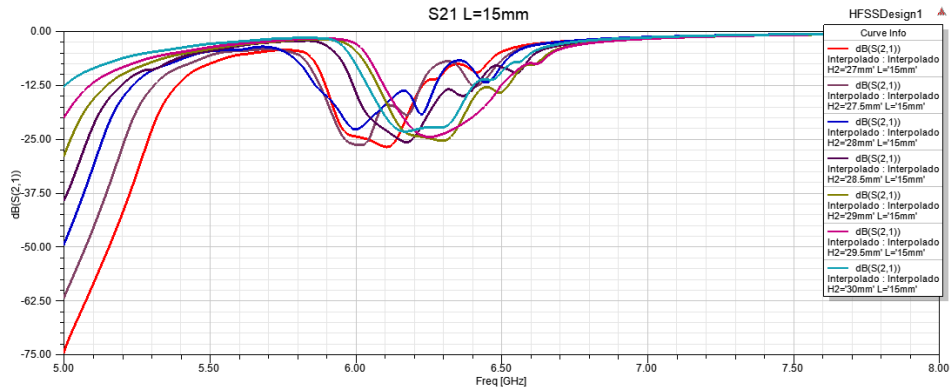
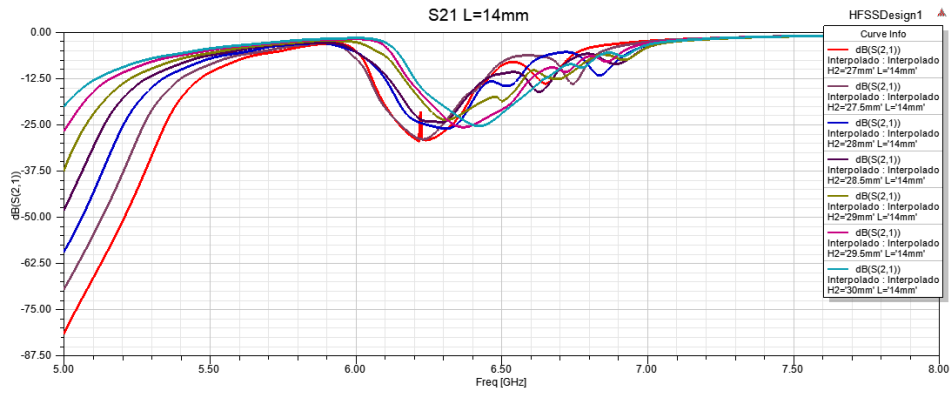


Figura 17 Gráficas del parámetro S11 según L y H2

Tenemos un gran número de resultados debido a la gran combinación de valores de L y H2 que hay que observar. Sin embargo, no sirve únicamente fijarse en estas gráficas, ya que podríamos estar incumpliendo los valores deseados en  $S_{21}$ . Es por ello por lo que hay que fijarse simultáneamente en el parámetro  $S_{21}$ , para el cual se obtienen los siguientes resultados:





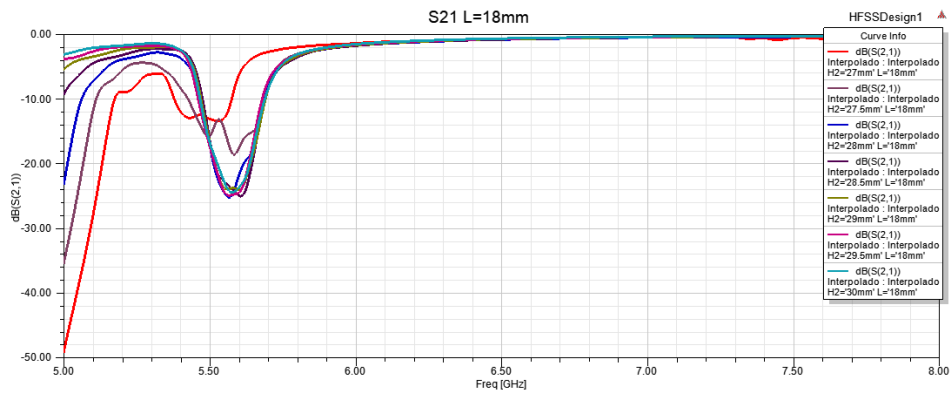


Figura 18 Gráficas del parámetro S21 según L y H2

Observando cada combinación de resultados para cada par de valores, he escogido un tamaño de parche de  $L = 16$  milímetros y  $H_2 = 28$  milímetros. Para estas medidas, las gráficas resultantes de los parámetros S de interés son las siguientes:

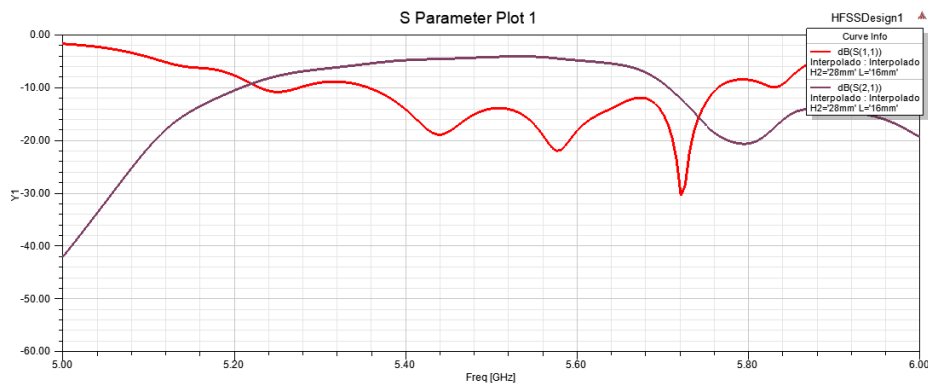


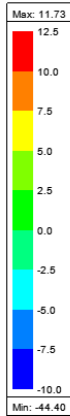
Figura 19 Parámetros S11 y S21 para valores de L y H2 escogidos

Como nuestra aplicación va a centrarse en el canal WiFi de 5 GHz, voy a mostrar de ahora en adelante las gráficas en un rango de frecuencias de 5 a 6 GHz.

El parámetro  $S_{11}$  no debería superar los -10 dB aproximadamente en nuestro rango de medidas, mientras que el parámetro  $S_{21}$  tampoco debería superar unos -7.5 dB. Sin embargo, al intentar ajustar estos parámetros, debo encontrar un compromiso en el que los resultados sean válidos para ambos parámetros S y, al intentar mejorar uno de ellos, el otro empeora. Es por ello por lo que los resultados de los parámetros S no son perfectos.

Centrándome ahora en las frecuencias de 5.2 GHz, 5.5 GHz y 5.8 GHz, voy a observar los diagramas de radiación de la antena. Queremos que, a frecuencias bajas, el haz sea más directivo; mientras que a medida que aumenta la frecuencia, el haz se irá abriendo poco a poco. Esto es lo que utilizará el dron para poder ubicar el centro de la plataforma de aterrizaje.

Para los casos mencionados anteriormente, tenemos los siguientes diagramas de radiación:



Directividad total 5.2GHz

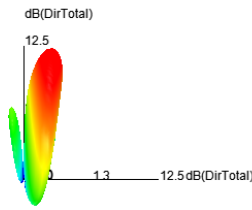
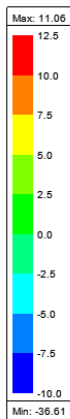


Figura 20 Directividad para  $f=5.2$  GHz



Directividad total 5.5GHz

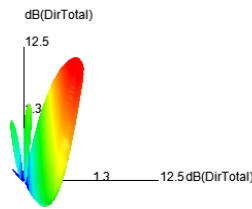
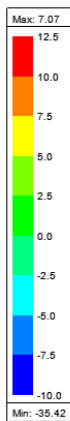


Figura 21 Directividad para  $f=5.5$  GHz



Directividad total 5.8GHz

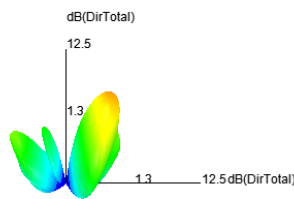


Figura 22 Directividad para  $f=5.8$  GHz

Recordando que únicamente nos estamos fijando en media sección de la antena total, podemos ignorar los lóbulos secundarios que aparecen a la izquierda y fijarnos únicamente en el lóbulo principal que tenemos a la derecha. Después, estos resultados deberían ser idénticos hacia el otro lado.

Se puede observar como el lóbulo principal se va abriendo poco a poco conforme aumenta la frecuencia, siendo éste el resultado deseado.



Se puede ver también en la siguiente gráfica, donde voy a mostrar la directividad total normalizada a 10 dB para todas las frecuencias de 5 a 6 GHz en saltos de 0.1 GHz:

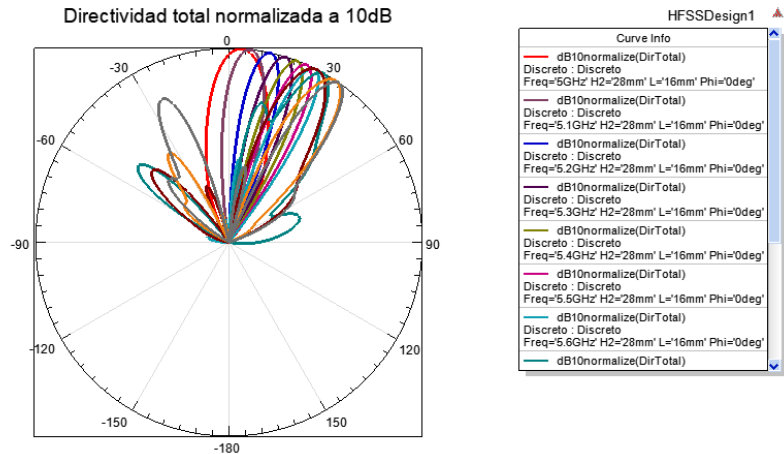


Figura 23 Directividad normalizada

A medida que aumenta la frecuencia, vemos como el lóbulo principal “cae” en el sentido de las agujas del reloj, es decir, se va abriendo. Van apareciendo también lóbulos secundarios, cuya influencia se verá disminuida en la antena total debido a la simetría de esta.

Además, la directividad de la antena se puede ver que va dirigida en el eje  $\hat{y}$ .

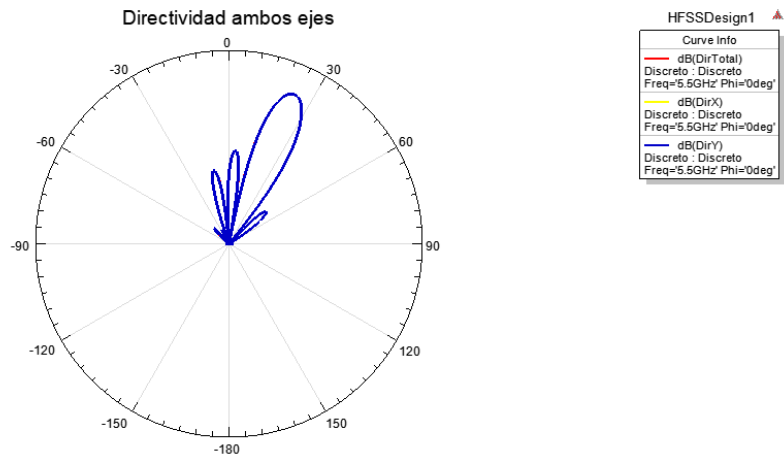


Figura 24 Directividad según el eje X e Y

Coincide la directividad  $DirY$  con la directividad total, mientras que la directividad  $DirX$  es prácticamente inexistente.

Una vez que tenemos los parámetros de diseño establecidos, hay que comprobar que los resultados sean válidos para una sección de antena perpendicular: es el caso en el que tendremos paredes magnéticas.

### 3.1.2. Análisis modo TM.

Ahora, el diseño de la antena será muy similar. Sin embargo, la antena irá dirigida en el eje perpendicular y tendremos a ambos lados de la antena paredes magnéticas y no paredes eléctricas. Se muestra el diseño empleado en la siguiente figura:

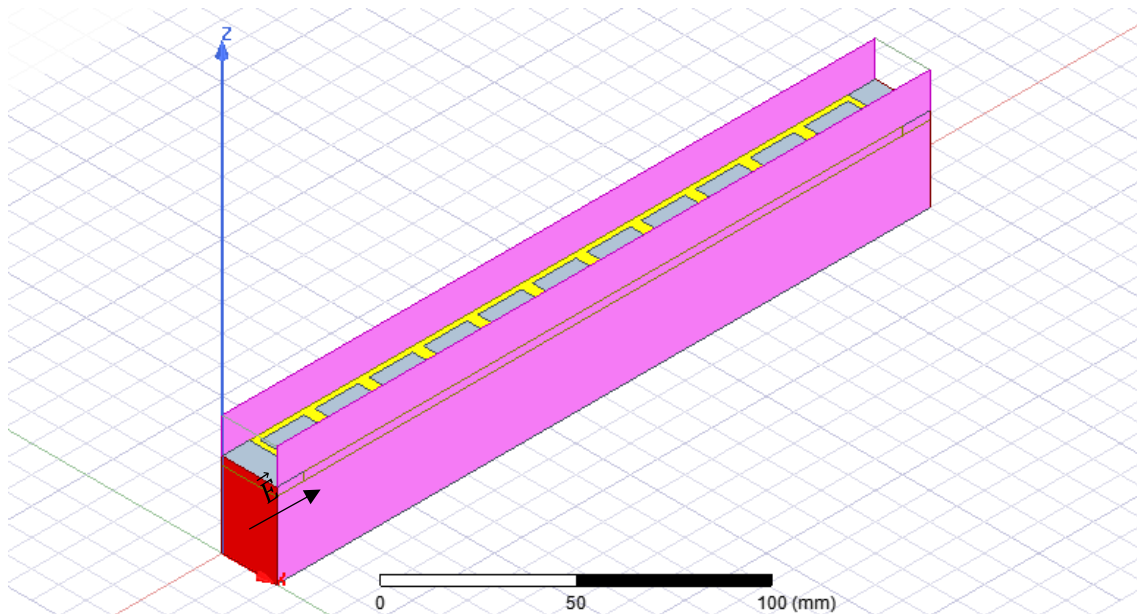


Figura 25 Media sección de la antena, caso de paredes magnéticas

Se han escogido los mismos colores de representación que en el primer caso, teniendo en cuenta que ahora las paredes rosas son paredes magnéticas en lugar de paredes eléctricas. En este caso, los puertos escogidos son también del tipo wave ports, pero la configuración es diferente:

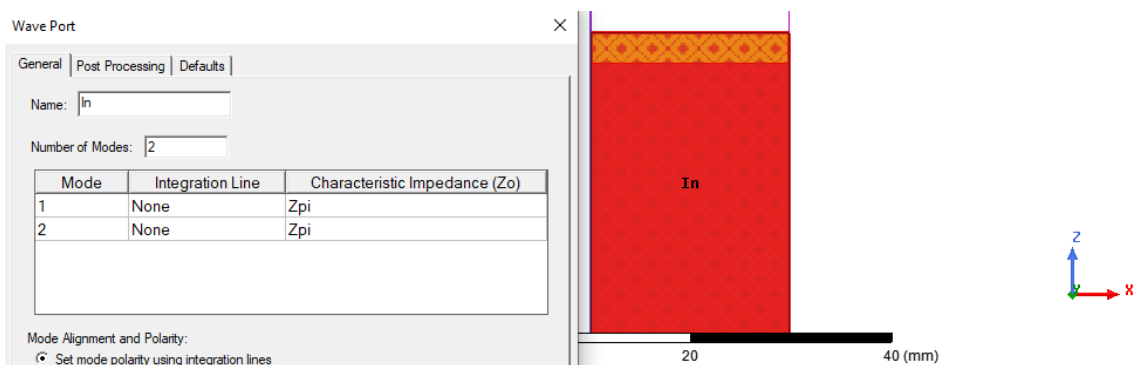


Figura 26 Wave ports

En este caso, el campo eléctrico  $\vec{E}$  también está polarizado en el eje  $\hat{y}$ , mientras que el campo magnético  $\vec{H}$  tomará dirección perpendicular y estará situado en el plano XZ. Podemos ver el campo  $\vec{E}$  en la siguiente figura:

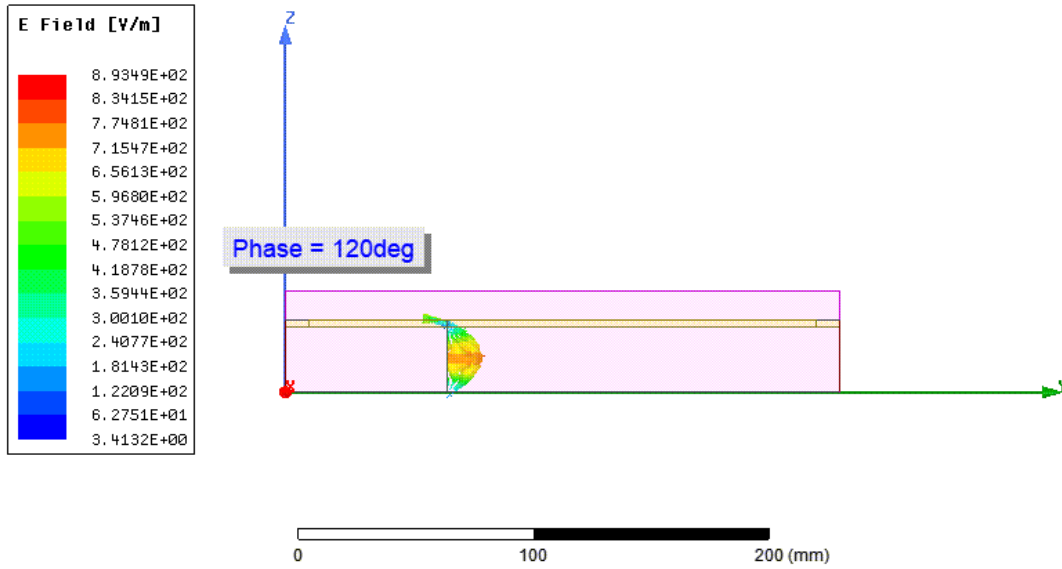
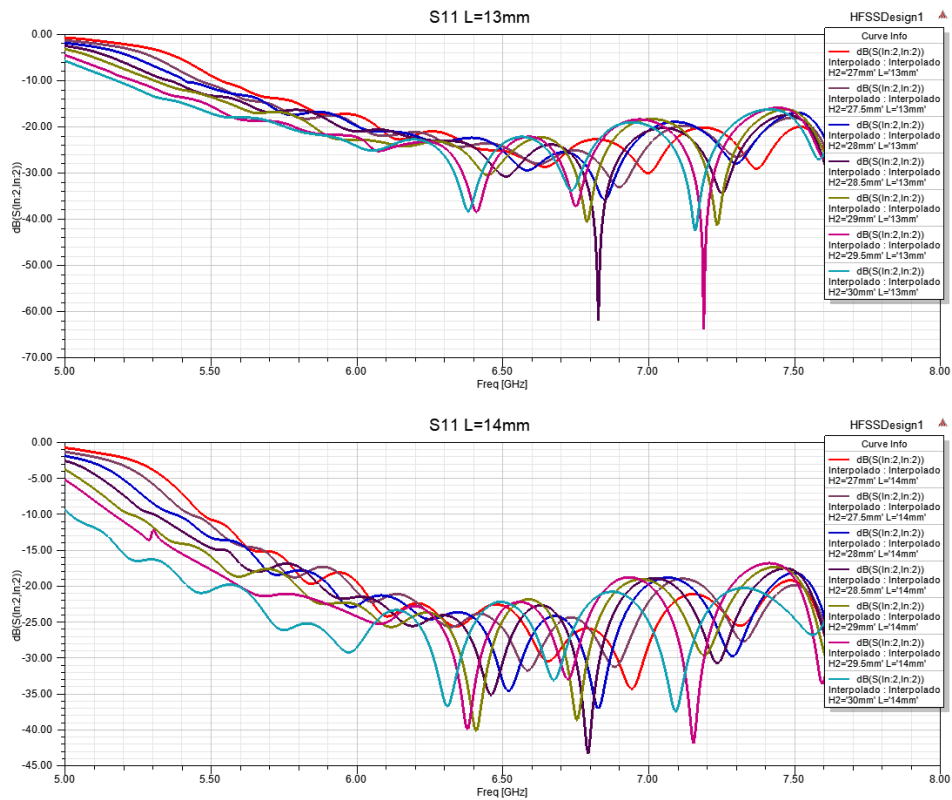


Figura 27 Evolución del campo E

Lo primero que hay que hacer es, al igual que en el caso anterior, fijarnos en los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$ . Las mismas conclusiones y resultados deberían ser válidos para este caso.

Primero, si nos fijamos en el parámetro  $S_{11}$ :



