



**