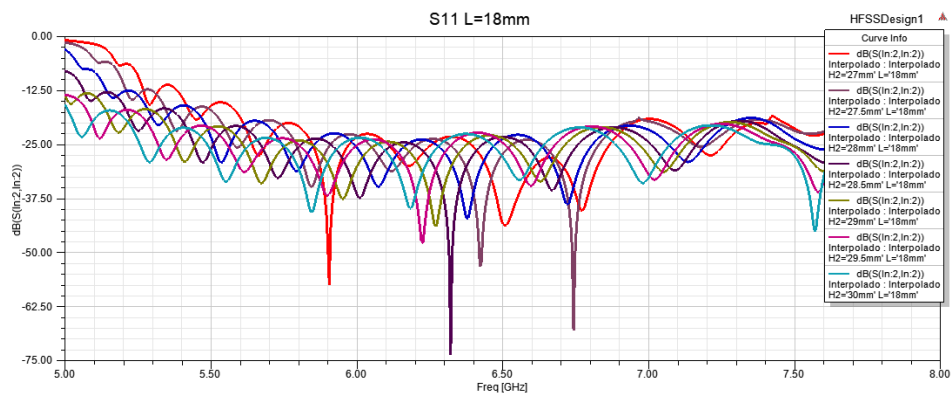
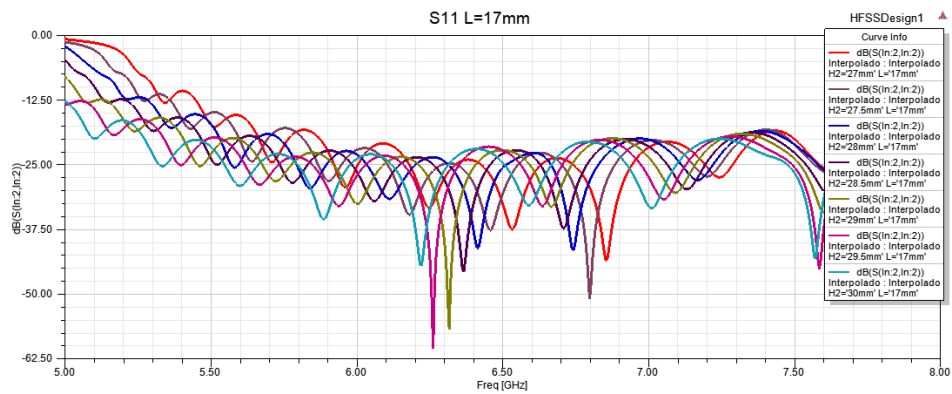
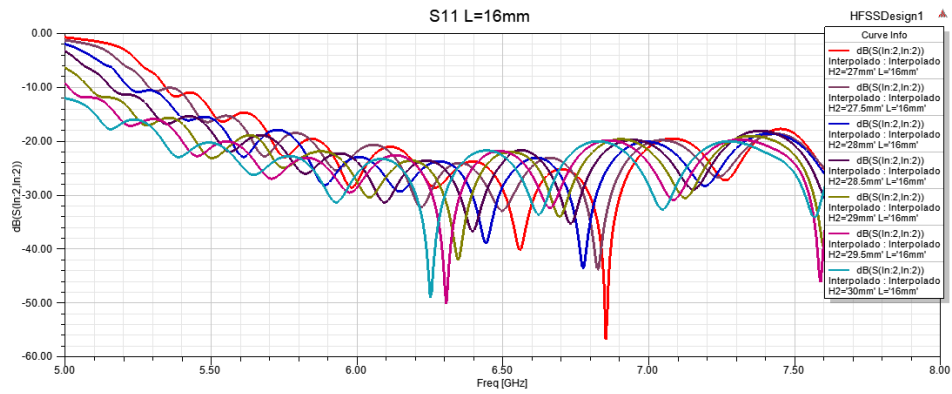
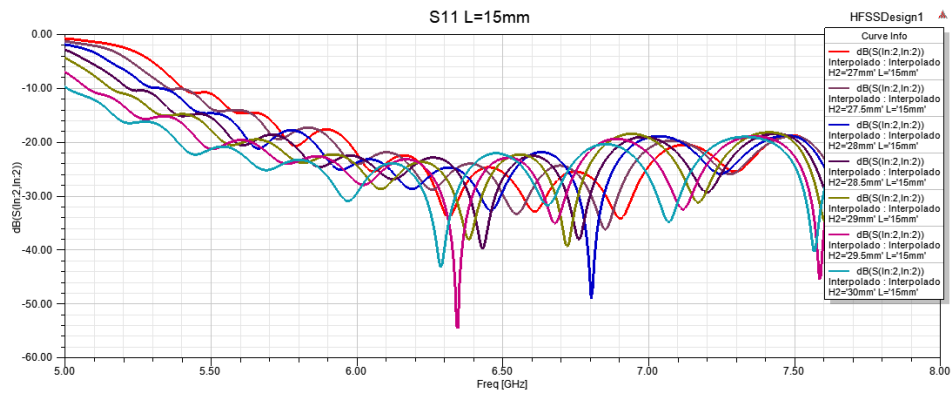
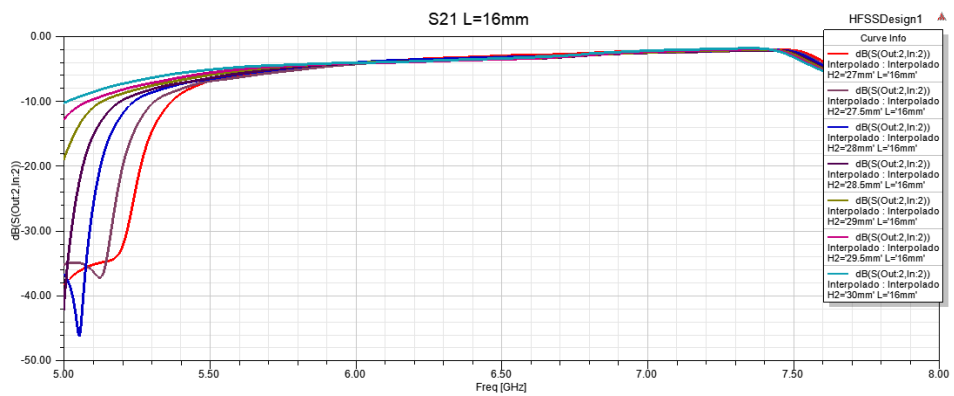
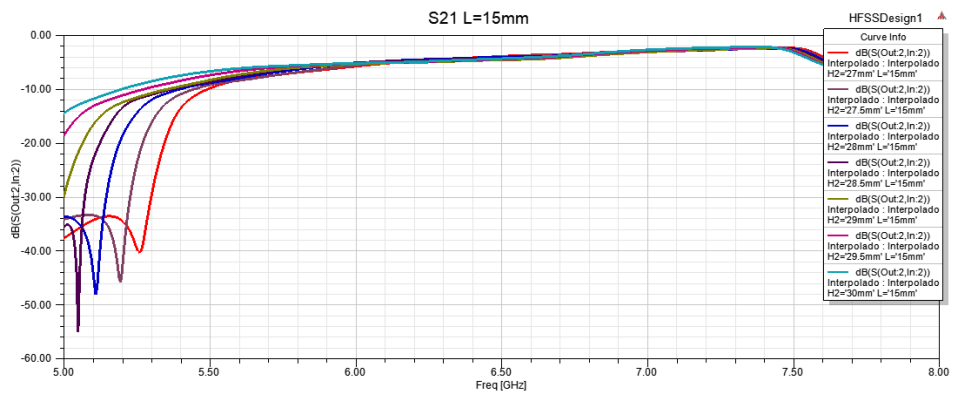
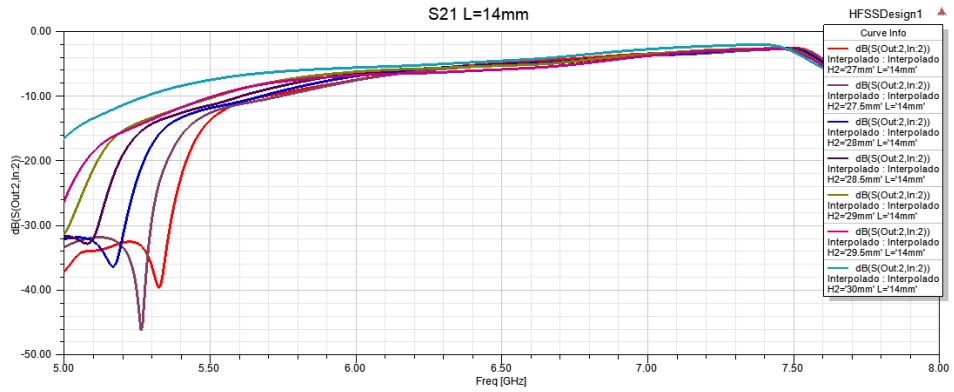
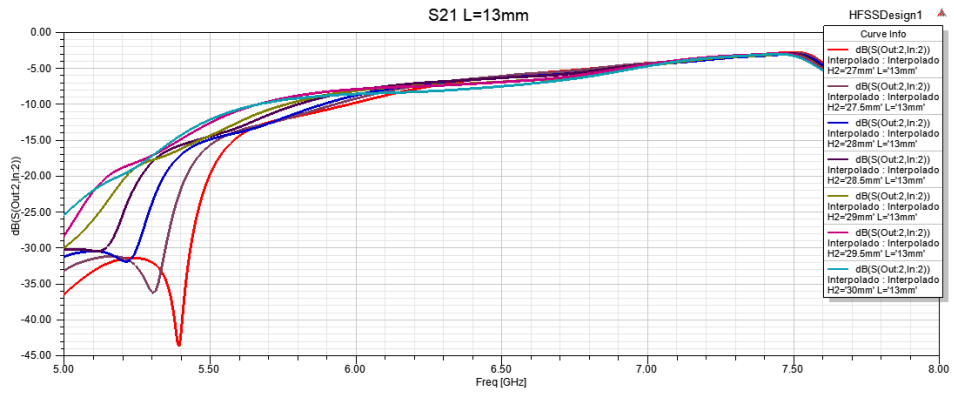


Figura 28 Gráficas del parámetro S11 según L y H2

Al igual que en el caso anterior, hay que fijarse ahora en el parámetro  $S_{21}$  :



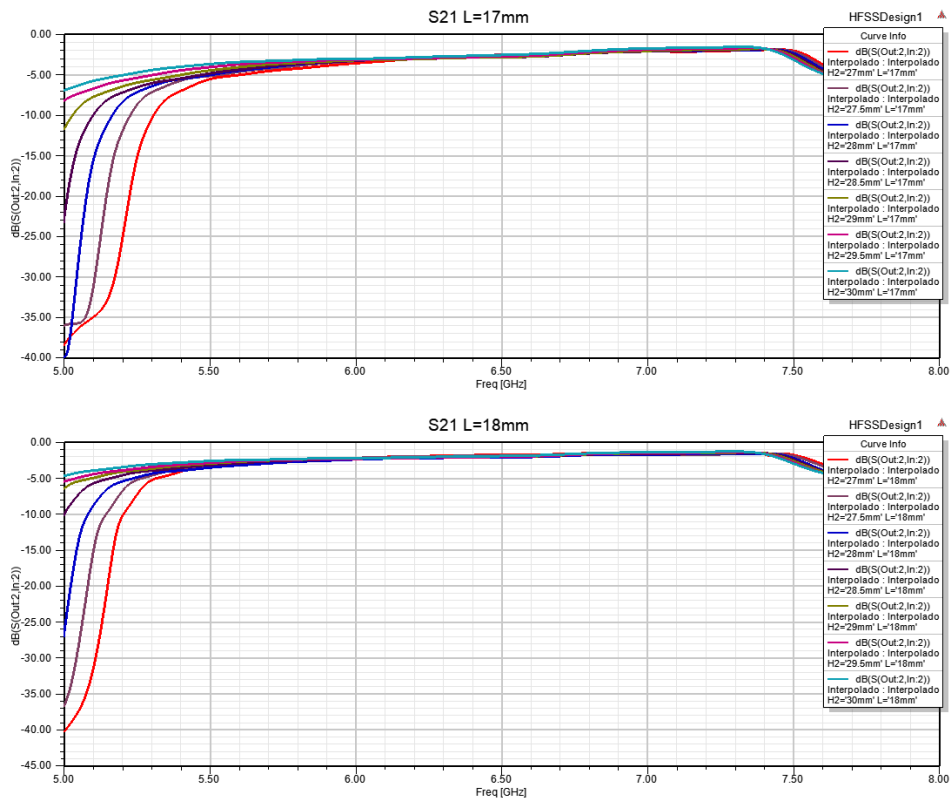


Figura 29 Gráficas del parámetro S21 según L y H2

Para la combinación anterior de valores de H2 y L escogidos (28 y 16 milímetros respectivamente), obtenemos unos resultados en los parámetros S también válidos para nuestra aplicación:

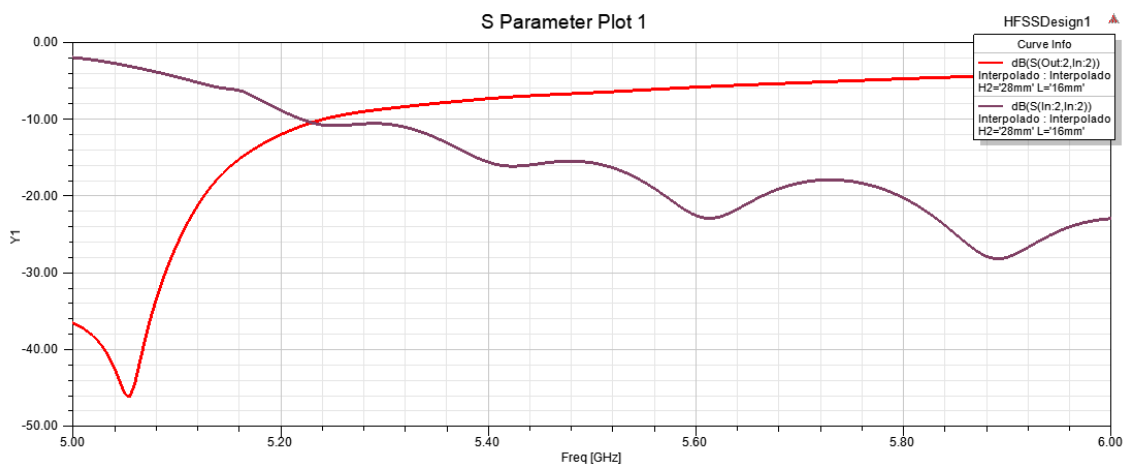
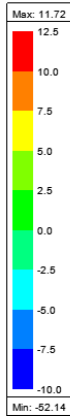


Figura 30 Parámetros S11 y S21 para valores de L y H2 escogidos

Al igual que en el caso de paredes eléctricas, aunque los resultados no sean perfectos, son válidos para nuestra aplicación. Si observamos los diagramas de radiación, deberíamos obtener un resultado similar en cuanto a los haces de directividad.



Directividad total 5.2GHz

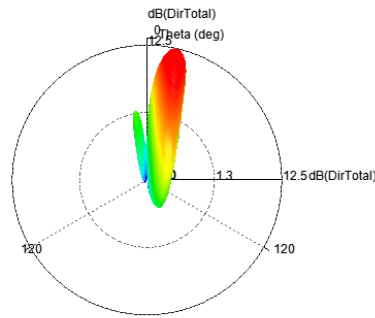
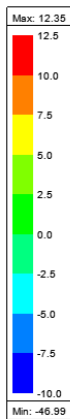


Figura 31 Directividad para  $f=5.2$  GHz



Directividad total 5.5GHz

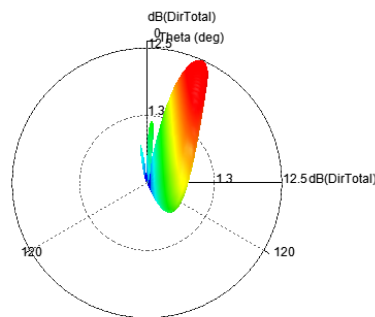
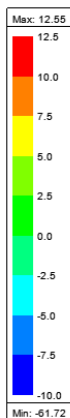


Figura 32 Directividad para  $f=5.5$  GHz



Directividad total 5.8GHz

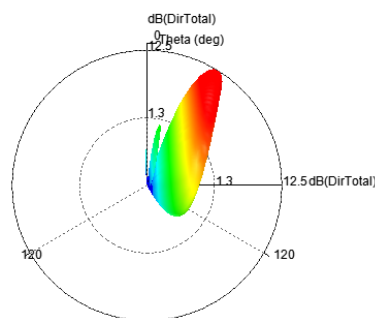


Figura 33 Directividad para  $f=5.8$  GHz

Se puede observar la apertura del haz a medida que aumenta la frecuencia, al igual que en el caso anterior.

Si nos fijamos en la directividad total normalizada para cada una de las frecuencias de interés, en saltos de 0.1 GHz, tenemos los siguientes resultados:

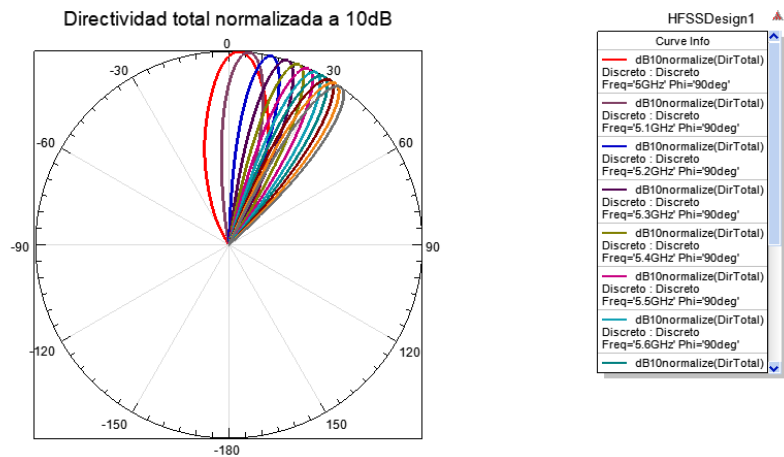


Figura 34 Directividad normalizada

Tal y como se obtuvo anteriormente, la directividad total corresponde con la directividad  $DirY$ , siendo la directividad  $DirX$  prácticamente nula. En la siguiente gráfica se puede observar que la directividad total y la directividad  $DirY$  prácticamente coinciden, es decir, prácticamente se pueden superponer una encima de la otra:

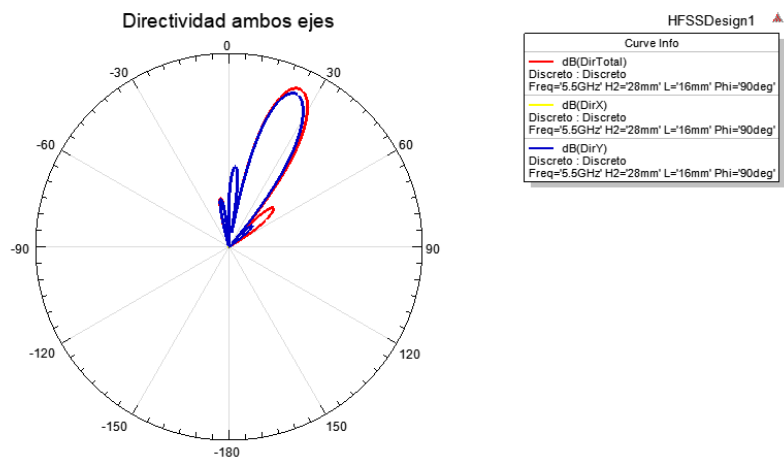


Figura 35 Directividad según el eje X e Y

Con estos resultados, ya deberíamos poder escoger unas medidas finales para nuestra antena para que, al tener el diseño final, los resultados sean válidos para que el dron pueda obtener la distancia al centro de la plataforma de aterrizaje.

### 3.1.3. Simulaciones finales.

Finalmente, nuestra antena Fabry-Pérot será una antena cuadrada de 460 milímetros de lado, con un total de 529 parches cuadrados de 16 milímetros de lado (23 filas de 23 parches cada una) repartidos uniformemente sobre un sustrato FR4 que cubrirá la totalidad de la antena, el cual tiene una tangente de pérdidas dieléctrica de 0.01 y una permitividad relativa de 4.48. El sustrato tendrá un grosor de 3 milímetros y estará situado sobre un material esponjoso de 28 milímetros de alto, el cual tiene unas propiedades muy similares a las del aire. Debajo de este material, se colocará el plano de masa; y en el centro de la antena vamos a situar una alimentación que polarizará la antena en el eje  $\hat{y}$ .



MEDIDA	VALOR
Tamaño de los parches, L	16 milímetros
Tamaño del sustrato, H1	3 milímetros
Altura del sustrato sobre el plano de masa, H2	28 milímetros

### 3.2. Análisis 1D bidireccional de la antena Fabry-Pérot.

Con las medidas escogidas, es hora de ver los diagramas de radiación de diferentes secciones de la antena para comprobar el buen funcionamiento de esta. Como en el apartado anterior, hay que situar primero paredes eléctricas y, tras comprobar que los resultados son correctos, comprobar el caso en el que tenemos paredes magnéticas.

#### 3.2.1. Análisis modo TE.

Ahora, la antena tendrá el doble de tamaño que la antena del apartado anterior, duplicando el diseño anterior a ambos lados para obtener una sección simétrica. El diseño resultante se muestra en la siguiente figura:

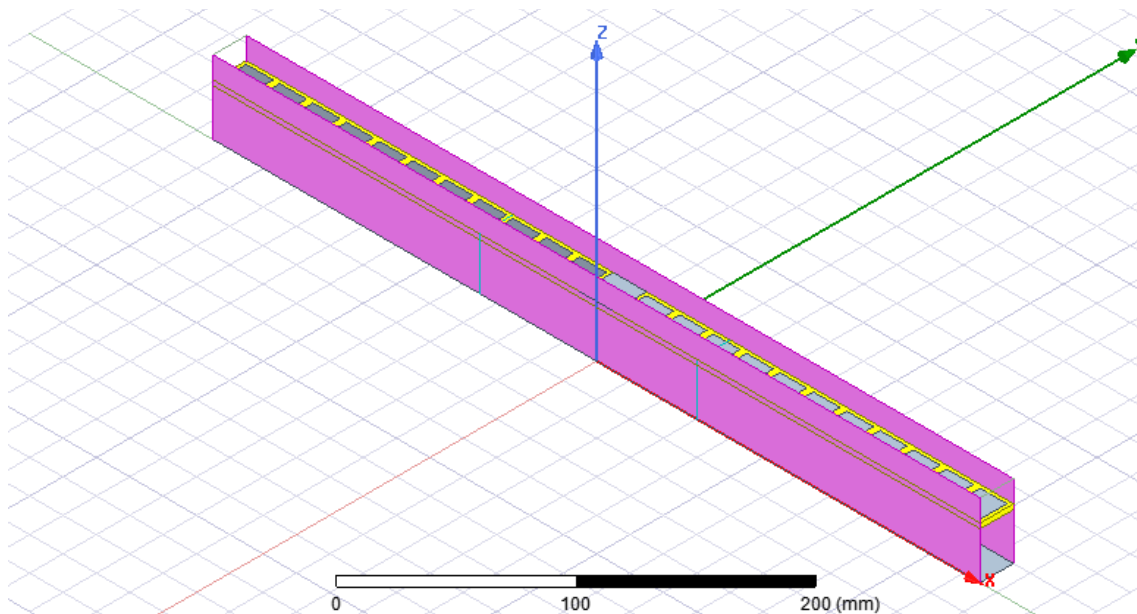


Figura 36 Sección de la antena, caso de paredes eléctricas

En el caso de paredes eléctricas, la antena está situada longitudinalmente en el eje  $\hat{x}$ . Con esta antena, deberíamos obtener los diagramas de radiación que nos interesan: más directivos a bajas frecuencias y, al aumentar la frecuencia, el diagrama de radiación se irá abriendo. Además, debido a la simetría de la antena, el diagrama de radiación debería ser simétrico también respecto al centro de la antena. En cuanto a la alimentación, está polarizada en el eje  $\hat{y}$  tal y como se muestra a continuación:

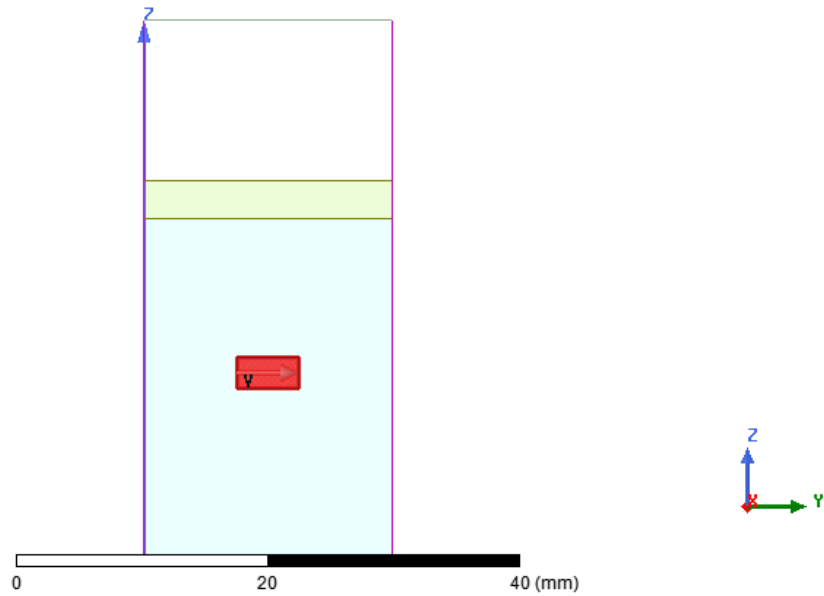


Figura 37 Alimentación de la antena

Tras realizar la simulación, el diagrama de radiación obtenido para las frecuencias de 5.2 GHz, 5.5 GHz y 5.8 GHz es el siguiente:

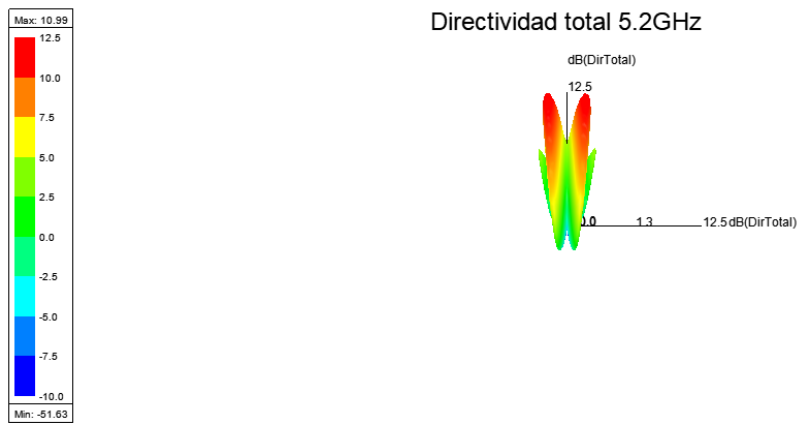


Figura 38 Directividad total para  $f=5.2$  GHz

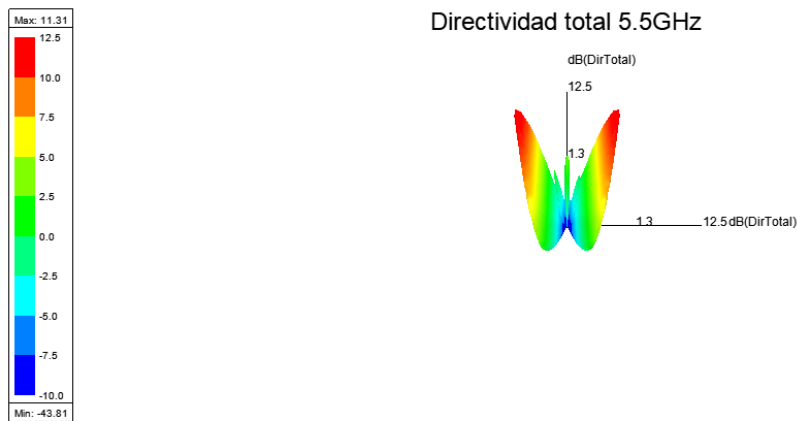


Figura 39 Directividad total para  $f=5.5$  GHz

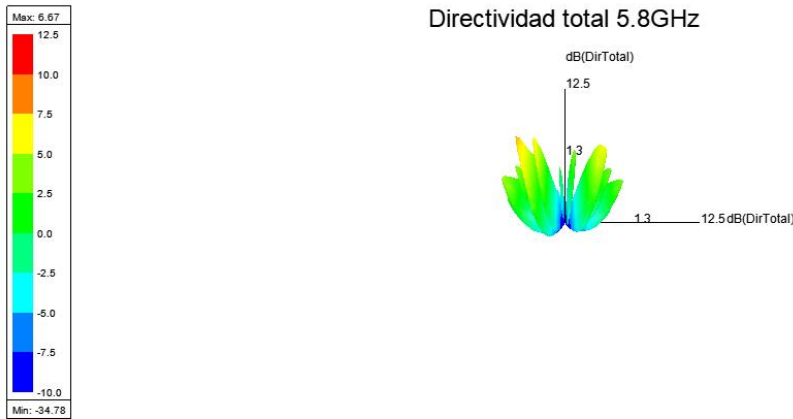


Figura 40 Directividad total para  $f=5.8$  GHz

Casi con totalidad, el diagrama de radiación es simétrico a ambos lados. La simetría se pierde un poco en la frecuencia de 5.8 GHz, pero es debido a errores del programa en la simulación. Teóricamente, al ser simétrica la antena, el diagrama de radiación debe ser simétrico a ambos lados.

Podemos ver como para las primeras frecuencias, el haz de potencia es más directivo verticalmente, mientras que conforme aumenta la frecuencia obtenemos esa apertura del haz deseada que necesitamos para que el dron pueda hacer el correcto procesado.

Aparece también un lóbulo secundario hacia arriba cuando aumenta la frecuencia, aunque su magnitud es pequeña si la comparamos con la máxima potencia radiada.

Podemos ver la directividad normalizada de la potencia para las diferentes frecuencias para observar la apertura que se produce gradualmente en la siguiente figura:

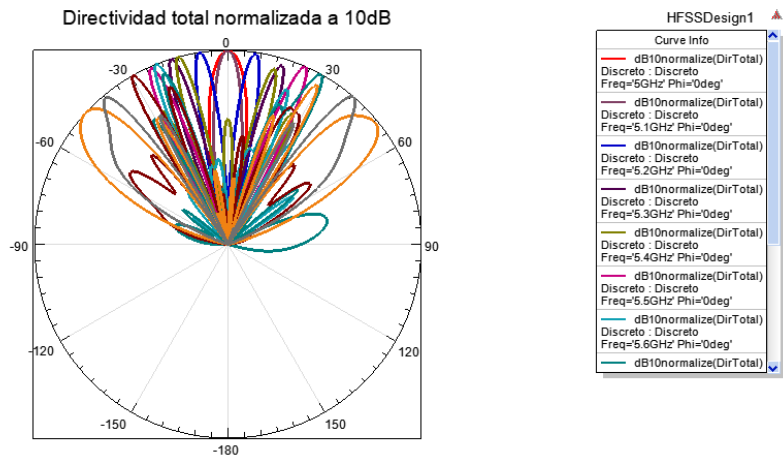


Figura 41 Directividad normalizada

Al igual que en los apartados anteriores, toda la directividad se corresponde a la directividad del eje  $\hat{y}$ . Esto se puede apreciar en la siguiente imagen, donde la directividad total y la directividad  $DirY$  son coincidentes:

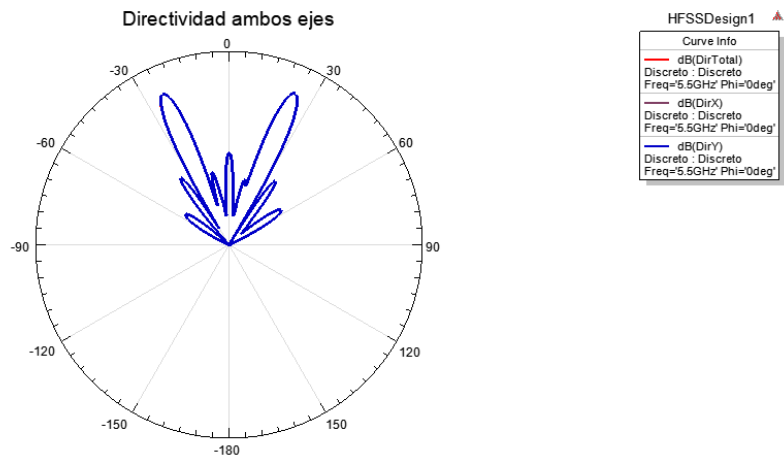


Figura 42 Directividad según el eje X e Y

Podemos ver también la evolución del campo eléctrico con el tiempo para así conocer su variación. El campo eléctrico irá oscilando según el eje  $\hat{y}$  de un lado al otro, a la vez que se produce la radiación de la antenna.

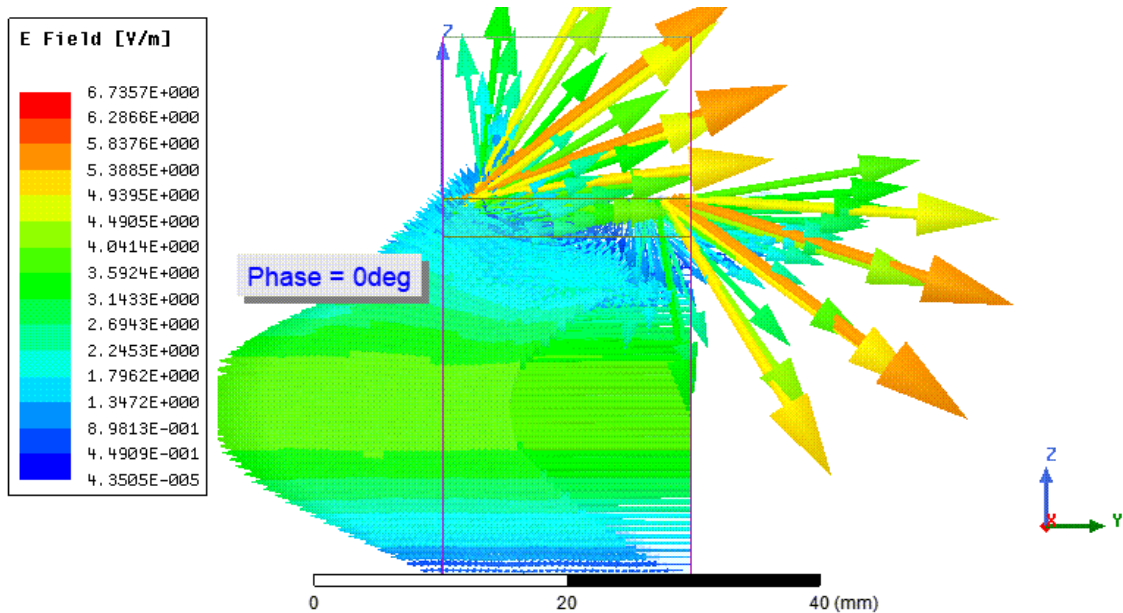


Figura 43 Evolución del campo E

### 3.2.2. Análisis modo TM.

Tras obtener estos resultados válidos, es momento de comprobar que también se cumplen para el caso en el que la antenna está situada longitudinalmente en el eje  $\hat{y}$ . En este caso, en lugar de paredes eléctricas, tendremos paredes magnéticas alrededor de la antenna. En cuanto a la alimentación, está polarizada en el eje  $\hat{y}$ . El diseño sería el siguiente:

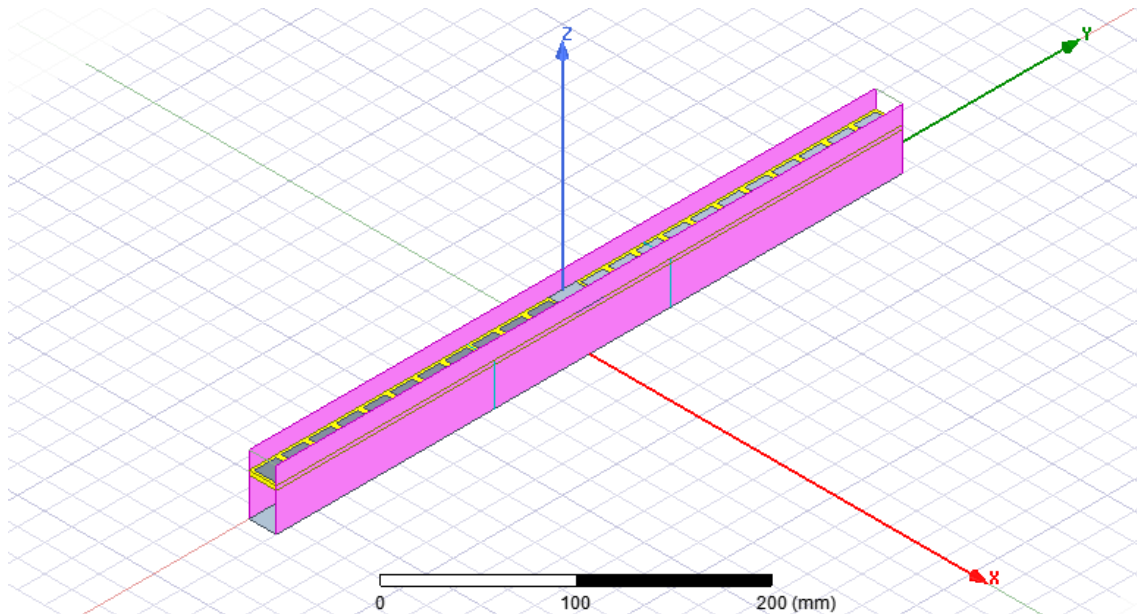


Figura 44 Sección de la antena, caso de paredes magnéticas

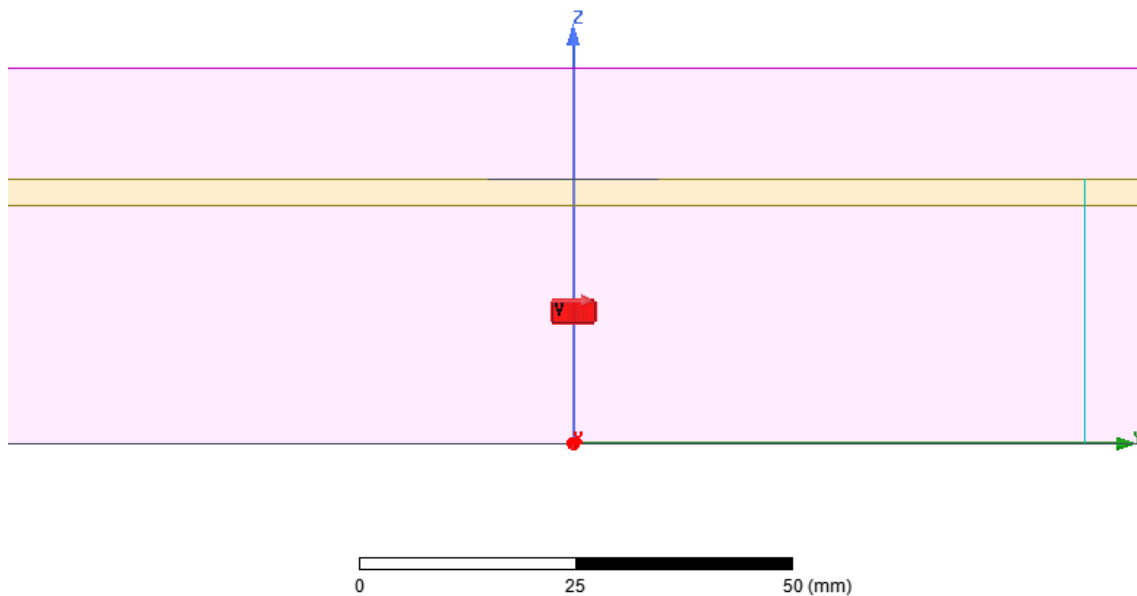


Figura 45 Alimentación de la antena

Ahora, el campo eléctrico cambiará la forma de propagarse. Lo hará perpendicularmente si lo comparamos con el diseño anterior; es decir, el campo eléctrico se propagará en la misma dirección de la longitud de la antena en lugar de ir hacia los lados.

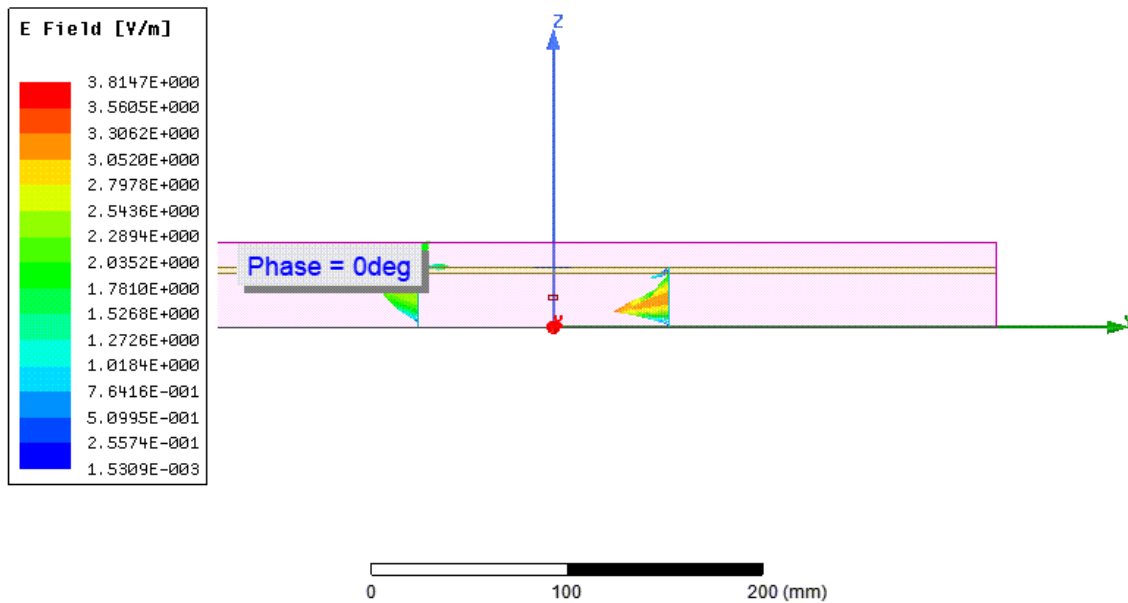


Figura 46 Evolución del campo E

En lo que tenemos que fijarnos también es, al igual que en caso anterior, en los diagramas de radiación para las diferentes frecuencias. Deberíamos obtener unos resultados similares: alta directividad a bajas frecuencias y apertura del haz a medida que aumenta la frecuencia.

Si nos fijamos en las frecuencias de 5.2 GHz, 5.5 GHz y 5.8 GHz como en el caso anterior para hacer una comparación, obtenemos los siguientes diagramas de radiación:

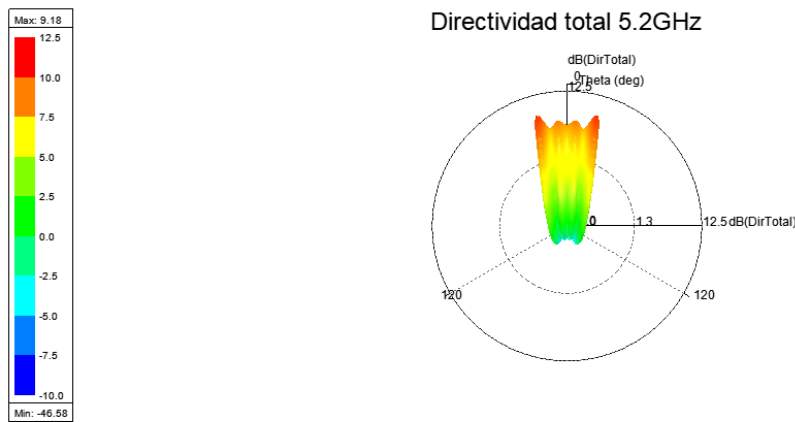


Figura 47 Directividad total para  $f=5.2$  GHz

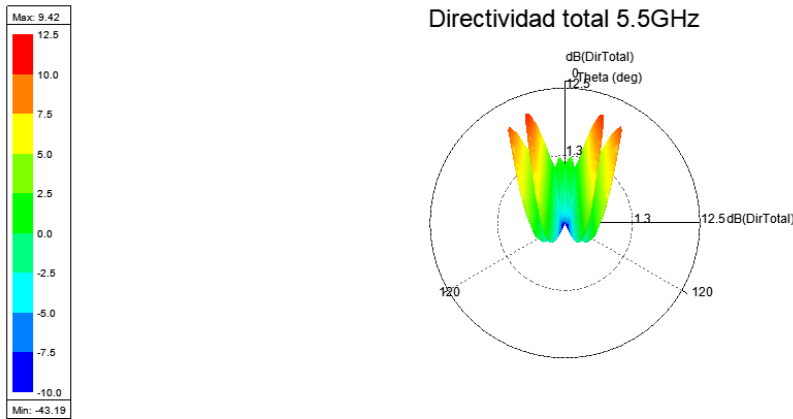


Figura 48 Directividad total para  $f=5.5$  GHz

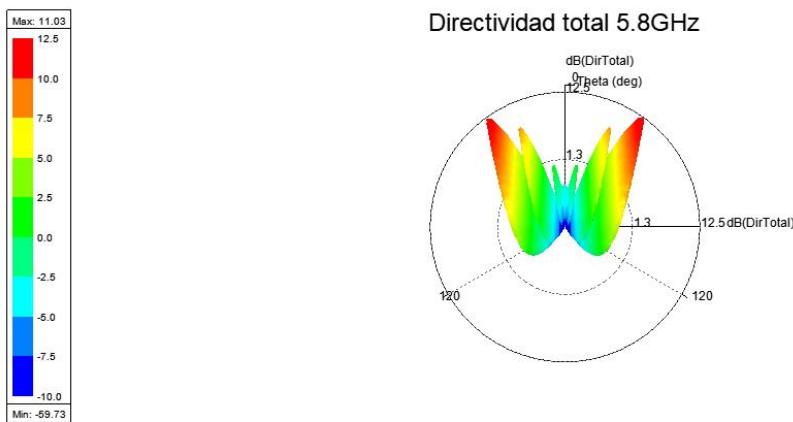


Figura 49 Directividad total para  $f=5.8$  GHz

Se observa la perfecta simetría a ambos lados del eje de la antena, así como la apertura del haz con la frecuencia para poder hacer el correcto escaneo. También se puede apreciar en la siguiente figura, donde se muestra la variación de la directividad normalizada para cada una de las frecuencias de interés:

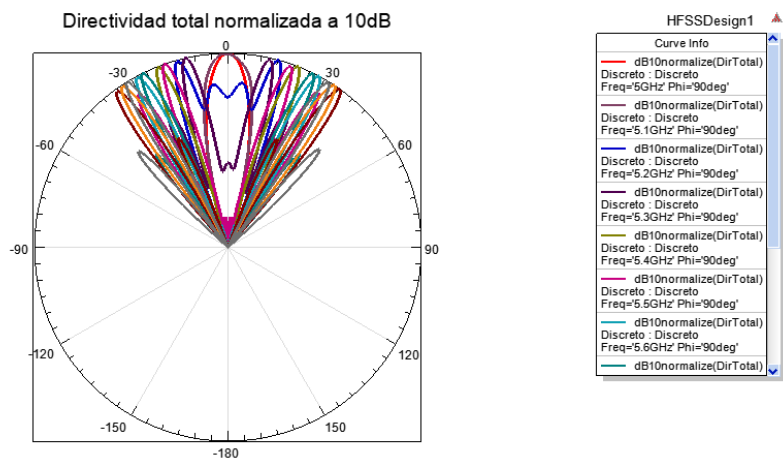


Figura 50 Directividad normalizada

La directividad total es la aportación de la directividad del eje  $\hat{y}$  o  $DirY$ , al igual que sucedía anteriormente. Este hecho se puede apreciar en la siguiente figura, donde la directividad  $DirX$

es prácticamente nula en comparación con la directividad total y la directividad DirY, prácticamente coincidentes:

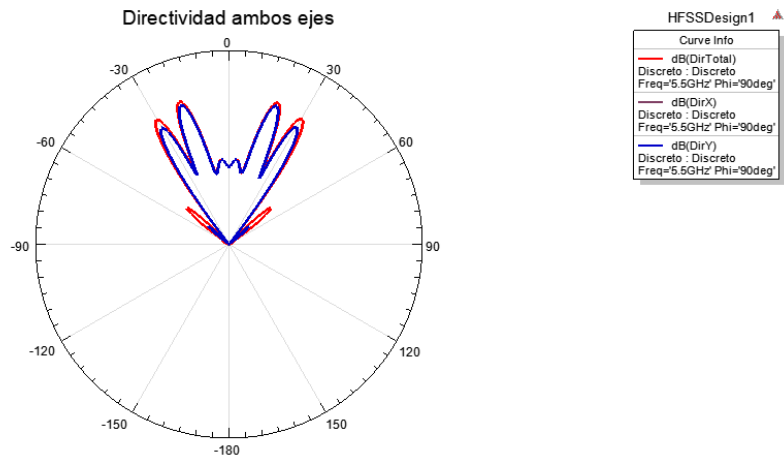


Figura 51 Directividad según el eje X e Y

Al tener unos resultados como los esperados, podemos comenzar con el diseño de la antena final y comprobar el funcionamiento de nuestra antena Fabry-Pérot, que servirá para que el dron pueda hacer un escaneo de la frecuencia y poder colaborar en su aterrizaje en el centro de la plataforma.

### 3.3. Análisis final de la antena Fabry Pérot 2D.

La antena Fabry-Pérot final tendrá la forma representada en la siguiente figura:

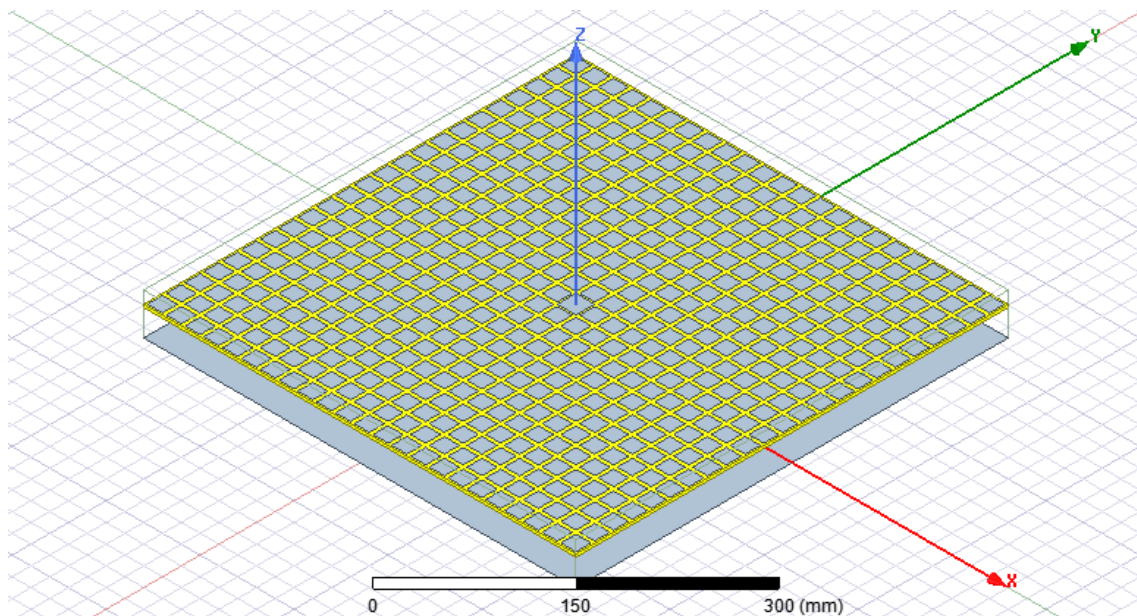


Figura 52 Antena Fabry-Pérot diseñada

Se trata de una antena cuadrada de 460x460 milímetros, con parches también cuadrados de 16x16 milímetros repartidos de forma uniforme sobre el sustrato FR4. Tendremos una alimentación polarizada en el eje  $\hat{y}$  sobre la que habrá un parche central de tamaño 20x20 milímetros. La representación de la alimentación se puede ver en la siguiente figura:



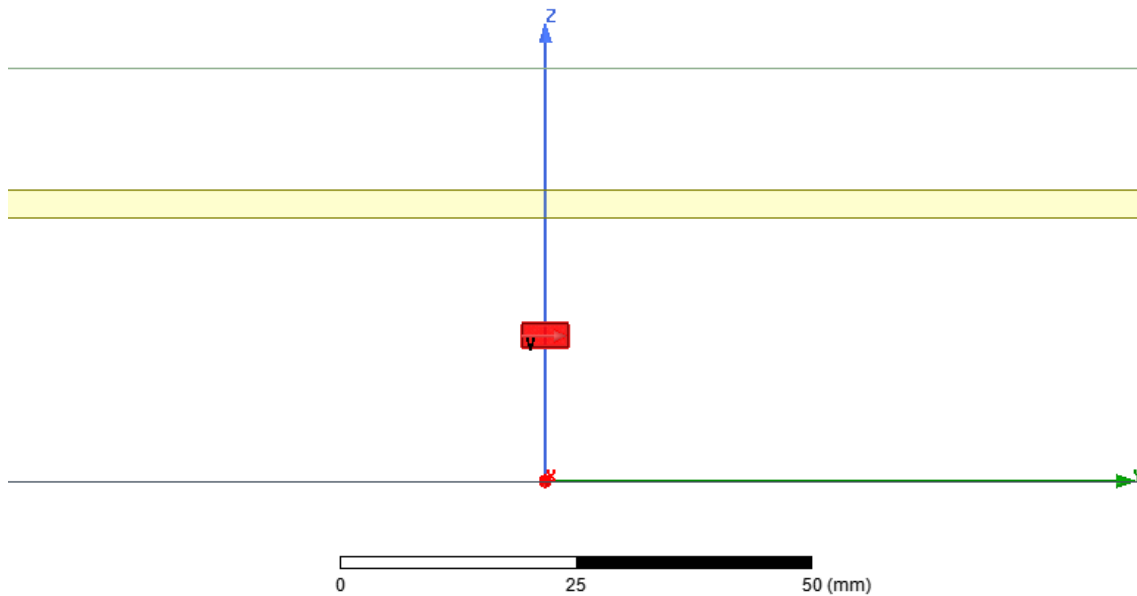


Figura 53 Alimentación de la antena Fabry-Pérot

Al realizar la simulación de la antena, podemos ver la evolución que sufre el diagrama de radiación al cambiar la frecuencia. Conforme aumenta la frecuencia, vamos a observar una apertura cónica del diagrama de radiación, y dicha propiedad es la que usará el dron para encontrar el centro de la plataforma de aterrizaje mediante un escaneo de la potencia según la frecuencia. La evolución del diagrama de radiación con el aumento de la frecuencia la podemos ver en la siguiente figura:

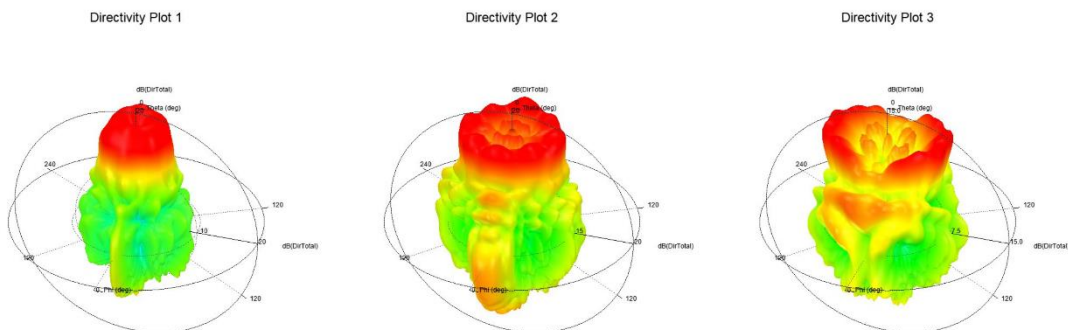


Figura 54 Evolución del diagrama de radiación con el aumento de la frecuencia

Al principio, tenemos un diagrama directivo; y conforme aumenta la frecuencia se aprecia una apertura del haz de radiación.

Podemos observar también la evolución del diagrama de radiación tanto en el plano XZ, como en el plano YZ para poder ver cómo se produce la apertura en cada plano de forma independiente.

Si primero nos fijamos en el plano XZ, el resultado obtenido es el siguiente:

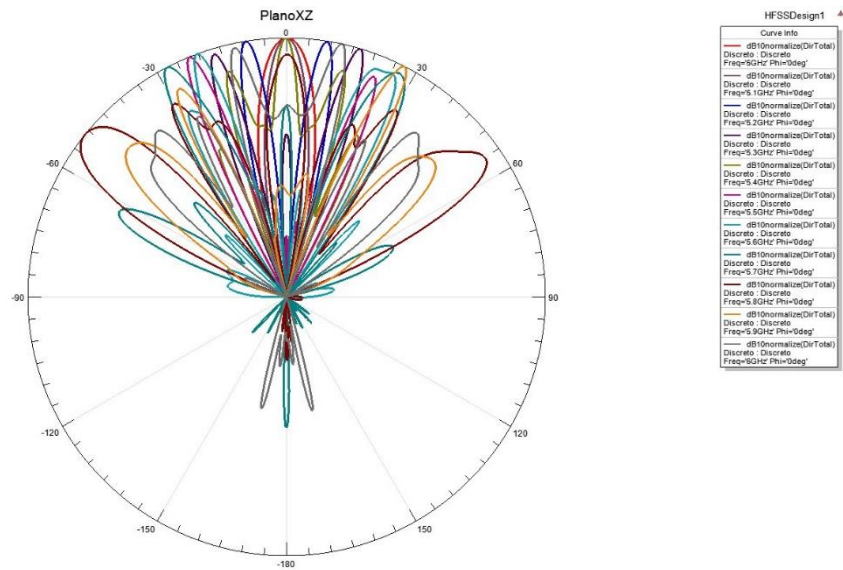


Figura 55 Diagrama de radiación en el plano XZ

Se puede observar tanto la apertura del haz de radiación, como la aparición de lóbulos secundarios de menos potencia. Sucede de forma mucho más clara en el plano YZ mostrado a continuación:

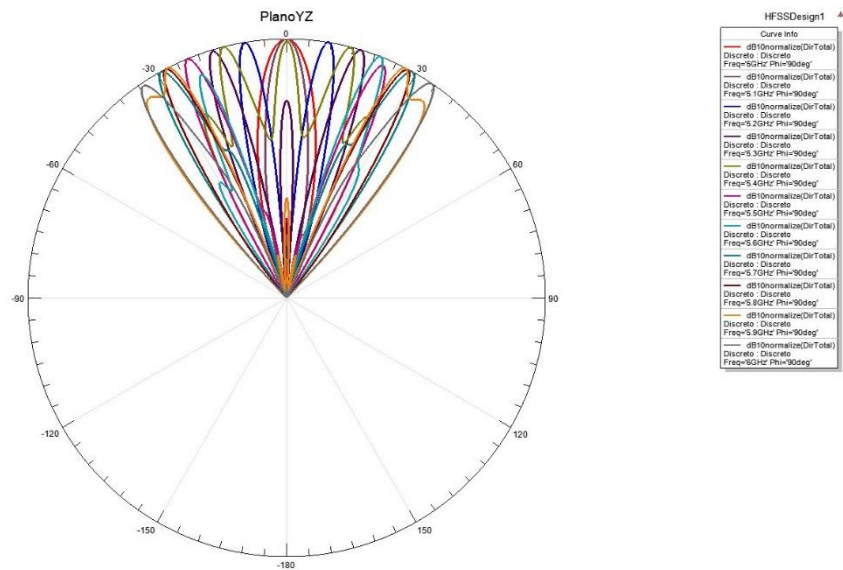


Figura 56 Diagrama de radiación en el plano YZ

Para realizar la simulación en la que encontraremos la localización del dron, voy a centrarme en los canales de 5.1 GHz, 5.2 GHz y 5.3 GHz. Utilizando únicamente los canales mencionados, y realizando un escaneo de la potencia recibida en estas frecuencias, el dron será capaz de procesar un sistema monopulso para encontrar el ángulo  $\theta$  más probable en el que estaría ubicado. El sistema funcionaría cuando el dron esté lo suficientemente cerca de la plataforma de aterrizaje, donde las funciones monopulso sean válidas.

Para los canales de 5.1 GHz, 5.2 GHz y 5.3 GHz que se van a usar, tenemos los siguientes diagramas de radiación:

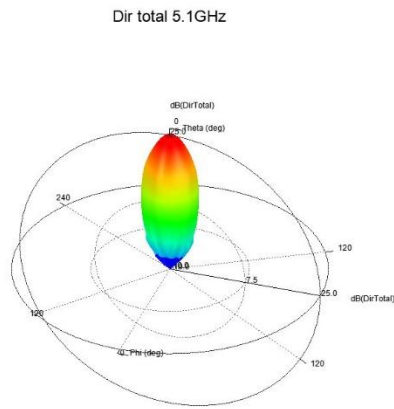


Figura 57 Diagrama de radiación para 5.1 GHz

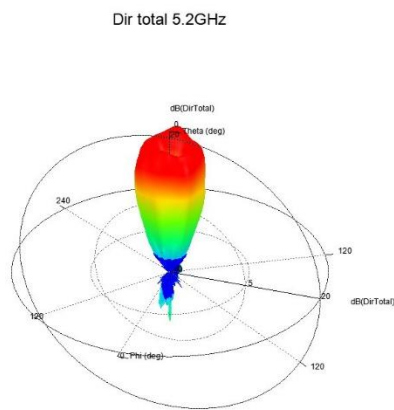
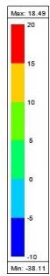


Figura 58 Diagrama de radiación para 5.2 GHz

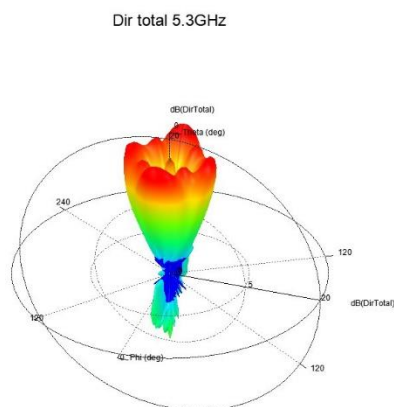
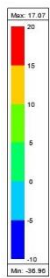


Figura 59 Diagrama de radiación para 5.3 GHz

Vemos que se produce una apertura lo suficientemente diferenciada en estos canales a medida que aumenta la frecuencia, por lo que se podrán utilizar estos diagramas de radiación en nuestra aplicación. Para cada plano (plano XZ y plano YZ), la evolución del ángulo de máxima radiación es la siguiente:

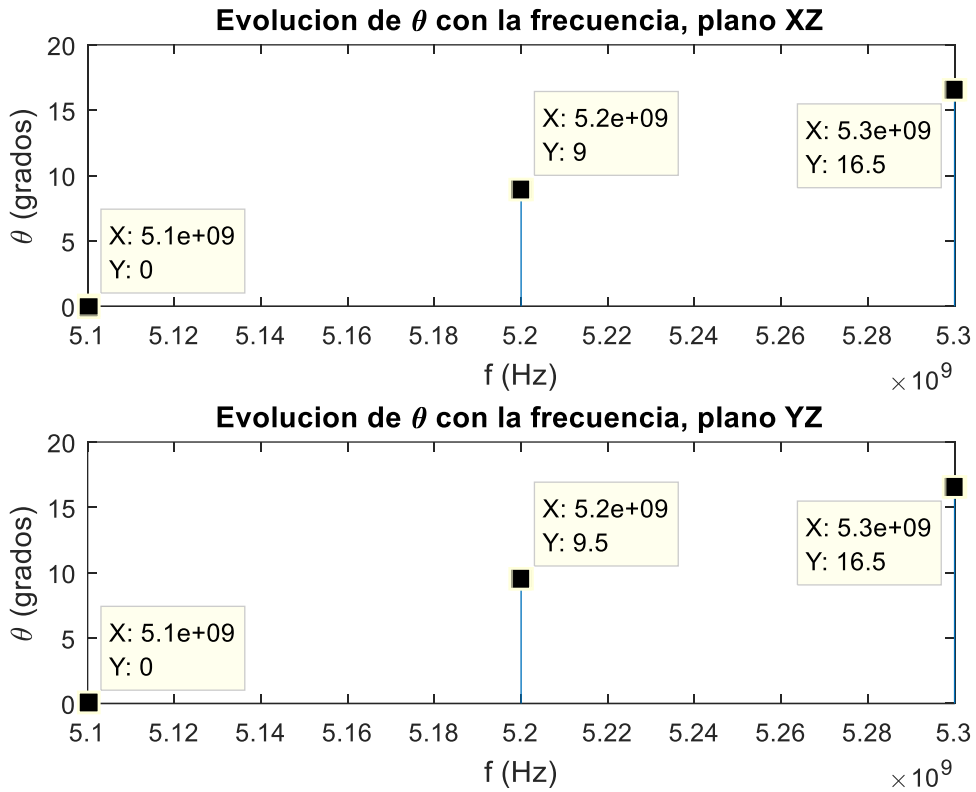


Figura 60 Evolución de  $\vartheta$  con la frecuencia

Para construir las funciones monopulso, vamos a tener que centrarnos en un plano concreto. Los primeros planos que vienen a la mente son el plano XZ o el plano YZ. Sin embargo, únicamente podremos utilizar uno de ellos; aunque el resultado debería ser el mismo o similar: el dron acabará encontrando el centro de la plataforma para poder aterrizar.

Para el plano XZ, tenemos el siguiente plano de directividades de los canales de interés:

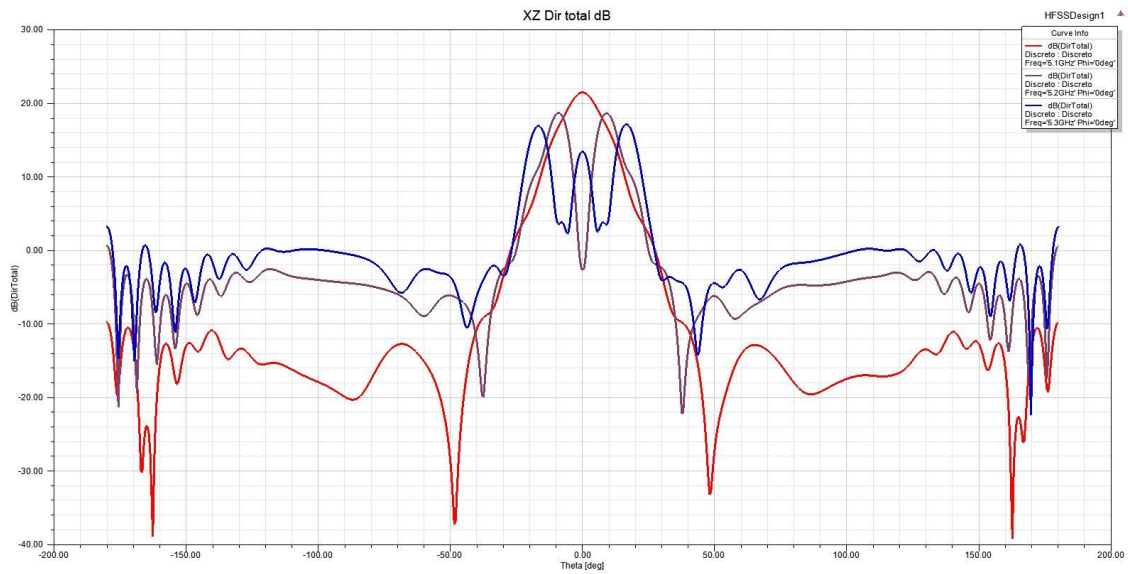


Figura 61 Directividad total en plano XZ para canales de interés

Podemos normalizar las directividades y representar únicamente los rangos de valores de potencia que influyan en nuestra aplicación; ya que, por ejemplo, una potencia de -30 dB respecto a nuestro máximo es prácticamente una potencia nula.

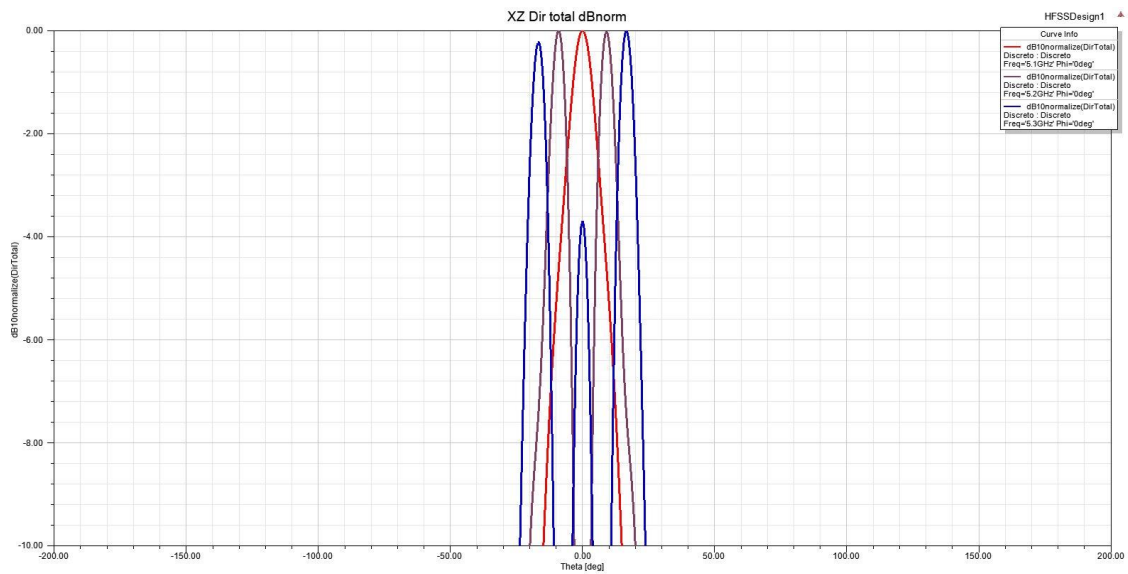


Figura 62 Directividad normalizada en plano XZ para canales de interés

Para 5.1 GHz, tenemos un único haz centrado en  $\theta=0^\circ$ ; para 5.2 GHz se observa ya la apertura del haz; mayor aun en el canal de 5.3 GHz.

Sucede lo mismo en el plano YZ, y podemos ver el resultado en las gráficas que se muestran a continuación:

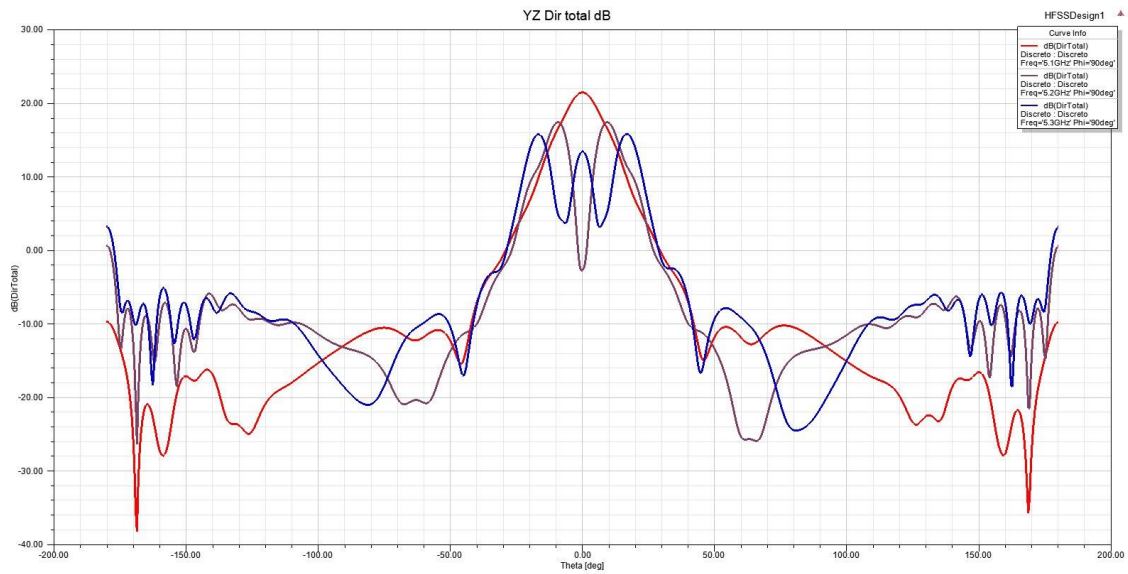


Figura 63 Directividad total en plano YZ para canales de interés

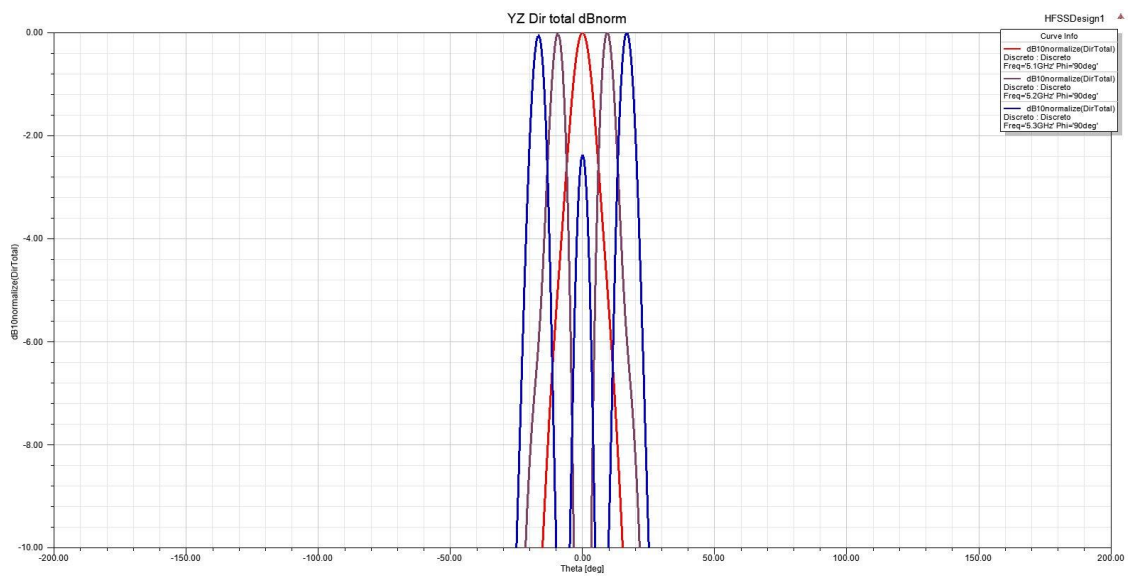


Figura 64 Directividad normalizada en plano YZ para canales de interés

Se podría utilizar cualquiera de los dos planos para continuar con el procesado monopulso, pero hay que elegir uno en concreto. En nuestro caso, el plano que se va a utilizar va a ser el plano XZ.

## 4. Estimación de la localización.

### 4.1. Análisis de la función monopulso.

Para realizar el análisis de la función monopulso, partimos de los resultados teóricos de los diagramas de radiación de nuestra antena Fabry-Pérot, expresados en decibelios.

Lo primero que tenemos que hacer con estos resultados es normalizarlos según la potencia máxima de cada canal. Una vez hecho esto, hay que transformarlos a lineal para poder operar con ellos más fácilmente.

Con las ganancias ya normalizadas y en lineal, hay que obtener las funciones monopulso MF. En nuestro caso, tendremos 2 funciones monopulso: la que relaciona el canal de 5.1 GHz con el canal de 5.2 GHz, y la que relaciona este último canal con el de 5.3 GHz.

$$MF(\theta, f_i) = \frac{\Delta(\theta, f_i)}{\Sigma(\theta, f_i)} = \frac{\overline{G_B}(\theta, f_i) - \overline{G_A}(\theta, f_i)}{\overline{G_B}(\theta, f_i) + \overline{G_A}(\theta, f_i)}$$

$\Delta$  corresponde a la función diferencia, mientras que  $\Sigma$  se corresponde a la función suma. Reciben el nombre de patrón suma y diferencia, y esto se debe a que se obtienen mediante la resta y la suma de los patrones de haz individuales producidos.

Esta ecuación es una extensión de la definición convencional de funciones de amplitud-monopulso, para el caso de nuestro array con escaneo en frecuencia.

El campo de visión de cada función monopulso viene dado por el rango angular, donde la función monopulso varía linealmente entre -1 y +1.

Una vez que se han obtenido las funciones monopulso y utilizando factores de corrección de cada patrón de ganancia, obtenemos un valor monopulso por cada función monopulso (2 en nuestro caso).

$$MV_j = \frac{P(x, f_i)PF_x(f_i) - P(y, f_i)PF_x(f_i)}{P(x, f_i)PF_x(f_i) + P(y, f_i)PF_x(f_i)}$$

Con este cálculo hecho, el siguiente paso es calcular la función de error a partir de la diferencia entre las funciones monopulso y el valor monopulso medido para cada función. Esta función de error representa la diferencia entre la dirección del objetivo y la dirección de la antena. Cuando ambas direcciones coinciden, la señal de error tomará valor nulo. La señal de error se usa para medir la dirección del objetivo o DoA en relación con la dirección del eje conocida.

$$Error_m(\theta) = |MF_m(\theta, f_i) - MV_m(f_i)|$$

Debido a pequeñas fluctuaciones de las funciones monopulso, pueden aparecer ambigüedades angulares. Para solucionarlo, se calcula el error acumulativo total, es decir, el error cuadrático medio de todos los errores cuando se considera un número dado M de patrones monopulso.

$$OCE_M(\theta) = \sqrt{\sum_{m=1}^M \frac{1}{M} * Error_m^2(\theta)}$$

De esta forma, se eliminan las ambigüedades creadas y podemos definir el pseudoespectro angular o  $APS(\theta)$  como el inverso de la  $OCE_M(\theta)$ , y transformado posteriormente a escala logarítmica.

$$APS(\theta) = -20 * \log\left(\frac{1}{OCE_M(\theta)}\right)$$

#### 4.1.1. Prueba de la función monopulso.

Para empezar a realizar el procesado, hay que exportar los resultados de HFSS para así poder importarlos a Matlab. Como he decidido utilizar el plano XZ de directividades, es este plano el que necesito importar. Una vez hecho esto, puedo separar en matrices diferentes los datos referidos al ángulo  $\theta$  y las directividades para las frecuencias de 5.1 GHz, 5.2 GHz y 5.3 GHz. También habría que establecer un ángulo de llegada con el que queremos hacer las pruebas, que será de  $10^\circ$ .

Si representamos las diferentes directividades respecto del ángulo  $\theta$ , obtenemos la siguiente figura:

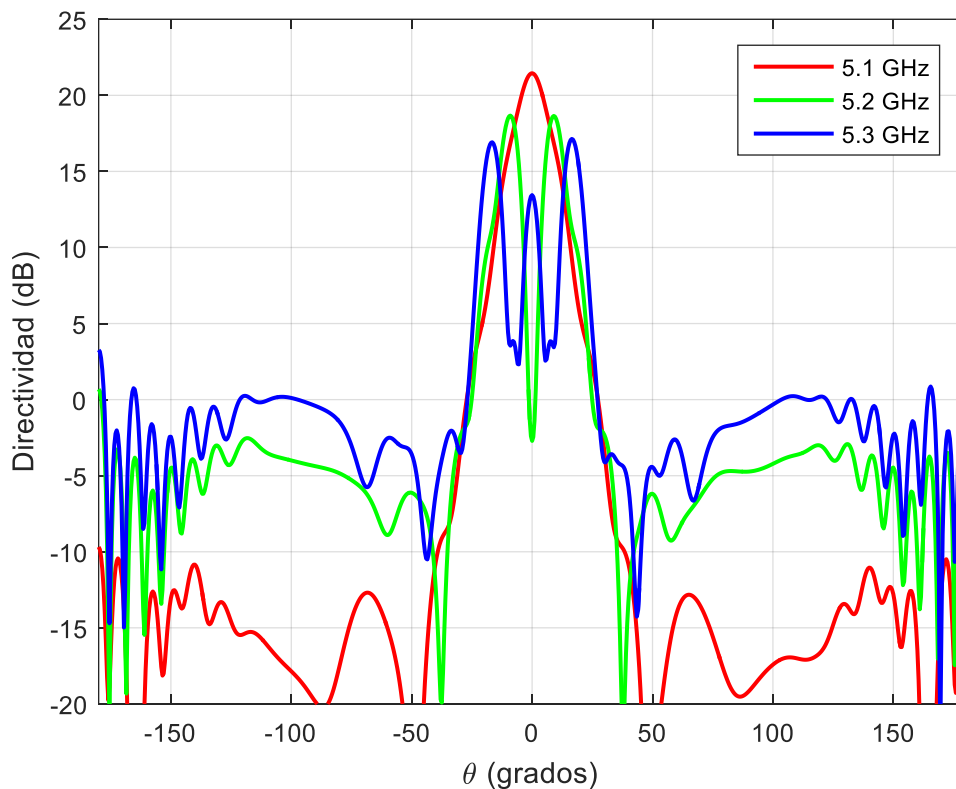


Figura 65 Directividad total para las frecuencias de interés

Una vez hecho esto, podemos sacar el valor máximo de las directividades de cada frecuencia para conseguir la directividad normalizada.



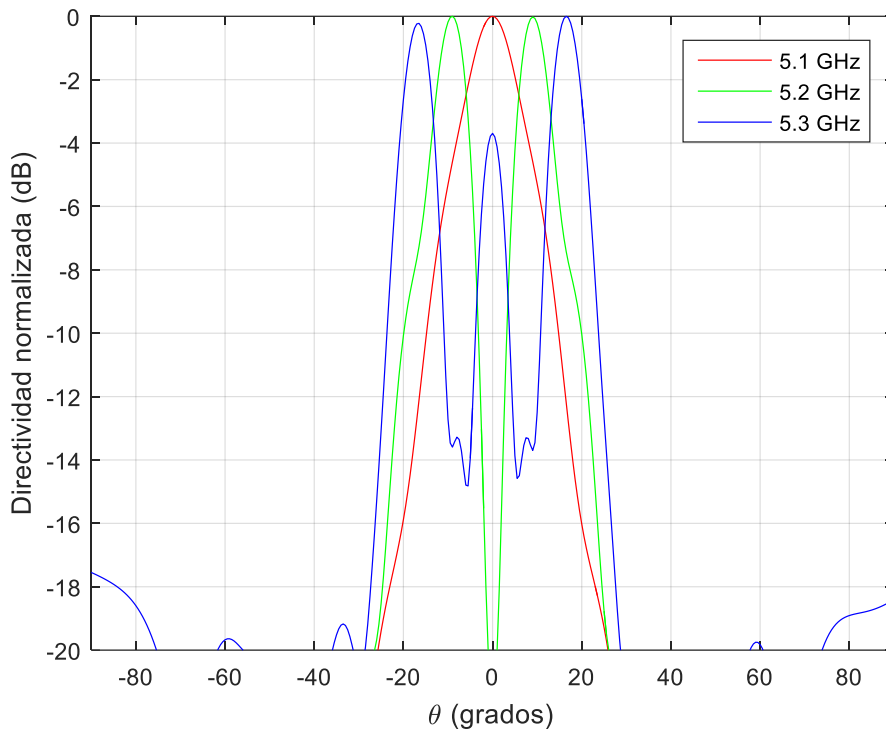


Figura 66 Directividad normalizada para las frecuencias de interés

Estas directividades normalizadas son las que transformamos a escala logarítmica para obtener las funciones monopulso. Podemos representar estas funciones junto con el ángulo DoA, para así comprobar en qué ángulos toma la función monopulso el mismo valor que cuando nos situamos en la dirección de llegada.

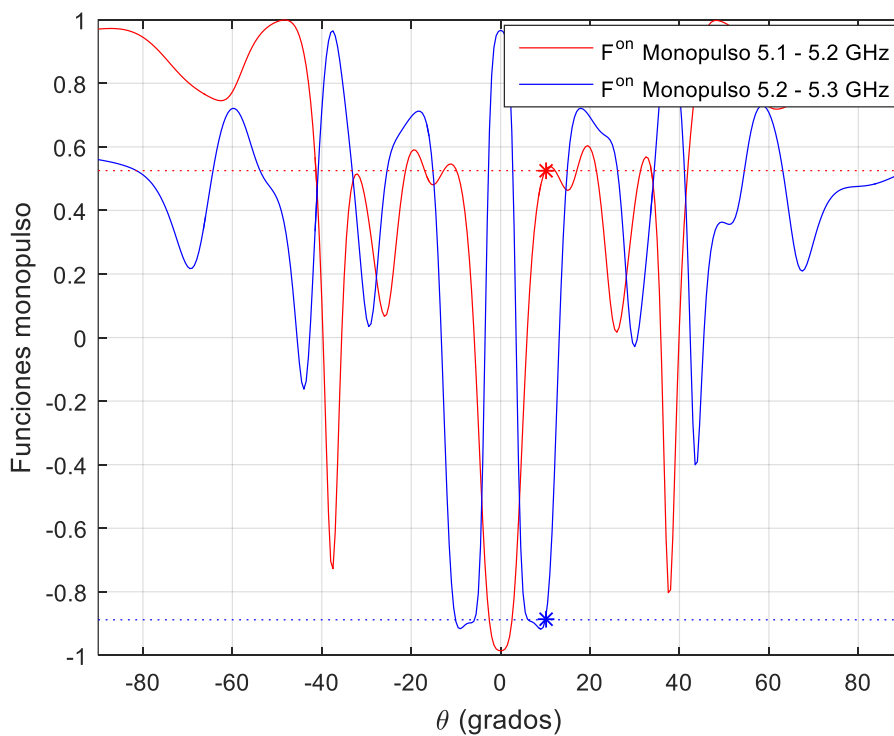


Figura 67 Funciones monopulso

La zona de trabajo será la zona lineal de las zonas monopulso, que es donde la obtención del ángulo  $\theta$  se realizará correctamente. Si nos salimos de esta zona lineal, los resultados pueden ser incorrectos. Se puede comprobar que esta zona lineal abarca unos  $18^\circ$  tanto a la derecha como a la izquierda del eje central.

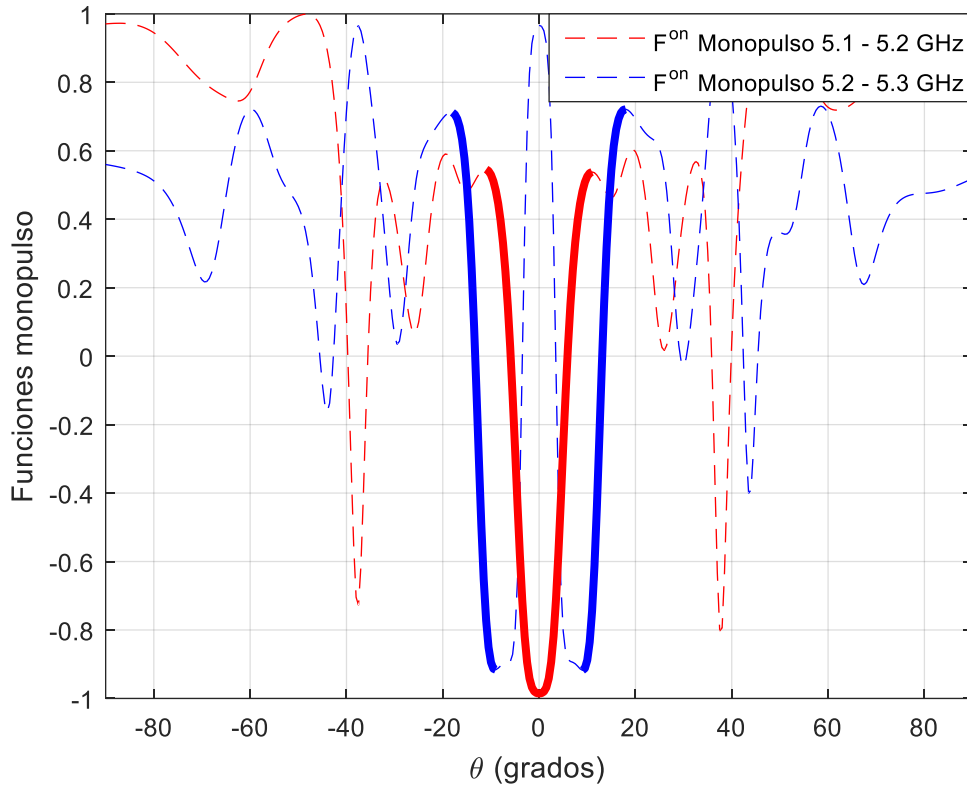


Figura 68 Zona lineal de las funciones monopulso

Calculando el error de los datos recibidos y las funciones monopulso, podremos obtener el ángulo DoA de interés. Teniendo en cuenta que trabajamos con valores absolutos, la dirección de llegada será el ángulo para el que el error sea más próximo a cero. Si vemos el pseudoespectro, nuestro ángulo obtenido es  $\theta=10^\circ$  (que es el ángulo que se estableció al principio).

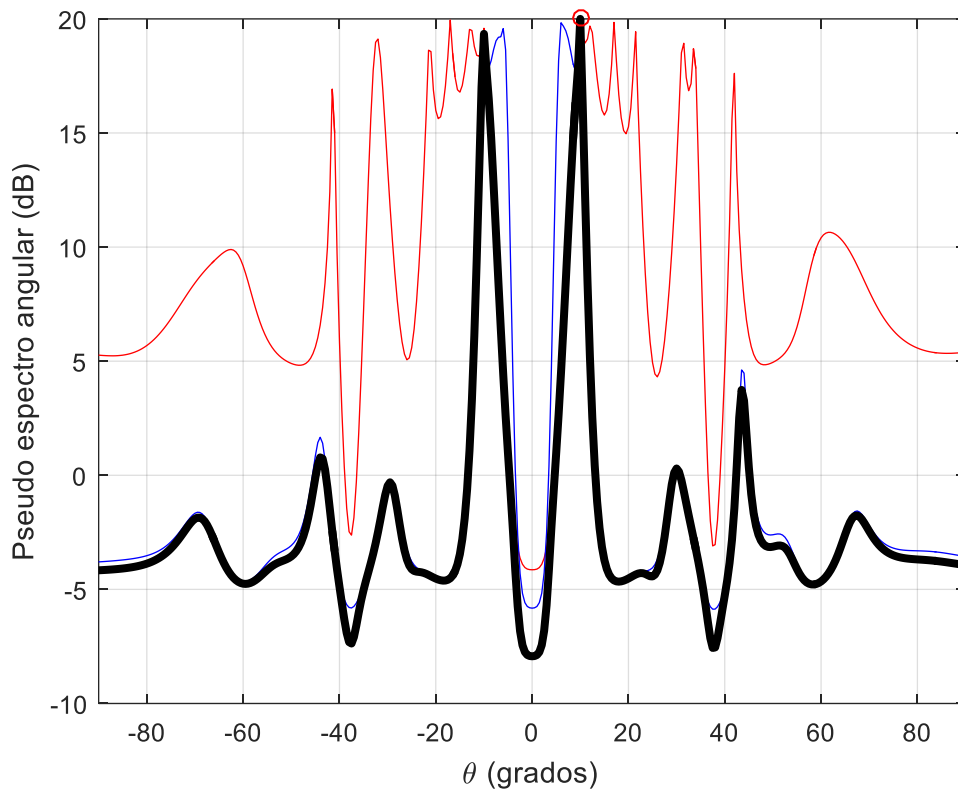


Figura 69 Pseudoespectro angular

#### 4.1.2. Coordenadas $\theta$ - $\phi$ .

Los datos tratados en el apartado anterior podemos observarlos en coordenadas tridimensionales; y el sistema de coordenadas más directo es el  $\theta$ - $\phi$ .

Lo que hay que hacer es obtener las matrices de directividades, la matriz del ángulo  $\theta$  y la del ángulo  $\phi$ . Una vez hecho esto, tenemos una fácil visualización en Matlab.

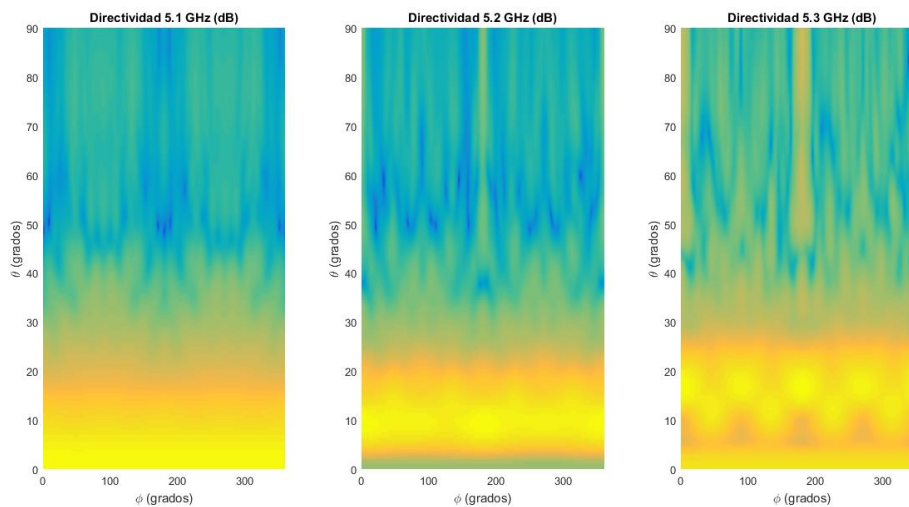


Figura 70 Directividad total para cada frecuencia en coordenadas  $\vartheta$ - $\phi$

En el eje ordenadas podemos ver el valor de  $\theta$ , en el eje de abscisas se encuentra la coordenada  $\phi$ , y el valor de la directividad para esas coordenadas se distingue mediante los diferentes colores.

Este sistema de coordenadas no es del todo visual; y es por eso por lo que es conveniente recurrir al sistema de coordenadas u-v.

#### 4.1.3. Coordenadas u-v.

Gracias a las coordenadas u-v podemos ver de forma más visual y clara tanto la directividad como el campo de visión o FoV de nuestra antena Fabry-Pérot. El FoV es el ángulo abarcable a través el cual nuestro dron es capaz de encontrar su posición respecto al centro de la plataforma de aterrizaje para poder estacionar.

Las directividades representadas en el apartado anterior, pero vistas en coordenadas u-v, toman la siguiente forma:

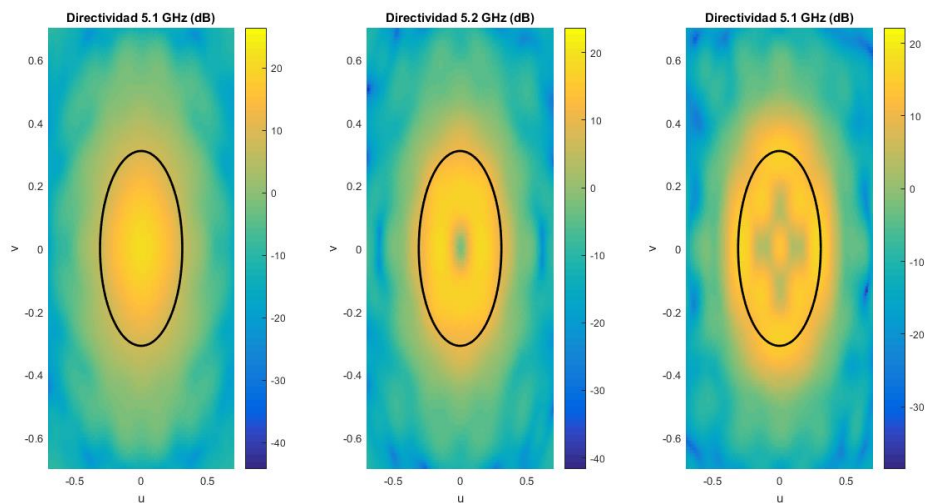


Figura 71 Directividad total para cada frecuencia en coordenadas u-v

La circunferencia representada en negro representa el FoV. Una vez que el dron esté situado dentro de dicha zona; es decir, dentro del FoV, será capaz de encontrar el ángulo DoA correctamente para poder aterrizar. Hasta que no se sitúa dentro de estos límites, utilizando el sistema GPS, no será capaz de encontrar su posición respecto a la antena Fabry-Pérot.

Se puede observar también la apertura cónica del diagrama de radiación en las figuras anteriores a medida que aumentamos en frecuencia; y esto es la clave para encontrar el DoA (utilizando las funciones monopulso obtenidas previamente).

Es indiferente que se produzca atenuación en la señal, ya que estamos comparando valores de potencia entre sí. Si se produce atenuación, se producirá por igual en todas las frecuencias de interés. Al comparar estas señales para construir los valores que a su vez se compararán con las funciones monopulso, no habrá diferencia si ambas señales están igual de atenuadas.

#### 4.2. Posición del dron y cálculo de la distancia.

Para empezar con una simulación en la que el dron está situado dentro del campo de visión, hay que darle una posición en la que establezcamos unos ángulos válidos. Como primer ejemplo para comprobar el buen funcionamiento, voy a situar el dron en una posición de  $\theta=5^\circ$  y  $\phi=90^\circ$ .

Se podría haber escogido cualquier otra combinación de ángulos siempre  $\theta$  sea menor a  $18^\circ$ , que es nuestro FoV.

Para esta posición, que corresponderá también a una coordenada u-v determinada que podemos calcular, recibiremos unos valores concretos de señal. Estos valores de potencia recibidos son los que usamos para obtener los valores monopolso que se compararán con la función monopolso empleada en los apartados anteriores. El resultado obtenido se muestra a continuación:

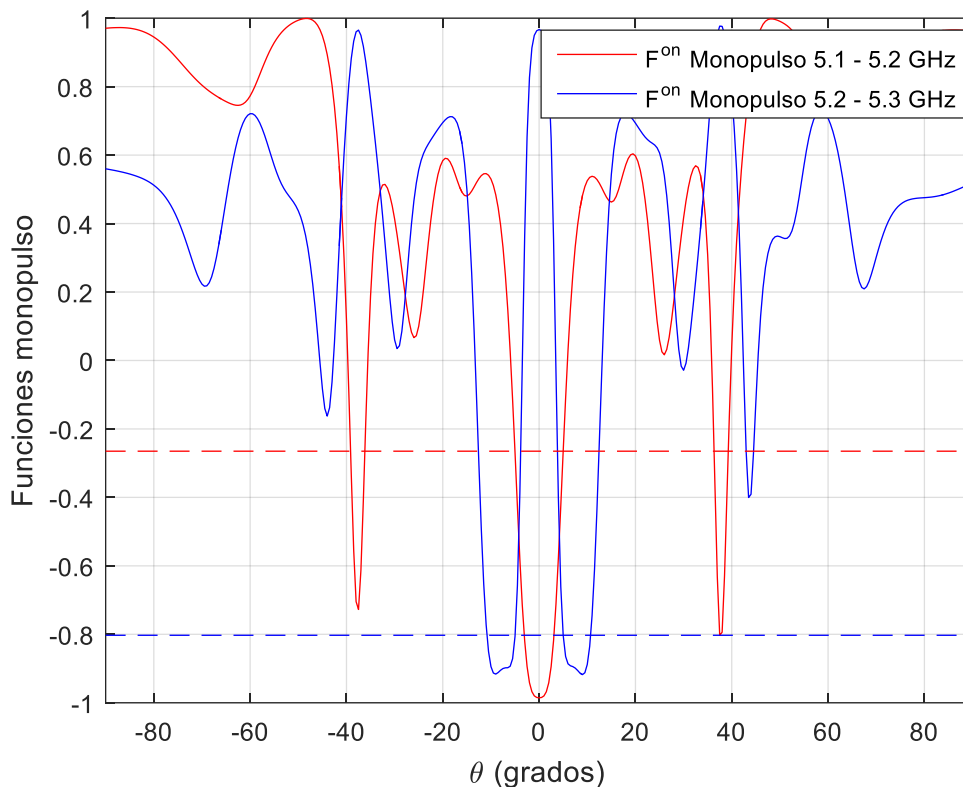


Figura 72 Comparación de la señal recibida con las funciones monopolso

En rojo está representada la función monopolso obtenida mediante el diagrama de radiación a 5.1 y 5.2 GHz, y el valor obtenido al comparar el nivel de señal recibido de los canales mencionados. Por otro lado, en azul, tenemos los mismos datos pero comparando los canales de 5.2 y 5.3 GHz.

Vemos que coinciden los valores monopolso obtenidos en varios puntos de las funciones monopolso. Sin embargo, tenemos que fijarnos en el error mínimo (más próximo a 0) para un mismo ángulo  $\theta$  en ambas funciones. Calculando el pseudoespectro angular, vemos que el ángulo obtenido es el  $\theta=5^\circ$  en el que habíamos situado el dron.

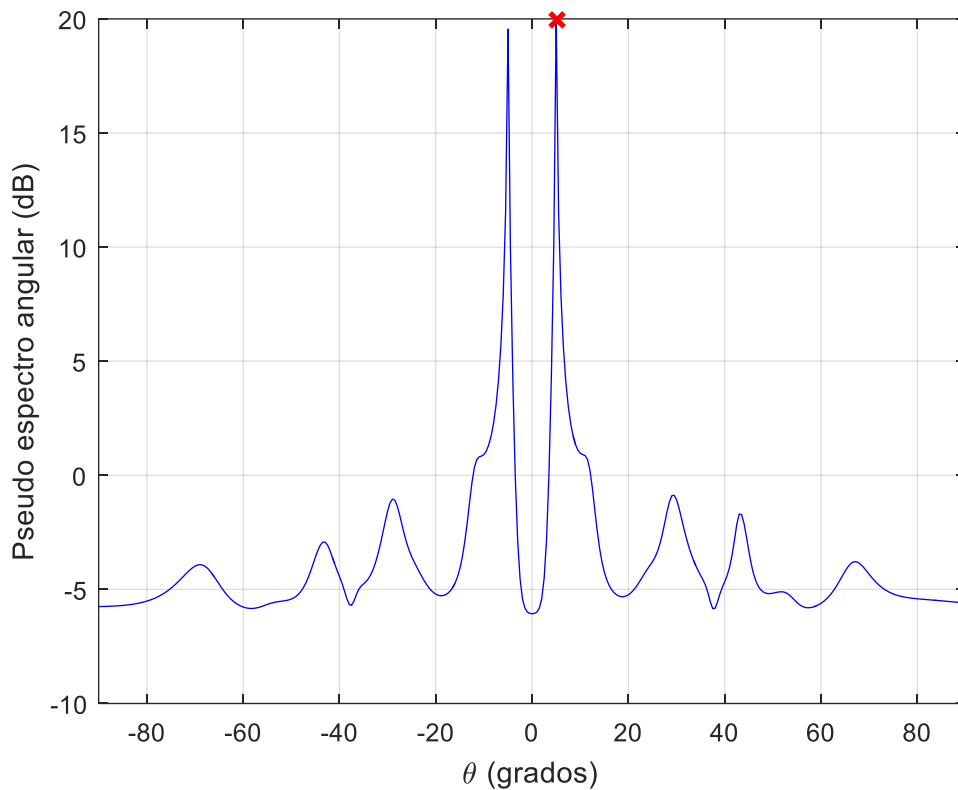


Figura 73 Pseudoespectro angular para un caso específico

Estos resultados podemos verlos en coordenadas u-v más claramente en la siguiente figura:

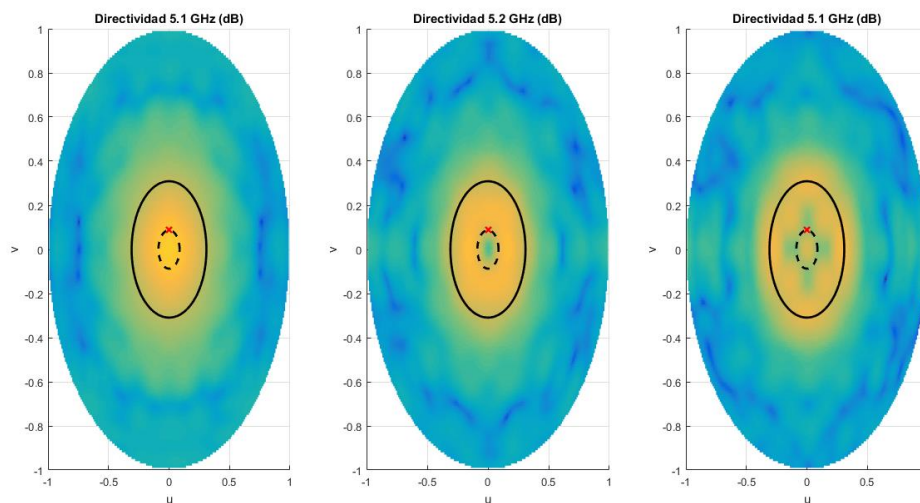


Figura 74 Posición del dron en coordenadas u-v para un caso específico

Se observa para las 3 frecuencias escogidas que el dron (marcado con una cruz roja) está situado dentro del FoV (representado con una circunferencia continua en negro). La posición calculada sería el ángulo representado en línea negra discontinua. No conocemos exactamente en qué posición está situado el dron, pero sabemos su ángulo  $\theta$  (desconocemos el ángulo  $\phi$ ). Si nos acercamos a la plataforma de aterrizaje, este ángulo obtenido debería disminuir; mientras que, si nos alejamos de la plataforma, el ángulo  $\theta$  será mayor. Iterando varias veces y situando el dron en diferentes posiciones, seremos capaces de llevar el dron al centro de la plataforma. Es

por esto por lo que no importa tanto obtener el ángulo  $\phi$ , sino que es suficiente con conocer el ángulo  $\theta$ . Conocemos una circunferencia de posiciones posibles en las que puede estar situado el dron.

#### 4.3. Pseudoespectro en coordenadas u-v.

El pseudo espectro obtenido para el ejemplo anterior, podemos representarlo también en coordenadas tridimensionales para que se vean todas las posibles posiciones del dron (ángulo  $\theta$  obtenido). Estas posiciones coinciden con el ángulo en el que el error toma un valor más próximo a 0. En coordenadas  $\theta$ - $\phi$ , obtenemos el siguiente pseudoespectro angular:

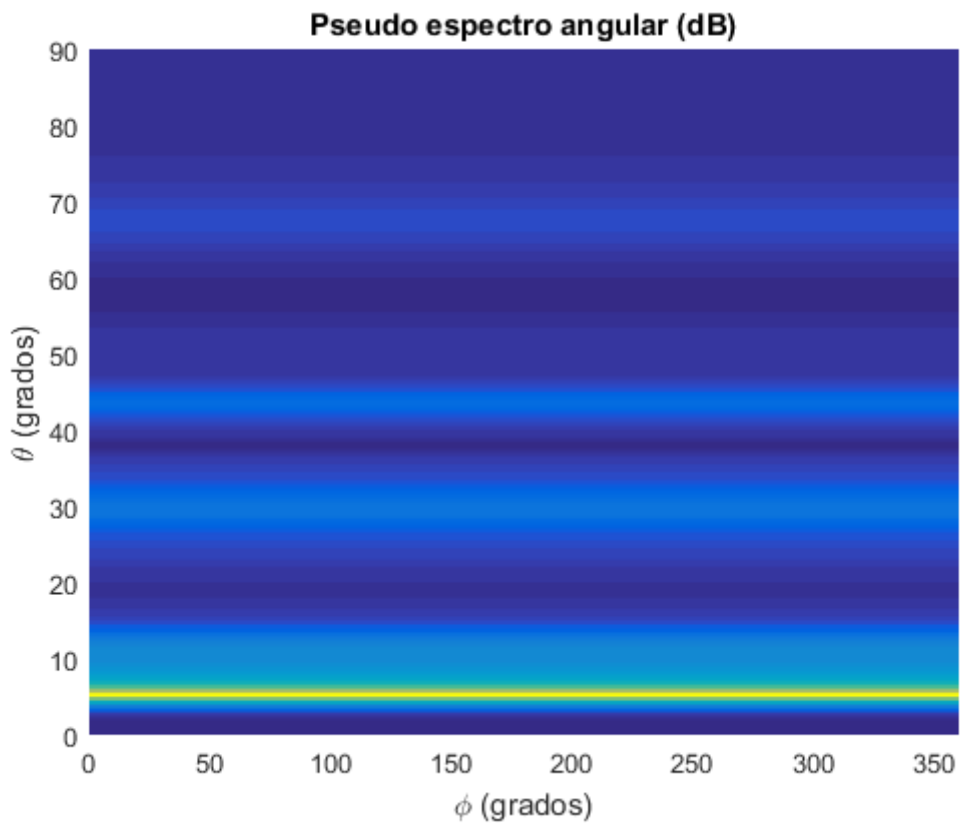


Figura 75 Pseudoespectro angular en coordenadas  $\vartheta$ - $\varphi$  para un caso específico

Coincide este ángulo con la línea representada en amarillo, que si convertimos a coordenadas u-v para verlo más claramente obtenemos lo siguiente:

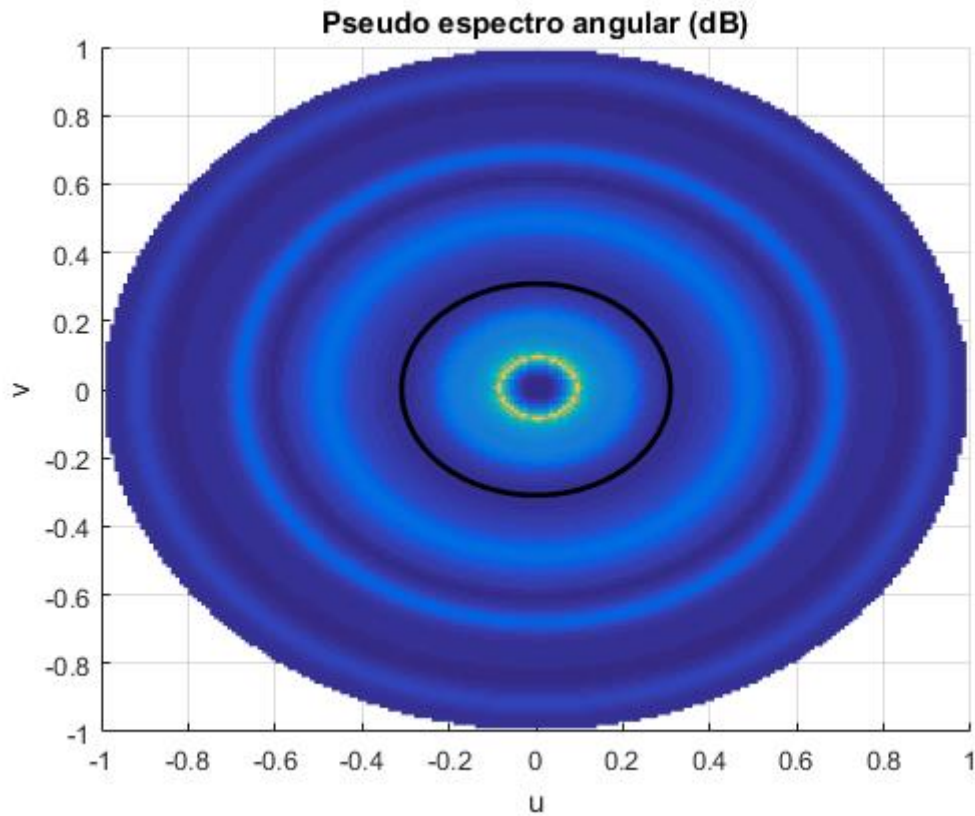


Figura 76 Pseudoespectro angular en coordenadas u-v para un caso específico

La línea amarilla representa el ángulo  $\theta=5^\circ$ , que es la posición en la que se había situado el dron. Es la zona en la que el pseudoespectro toma un valor más alto, es decir, cuando el error en valor absoluto más se aproxima al valor nulo.



## 5. Ejemplos de aplicaciones.

En realidad, no necesitamos tantas figuras para poder analizar los resultados obtenidos. Lo primero que tenemos que analizar son las directividades para las frecuencias de 5.1 GHz, 5.2 GHz y 5.3 GHz que utilizamos para calcular las funciones monopulso. Hay que fijarse también en su valor máximo, ya que trabajamos con directividades normalizadas:

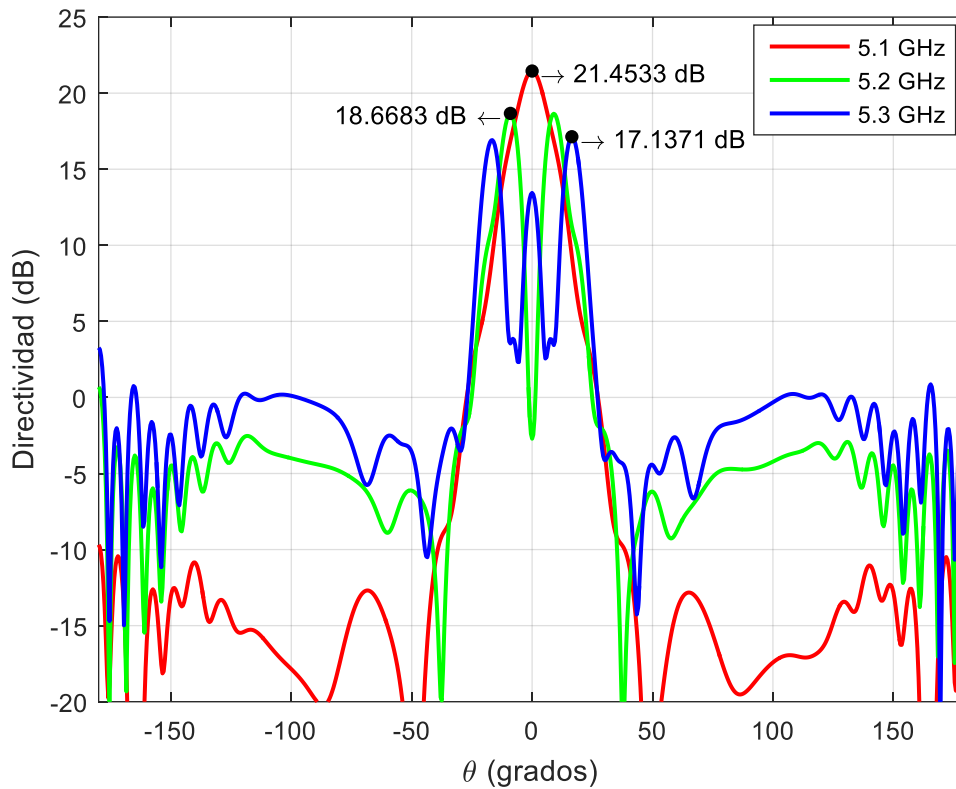


Figura 77 Directividad total y valor máximo

Situamos el dron en una posición de  $\theta=5^\circ$  y  $\phi=90^\circ$ . Para esta posición concreta, dentro del FoV, obtenemos ciertos valores monopulso que se comparan con la función monopulso. Como sabíamos de apartados anteriores, cada valor monopulso coincide con varios ángulos  $\theta$  de las funciones monopulso, pero hay que encontrar el ángulo  $\theta$  correcto en el que está situado el dron.

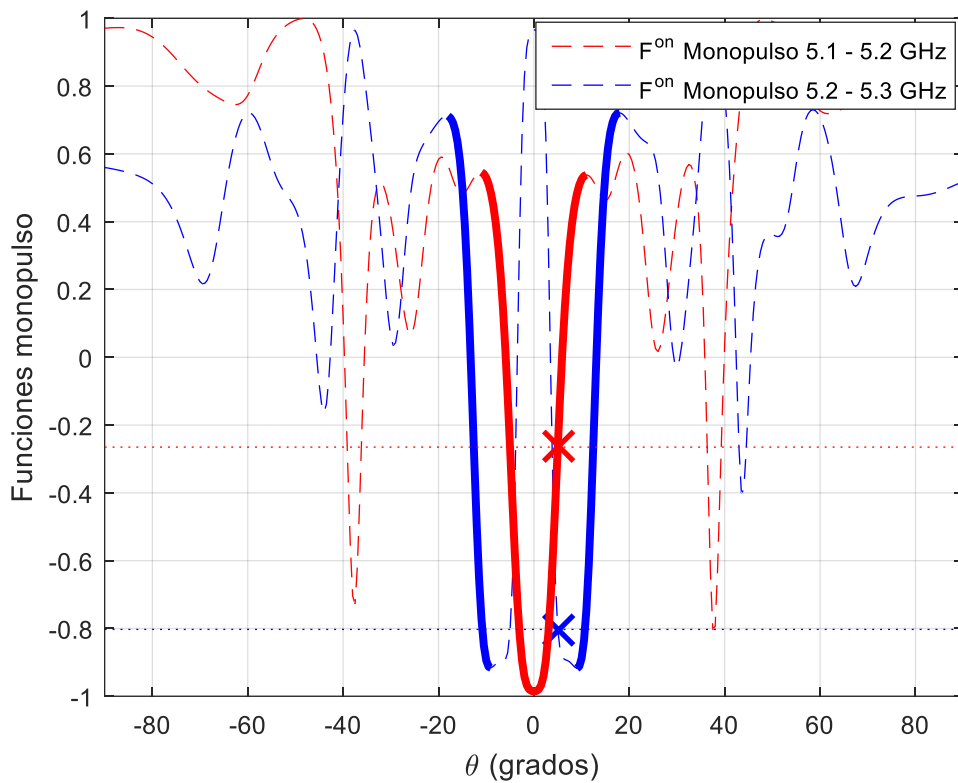


Figura 78 Funciones y valores monopulso

El ángulo  $\theta$  de interés es en el que el pseudoespectro obtenido tome un valor mayor. Siempre y cuando estemos situados dentro del FoV, el resultado obtenido será correcto.

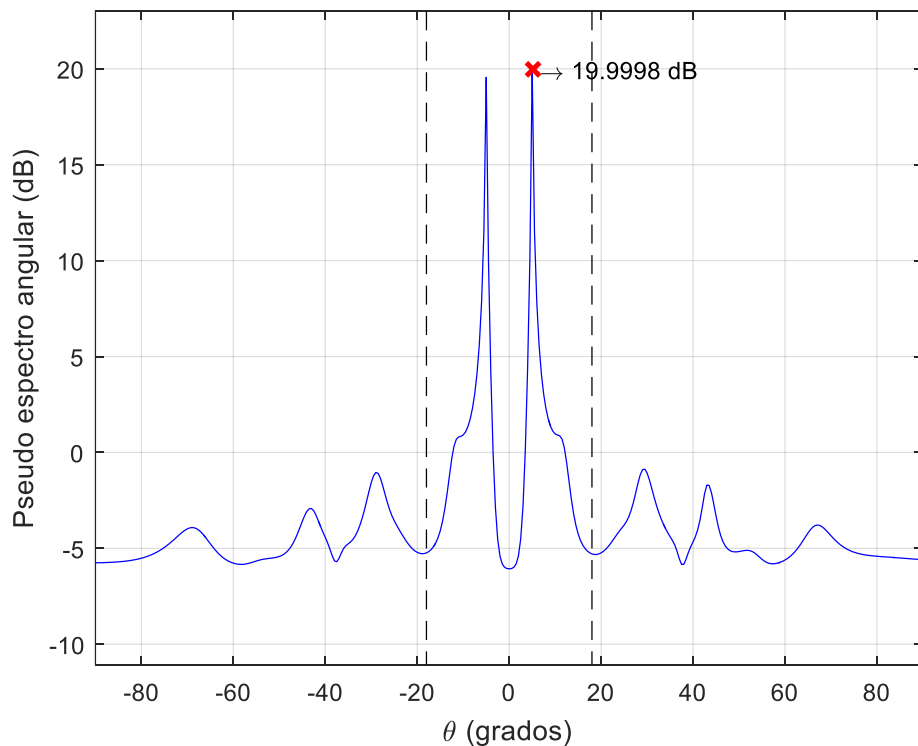


Figura 79 Pseudoespectro y FoV

Se puede observar que el ángulo  $\theta$  en el que el pseudoespectro es máximo, es  $\theta=5^\circ$  (ángulo en el que se situaba el dron). El resultado es correcto tal y como se esperaba, ya que nos encontrábamos dentro del FoV.

En coordenadas u-v, donde el resultado se ve más claro e intuitivo, se aprecia tanto el FoV (representado en línea continua negra) como la posición del dron (cruz en rojo) y el ángulo  $\theta$  obtenido (representado en línea discontinua).

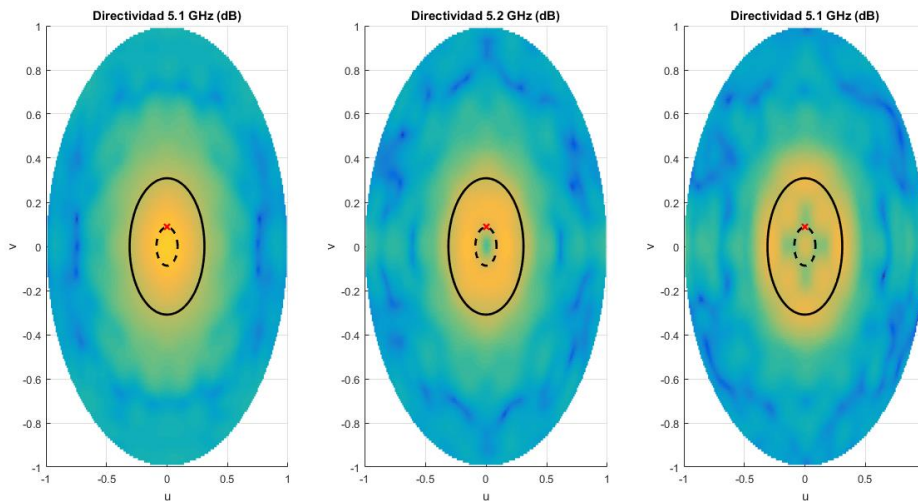


Figura 80 Localización obtenida en coordenadas u-v

La posición del dron calculada es cualquiera que esté situada sobre la línea discontinua; es decir, cualquiera que tenga un ángulo  $\theta=5^\circ$ .

Es importante también fijarse en el pseudoespectro en coordenadas u-v, donde se aprecia igualmente el ángulo  $\theta$  obtenido (posibles localizaciones del dron).

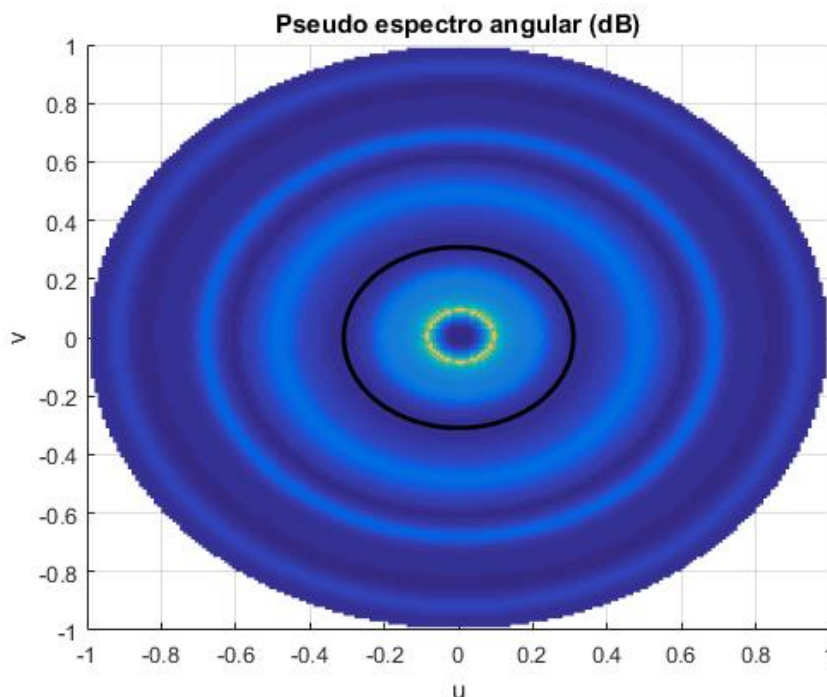


Figura 81 Pseudoespectro en coordenadas u-v

Si escogemos otra posición cualquiera dentro del FoV (por ejemplo,  $\theta=10^\circ$  y  $\phi=180^\circ$ ), el resultado obtenido debería ser también correcto. Las gráficas obtenidas tras el procesado son las siguientes:

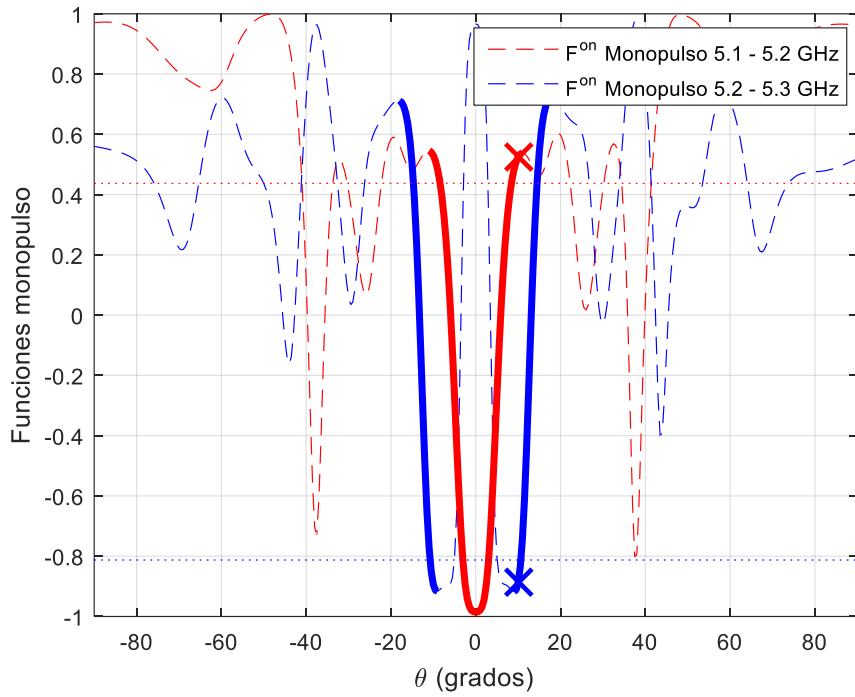


Figura 82 Funciones y valores monopulso

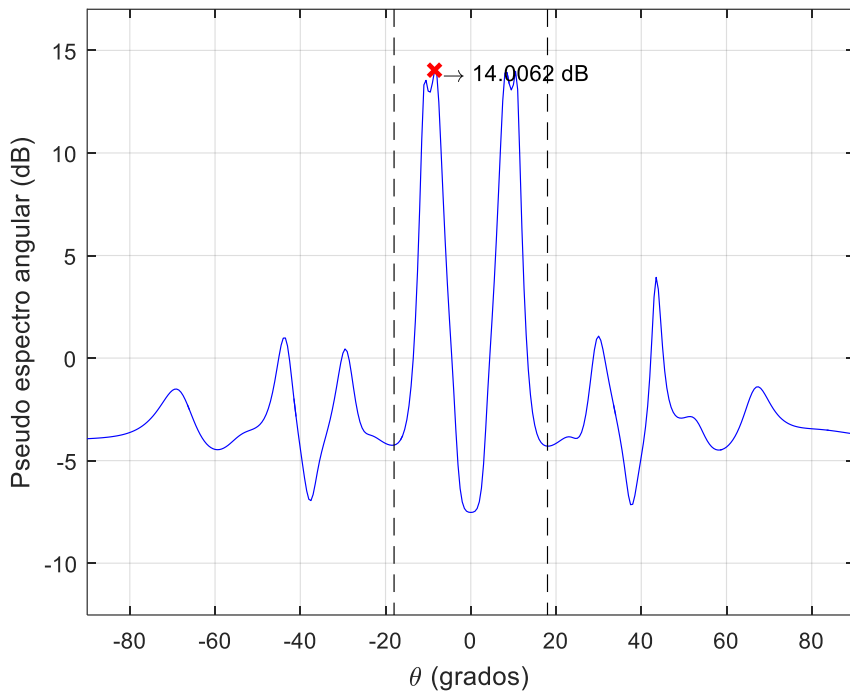


Figura 83 Pseudoespectro y FoV

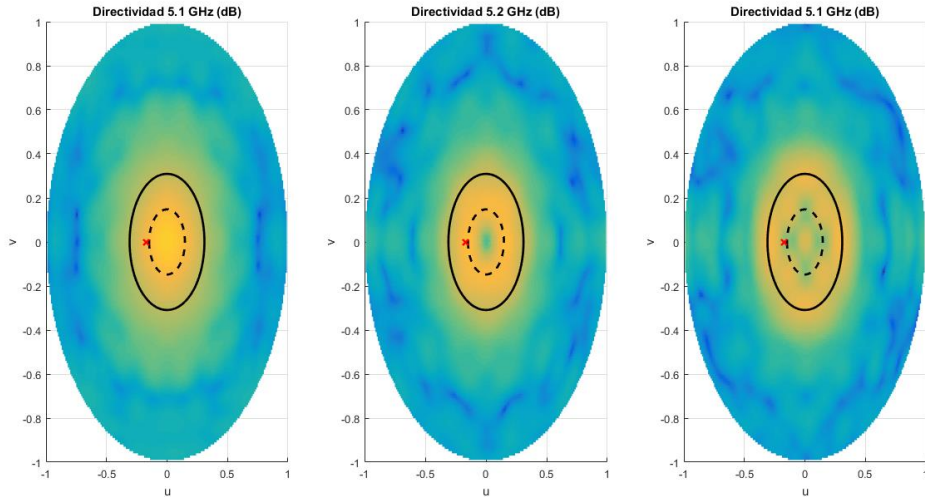


Figura 84 Localización obtenida en coordenadas u-v

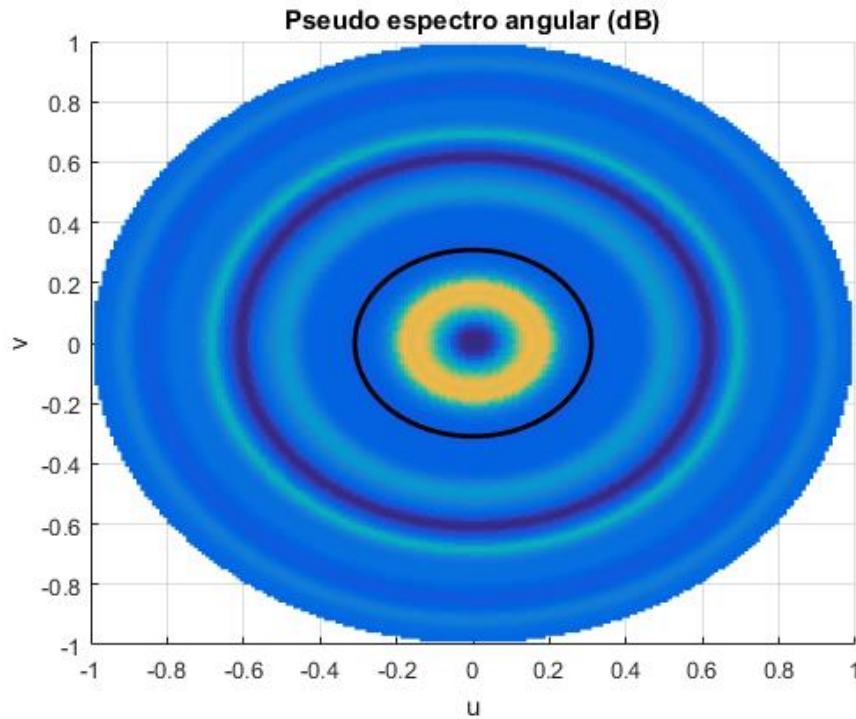


Figura 85 Pseudoespectro en coordenadas u-v

Es indiferente obtener un ángulo  $\theta$  de  $10^\circ$  o de  $-10^\circ$ , ya que nos interesa únicamente su valor absoluto; y dicho valor coincide tanto si el resultado es positivo como negativo.

El resultado obtenido predice con bastante exactitud la posición de nuestro dron. Por otro lado, si ahora colocamos el dron fuera de nuestro campo de visión (por ejemplo,  $\theta=25^\circ$  y  $\phi=45^\circ$ ), el resultado obtenido no tiene por qué ser el correcto. En las siguientes figuras se puede apreciar el resultado obtenido para dicha posición:

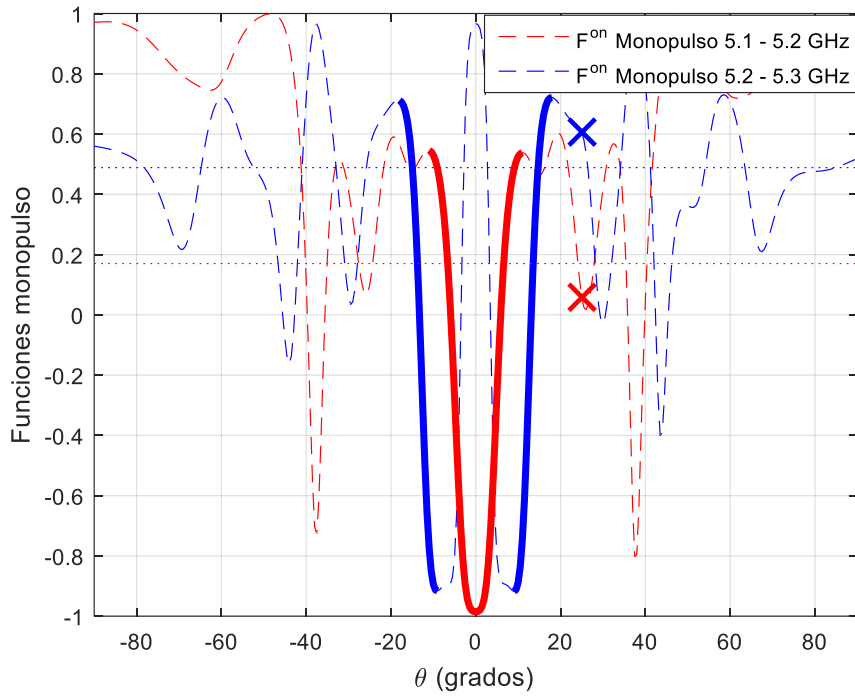


Figura 86 Funciones y valores monopulso

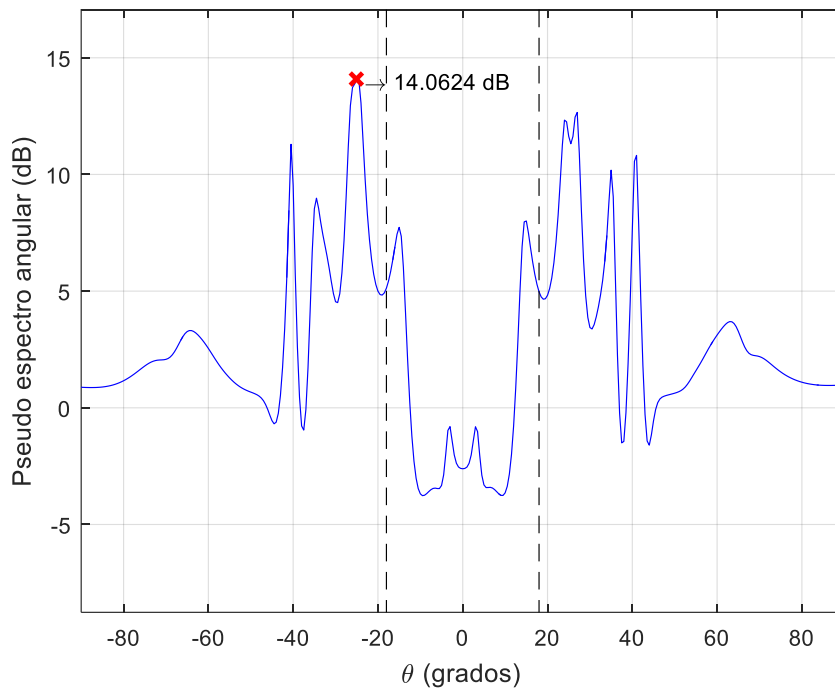


Figura 87 Pseudoespectro y FoV

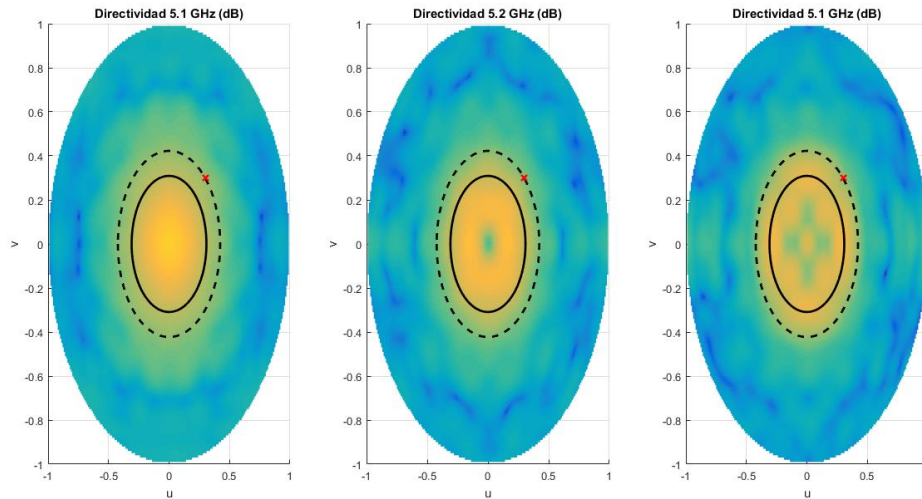


Figura 88 Localización obtenida en coordenadas u-v

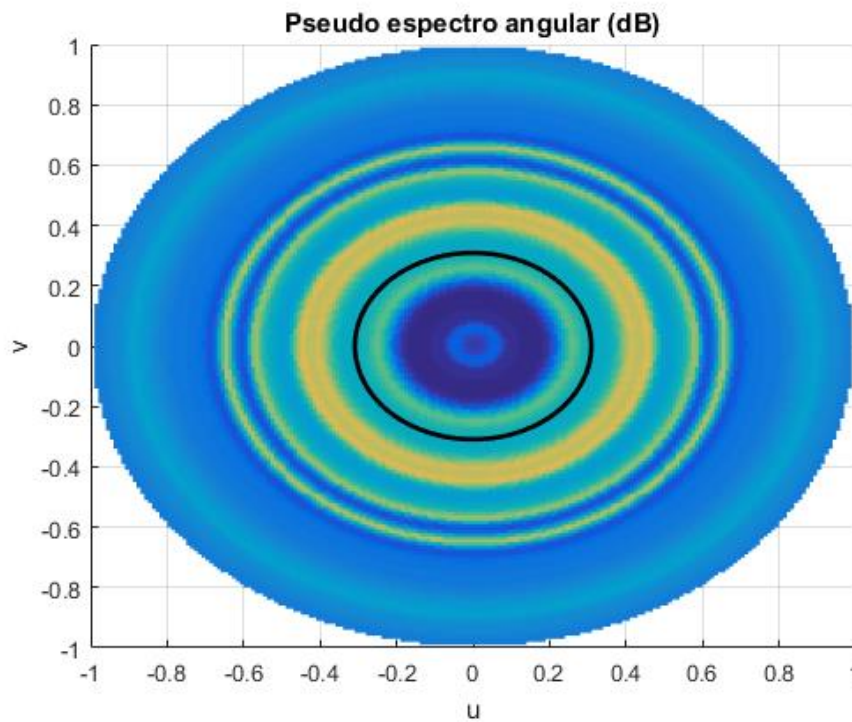


Figura 89 Pseudoespectro en coordenadas u-v

El resultado obtenido en este caso también sería correcto; sin embargo, fuera del FoV no es posible garantizar el correcto funcionamiento. Se puede observar un ejemplo de cálculo erróneo de la localización a continuación, donde el dron está situado en la posición de  $\theta=20^\circ$  y  $\phi=235^\circ$ .

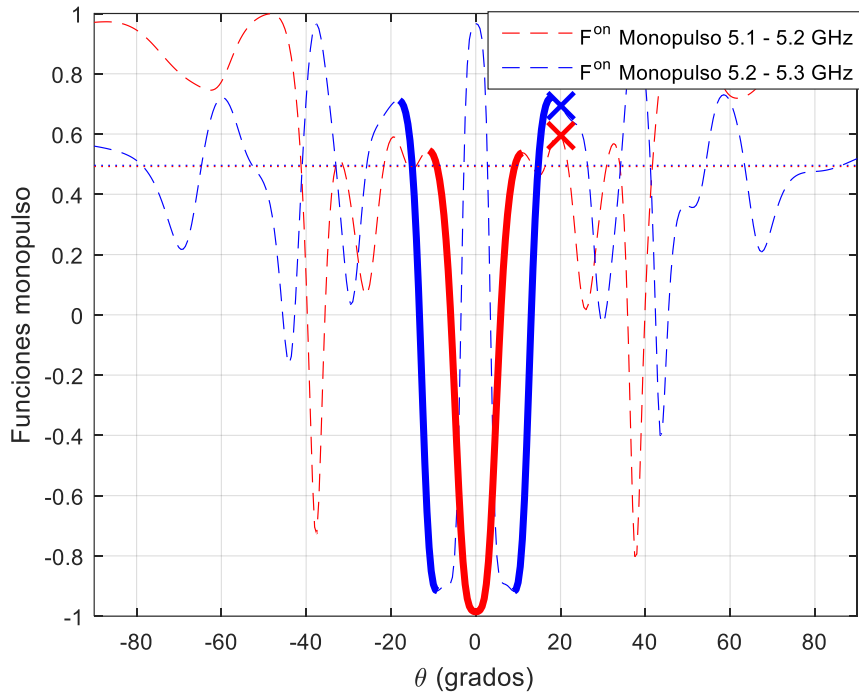


Figura 90 Funciones y valores monopulso

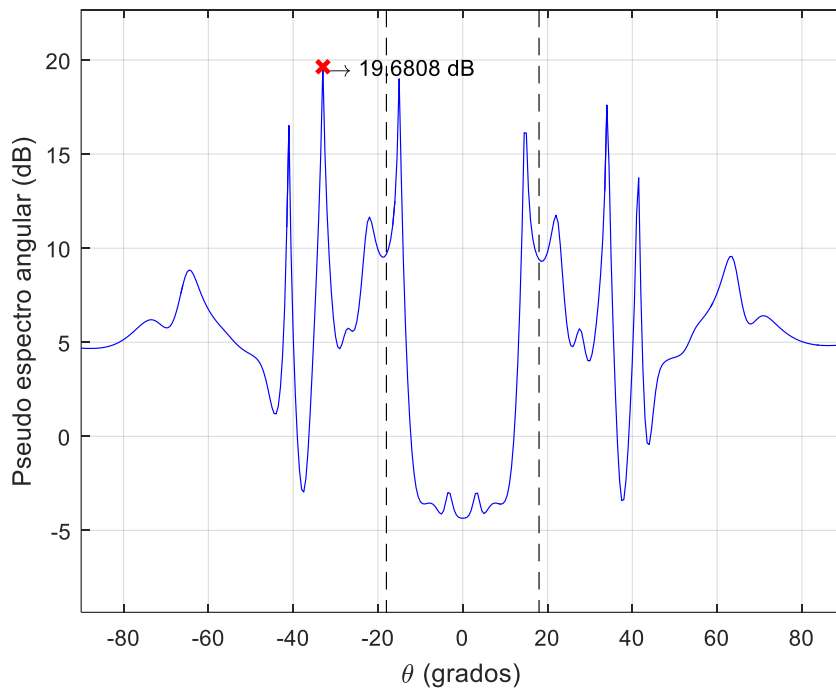


Figura 91 Pseudoespectro y FoV



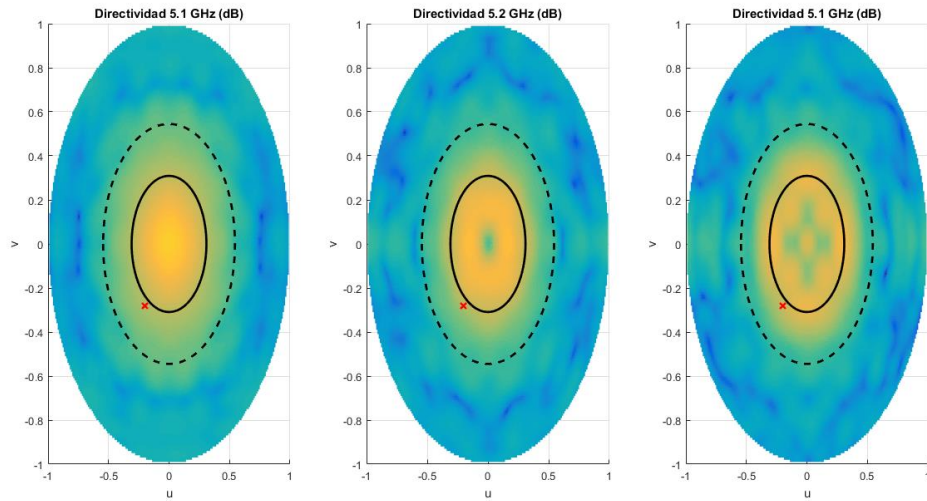


Figura 92 Localización obtenida en coordenadas u-v

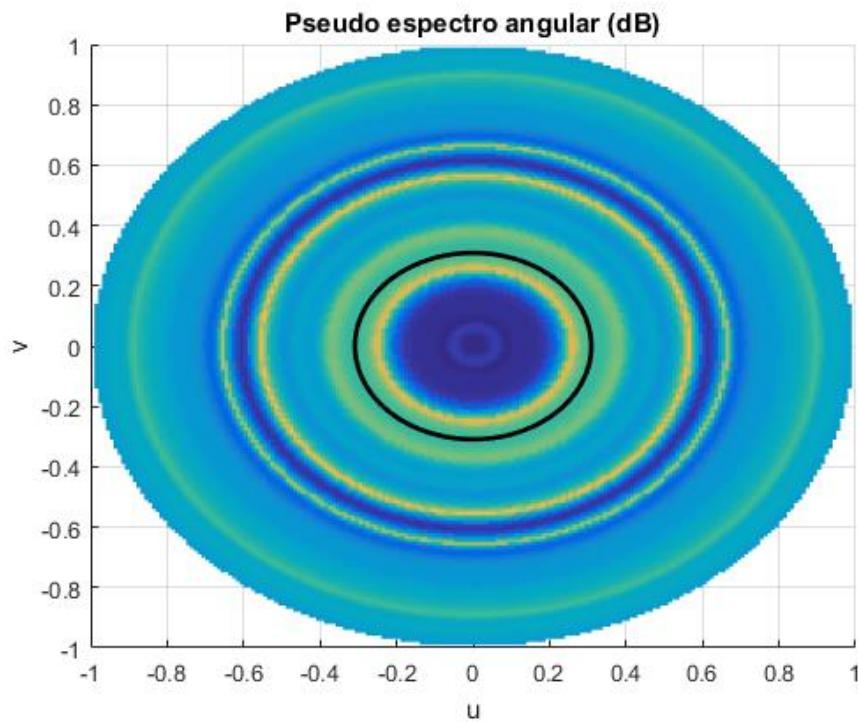


Figura 93 Pseudoespectro en coordenadas u-v

Al estar situado el dron fuera de nuestro FoV, el resultado obtenido no es correcto.



## 6. Conclusión y líneas futuras.

En este proyecto he desarrollado una antena Fabry-Pérot para ser utilizada en el aterrizaje asistido de un dron sobre una plataforma, optimizada para las frecuencias de 5.1 GHz, 5.2 GHz y 5.3 GHz. Se trata de una antena cuadrada de 460x460 milímetros, con parches también cuadrados de 16x16 milímetros repartidos de forma uniforme sobre el substrato FR4, el cual tiene una permitividad relativa 4.48 y una tangente de pérdidas de 0.01, de 3 milímetros de grosor. Tendremos una alimentación polarizada en el eje  $\hat{y}$  sobre la que habrá un parche central de tamaño 20x20 milímetros.

Una vez diseñada la antena, he obtenido los diagramas de radiación y exportado las directividades totales para los canales de interés de 5.1 GHz, 5.2 GHz y 5.3 GHz. Con estos datos, y mediante el correcto procesado monopulso en Matlab, soy capaz de encontrar el ángulo DoA para localizar al dron respecto al centro de la plataforma de aterrizaje. El resultado será correcto siempre y cuando el dron esté situado dentro del campo de acción o FoV. En el caso en el que el dron se encuentre fuera de dicha área, la posición obtenida puede no ser correcta.

Finalmente, he diseñado una interfaz gráfica mediante Matlab. En ella, la representación escogida ha sido la siguiente:

- Línea continua negra para indicar el límite del FoV de la antena.
- Cruz roja en los diagramas u-v para indicar la posición del dron.
- Línea discontinua negra en la gráfica de directividad 2D para indicar el ángulo  $\theta$  en el que está situado el dron.
- Línea discontinua negra en los diagramas u-v para indicar el ángulo  $\theta$  estimado.
- Cruces roja y azul en la respectiva función monopulso para indicar el valor monopulso para el ángulo  $\theta$  en el que está situado el dron.
- Cruz negra en el pseudo espectro 2D para indicar el valor máximo y, por lo tanto, el ángulo  $\theta$  estimado.

Este sistema de representación estará siempre presente durante toda la interfaz gráfica.

Al abrir la interfaz, en primer lugar, hay que cargar los datos de la FPA para así representar tanto los diagramas u-v normalizados, como la directividad en 2D también normalizada y las funciones monopulso. También quedarán indicadas las directividades máximas de cada canal, junto con el ángulo de máxima radiación. La imagen resultante tras cargar los datos sería la siguiente:

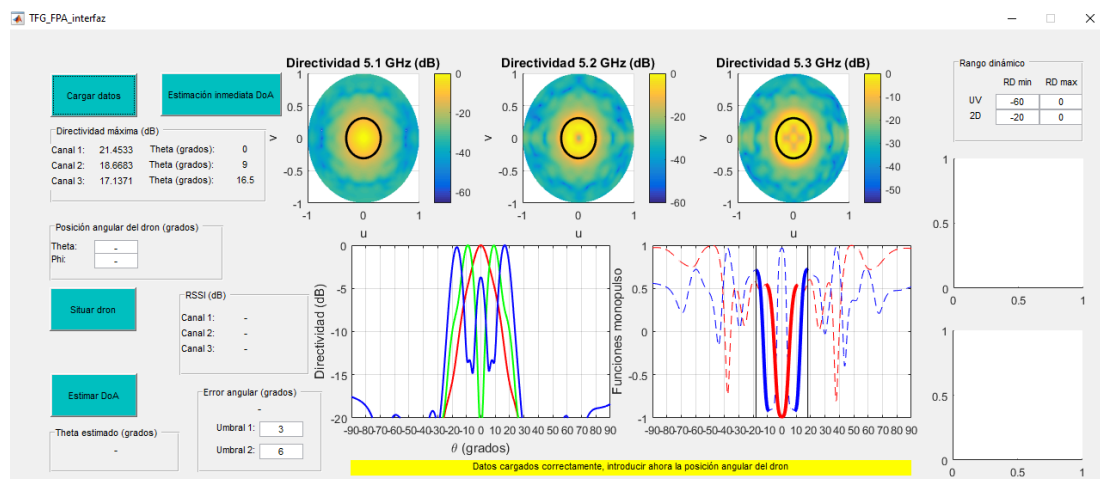


Figura 94 Interfaz gráfica, datos cargados

Una vez que los datos han sido cargados, puedo modificar el rango dinámico de los diagramas u-v y de la directividad 2D para que sean diferentes de sus valores establecidos por defecto. También podría modificar el umbral de error para que, una vez se haga la estimación de la posición del dron, reciba un aviso si el error supera cierto valor. He establecido 2 umbrales: uno de ellos para un primer aviso y otro por si el error ya es demasiado alto. Aparece también el FoV tanto en los diagramas u-v como en la gráfica de las funciones monopulso.

En cuanto al rango dinámico, la aplicación no permite establecer un valor de RDmin mayor que el valor de RDmax y viceversa; al igual que el segundo umbral no puede ser menor que el primero. De intentar establecerlo así, la aplicación no me dejaría hacer el cambio y me avisaría mediante un mensaje de que no es posible.

El siguiente paso sería establecer la posición del dron. Sin ello, no podría ni situar el dron ni estimar el ángulo DoA. Para ello, me sitúo en las celdas establecidas para ello y escribo los valores de  $\theta$  y  $\phi$ . Primero voy a mostrar el primer ejemplo desarrollado en la memoria ( $\theta=10^\circ$  y  $\phi=180^\circ$ ):

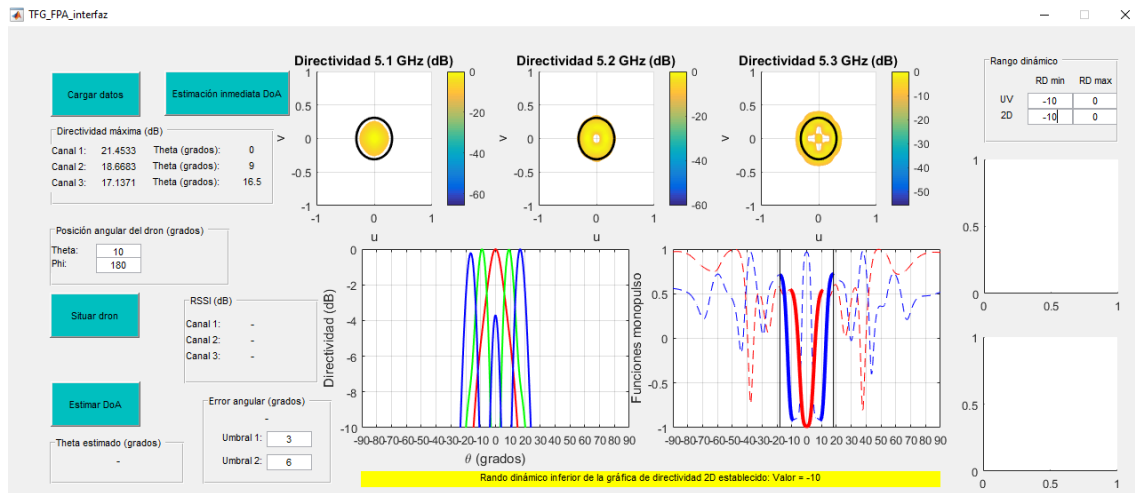


Figura 95 Interfaz gráfica, establecida la posición del dron y RD modificado

Con la posición del dron establecida puedo hacer dos cosas:

- 1- Situar al dron para luego estimar el ángulo DoA y ver el resultado.
- 2- Situar al dron y ver el resultado de la estimación del DoA simultáneamente.

Para realizar más pasos, voy a mostrar lo que sucede primero al situar el dron. El resultado sería el siguiente:

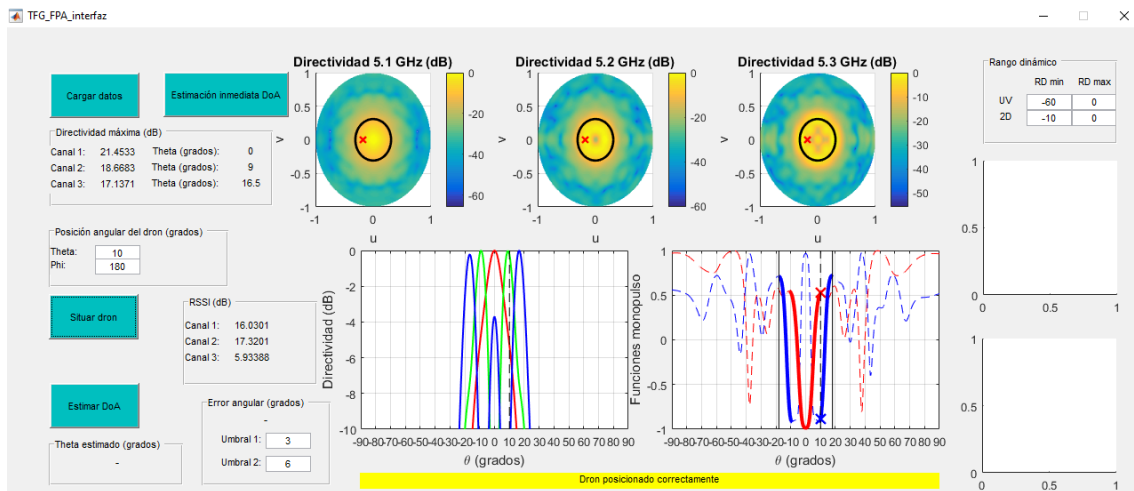


Figura 96 Interfaz gráfica, dron posicionado

Aparece una cruz en la posición del dron en los diagramas u-v. Además, se muestra también el ángulo  $\theta$  del dron escogido en la gráfica de la directividad normalizada con una línea vertical negra. Al estar el dron en esta posición, recibirá un nivel de señal determinado de cada canal; es esa información la que se muestra en el panel RSSI establecido para ello.

Ahora podemos hacer el cálculo y estimar el ángulo DoA para ver el resultado:

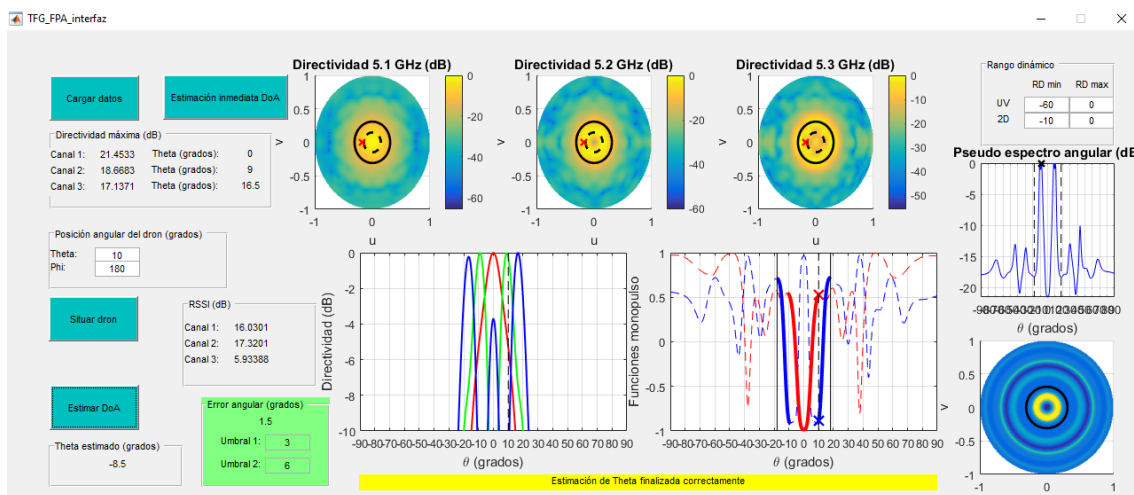


Figura 97 Interfaz gráfica, resultados ejemplo 1

El ángulo estimado es de  $-8.5^\circ$  pero, al interesarnos únicamente el valor absoluto de dicho ángulo, obtenemos un error de únicamente  $1.5^\circ$ . No es un error que supere ningún umbral, por lo que el recuadro se iluminará en color verde. Se muestran también las gráficas del pseudo espectro en 2D y en coordenadas u-v para mostrar gráficamente el por qué se ha estimado el ángulo mostrado en el resultado. Las últimas gráficas mencionadas muestran también el FoV de la antena FPA diseñada.

Si modificamos los umbrales para mostrar otros dos ejemplos en los que, en el primero de ellos se supere únicamente el primer umbral y en el segundo se superen ambos; los resultados serían los siguientes:

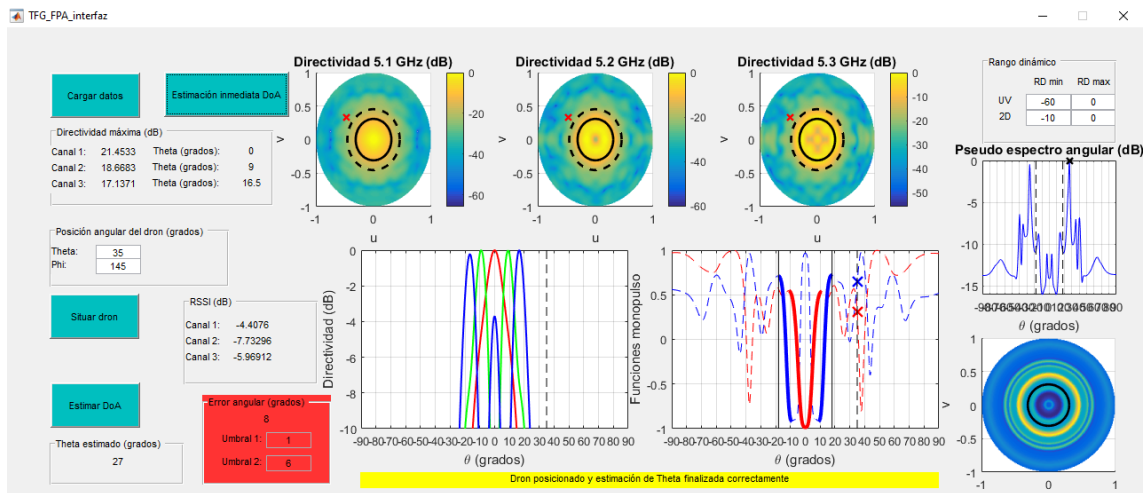


Figura 98 Interfaz gráfica, resultados ejemplo 2

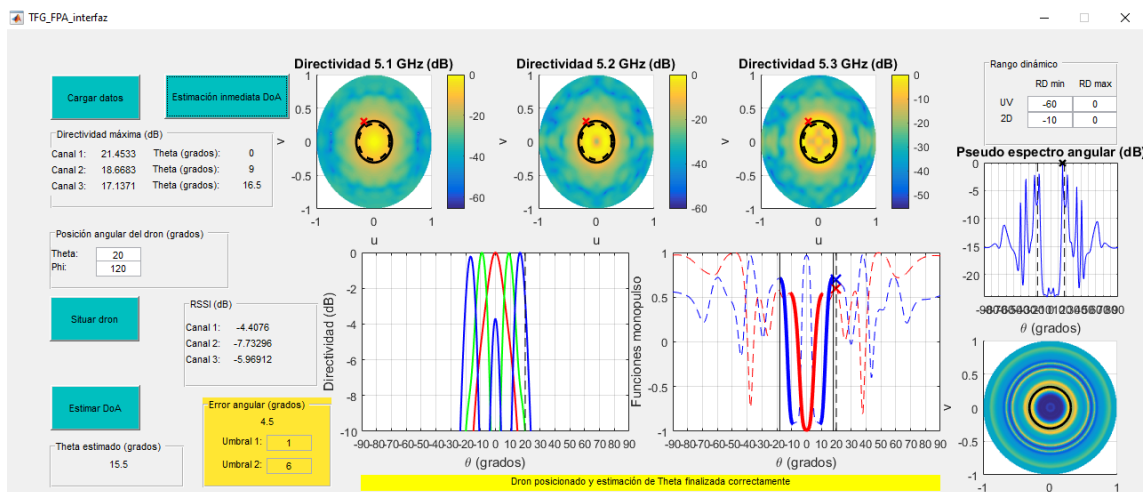


Figura 99 Interfaz gráfica, resultados ejemplo 3

En el ejemplo 2, al obtener un error tan grande en una posición fuera del FoV, el panel se ilumina en rojo; por otro lado, en el ejemplo 3 obtenemos un error que no supera el segundo umbral, aunque el dron está situado fuera del FoV. Es por ello por lo que el panel se ilumina en color naranja como advertencia.

De esta forma, podemos probar diferentes posiciones del dron de una forma rápida y sencilla para observar gráficamente los resultados de diferentes ejemplos. Además, al ejecutar algún cambio en la propia interfaz (ya sea cargar los datos, situar el dron, modificar el rango dinámico...) aparece un mensaje en la parte inferior avisando de lo que se ha realizado. En la presentación se realizarán varias pruebas para comprobar de forma más dinámica el funcionamiento de la interfaz gráfica.

El trabajo realizado propone una línea futura en la que se diseñe la alimentación real de la antena, ya que en este trabajo hemos situado una alimentación situada en el centro de la antena sin cableado alguno. También se propone la fabricación de la antena y su posterior medición de los diagramas de radiación para ver si se corresponden con los obtenidos mediante simulación. Otro aspecto que hay que desarrollar es la proposición de un algoritmo autónomo que utilice el dron para su aterrizaje en la plataforma de forma autónoma. Una vez finalizado todos los pasos

previos mencionados, habría que probar todo el sistema para comprobar el buen funcionamiento final.





## 7. Bibliografía.

- [UDLAP]: Capítulo 3, “Antenas tipo parche o de microstrip”, biblioteca UDLAP ([enlace de acceso, marzo 2020](#)).
- [Si-Ping Gao, 2015]: Artículo “radiación de las antenas de parche”, Si-Ping Gao, Binfang Wang, Huapeng Zhao, Wei-Jiang Zhao y Ching Eng Png, 2015, web *semantic scholar* ([enlace de acceso, marzo 2020](#)).
- [José Manuel Nieto Escribano, 2018]: TFG José Manuel Nieto Escribano, 2018, Universidad Pública de Navarra ([enlace de acceso, marzo 2020](#)).
- [sneikder, 2018]: Artículo “interferometría de Michelson-Morley y Fabry-Pérot”, sneikder, 2018, web *steemit* ([enlace de acceso, marzo 2020](#)).
- [Giampiero Lovat, 2014]: Documento “papel de las leaky waves en las antenas Fabry-Pérot”, Giampiero Lovat, 2014 ([enlace de acceso, marzo 2020](#)).
- [Filippo Costa, 2017]: Artículo “diseño de las antenas Fabry-Pérot”, Filippo Costa, Davide Bianchi, Agostino Monorchio y Giuliano Manara, 2017, web *semantic scholar* ([enlace de acceso, marzo 2020](#)).
- [Daniel Marín, 2014]: Artículo “satélite GPS IIF-8”, Daniel Marín, 2014 ([enlace de acceso, marzo 2020](#)).
- [GPS.GOV]: Artículo “sistema GPS”, web *GPS.GOV* ([enlace de acceso, marzo 2020](#)).
- [Ignacio Álvarez Olmos, 2018]: TFG Ignacio Álvarez Olmos, 2018, Universidad Politécnica de Madrid ([enlace de acceso, marzo 2020](#)).
- [Charly Whisky, 2014]: “Principios del sistema monopulso”, Charly Whisky, 2014 ([enlace de acceso, marzo 2020](#)).
- [academic]: “Coordenadas esféricas”, web *academic* ([enlace de acceso, marzo 2020](#)).
- [Frahaan Hussain]: Tutorial “Basic Texture Mapping”, Frahaan Hussain ([enlace de acceso, marzo 2020](#)).
- [José Luis Gómez Tornero, 2019]: Apuntes de la asignatura “Aplicaciones de las microondas”, 4º curso GIST, José Luis Gómez Tornero, 2019, UPCT.
- [Celia Gómez, 2018]: Apuntes de la asignatura “Microondas”, 4º curso GIST, Celia Gómez, 2018, UPCT.
- Wikipedia.
- [Eloy Andreu García, 2019]: TFG Eloy Andreu García “Diseño de un Sistema Radar Monopulso 2D basado en Antenas de Onda de Fugas para Asistencia en Aterrizaje Autónomo de Drones”, 2019, UPCT.
- [Adrián Enrique Capristán Díaz, 2018]: TFG Adrián Enrique Capristán Díaz “Antenas Fabry-Pérot”, 2018, Universidad Carlos III.
- Manual Ansys Electronics HFSS.
- GUI de MATLAB.



# Anexo

Channel	Center Frequency (MHz)	Frequency Range (MHz)	10 MHz	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 MHz	United States FCC (U-NI Bands)	United States (3-7 GHz)	Canada (5.925-6.025 GHz)	Europe (5.925-6.025 GHz)	Balticland (5.925-6.025 GHz)	Russia (5.925-6.025 GHz)	Japan (5.925-6.025 GHz)	India (5.925-6.025 GHz)	Singapore (5.925-6.025 GHz)	China (5.925-6.025 GHz)	Israel (5.925-6.025 GHz)	Korea (5.925-6.025 GHz)	Turkey (5.925-6.025 GHz)	Australia (5.925-6.025 GHz)	South Africa (5.925-6.025 GHz)	Brazil (5.925-6.025 GHz)	Taiwan (5.925-6.025 GHz)	New Zealand (5.925-6.025 GHz)	Bahrain (5.925-6.025 GHz)
7	5035	5030-5040	10		X	X	X	U-NI	No	No	No	No	No	No	Unknown	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
8	5045	5030-5050	20		X	X	X	N/A	No	No	No	No	No	No	Unknown	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
9	5045	5040-5050	10		X	X	X	N/A	No	No	No	No	No	No	Unknown	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
11	5055	5050-5060	10		X	X	X	N/A	No	No	No	No	No	No	Unknown	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
12	5060	5050-5070	20		X	X	X	N/A	No	No	No	No	No	No	Unknown	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
19	5080	5070-5090	20		X	X	X	N/A	No	No	No	No	No	No	Unknown	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
32	5160	5150-5170	20		X	X	X	U-NI-1	Unknown	No	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or PPH 11	Unknown	Yes	Yes	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Indoors
34	5170	5150-5190	40		X	X	X	U-NI-1	No	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or PPH 11	No	Indoors	Yes	No	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors
36	5180	5170-5190	20		X	X	X	U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or PPH 11	Indoors	Indoors	Yes	Yes	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors
38	5190	5170-5210	40		X	X	X	U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or PPH 11	Indoors	Indoors	Yes	No	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors
40	5200	5190-5210	20		X	X	X	U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or PPH 11	Indoors	Indoors	Yes	Yes	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors
42	5210	5170-5230	80		X	X	X	U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or PPH 11	Indoors	Indoors	Yes	No	No	No	Indoors	Indoors	No	No	Yes	Indoors	Indoors
44	5220	5210-5230	20		X	X	X	U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or PPH 11	Indoors	Indoors	Yes	Yes	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors
46	5230	5210-5250	40		X	X	X	U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or PPH 11	Indoors	Indoors	Yes	No	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors
48	5240	5230-5250	20		X	X	X	U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or PPH 11	Indoors	Indoors	Yes	Yes	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors
50	5250	5170-5330	160		X	X	X	U-NI-1 and U-NI-2A	DFS	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS/TPC	No	No	No	No	Indoors/DFS/TPC or PPH 11	No	No	DFS	Indoors	Indoors/DFS/TPC
52	5260	5250-5270	20		X	X	X	U-NI-2A	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC
54	5270	5250-5290	40		X	X	X	U-NI-2A	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS/TPC	No	Indoors	Yes	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC
56	5280	5270-5290	20		X	X	X	U-NI-2A	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC
58	5290	5280-5330	80		X	X	X	U-NI-2A	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS/TPC	No	No	No	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS	Yes	Indoors/DFS/TPC
60	5300	5290-5310	20		X	X	X	U-NI-2A	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC
62	5310	5290-5330	40		X	X	X	U-NI-2A	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS/TPC	No	Indoors	Yes	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC
64	5320	5310-5330	20		X	X	X	U-NI-2A	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC
68	5340	5330-5350	20		X	X	X	U-NI-2A	Unknown	No	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Unknown	Yes	DFS/TPC	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Indoors/DFS/TPC
69	5480	5470-5490	20		X	X	X	U-NI-2C	Unknown	No	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Unknown	Yes	DFS/TPC	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Indoors/DFS/TPC
132	5510	5490-5530	40		X	X	X	U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC
134	5520	5510-5530	20		X	X	X	U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	
136	5530	5490-5570	80		X	X	X	U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	No	No	DFS	
138	5540	5530-5550	20		X	X	X	U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	Yes	DFS	DFS	
140	5550	5530-5570	40		X	X	X	U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	
142	5560	5550-5570	20		X	X	X	U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	
144	5570	5550-5590	40		X	X	X	U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	
146	5580	5570-5590	20		X	X	X	U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	
148	5590	5570-5610	20		X	X	X	U-NI-2C	DFS	No	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	Yes	DFS/TPC	No	Yes	DFS	DFS	
150	5600	5590-5610	20		X	X	X	U-NI-2C	DFS	No	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	Yes	DFS/TPC	No	Yes	DFS	DFS	
152	5610	5570-5650	80		X	X	X	U-NI-2C	DFS	No	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	Yes	DFS/TPC	No	No	DFS	DFS/TPC	
154	5620	5610-5630	20		X	X	X	U-NI-2C	DFS	No	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	Yes	DFS/TPC	No	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	
156	5630	5610-5650	40		X	X	X	U-NI-2C	DFS	No	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	Yes	DFS/TPC	No	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	
158	5640	5630-5650	20		X	X	X	U-NI-2C	DFS	No	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	Yes	DFS/TPC	No	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	
160	5650	5630-5670	40		X	X	X	U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC
162	5670	5650-5690	40		X	X	X	U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC
164	5680	5670-5690	20		X	X	X	U-NI-2C and U-NI-3	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	No	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	Yes	DFS	DFS
166	5690	5680-5730	80		X	X	X	U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC
168	5710	5690-5730	40		X	X	X	U-NI-2C and U-NI-3	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	No	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or PPH 11	Yes	DFS	DFS
144	5720	5710-5730	20		X	X	X	U-NI-2C and U-NI-3	DFS	DFS/TPC	DFS + SRD (25 mW)	DFS + SRD (25 mW)	Indoors/TPC or PPH 11	DFS/TPC	Indoors	DFS/TPC	No	No	No	No	Yes	DFS/TPC or PPH 11	No	No	No	DFS/TPC
149	5745	5735-5755	20		X	X	X	U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) <sup>(2)</sup>	SRD (25 mW) <sup>(2)</sup>	Indoors/TPC or PPH 11	No	Indoors	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	DFS/TPC
151	5755	5735-5775	40		X	X	X	U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) <sup>(2)</sup>	SRD (25 mW) <sup>(2)</sup>	Indoors/TPC or PPH 11	No	Indoors	Yes	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	DFS/TPC
153	5765	5735-5775	20		X	X	X	U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) <sup>(2)</sup>	SRD (25 mW) <sup>(2)</sup>	Indoors/TPC or PPH 11	No	Indoors	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	DFS/TPC
155	5775	5735-5815	80		X	X	X	U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) <sup>(2)</sup>	SRD (25 mW) <sup>(2)</sup>	Indoors/TPC or PPH 11	No	Indoors	Yes	No	No	No	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	DFS/TPC
157	5785	5735-5795	20		X	X	X	U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) <sup>(2)</sup>	SRD (25 mW) <sup>(2)</sup>	Indoors/TPC or PPH 11	No	Indoors	Yes										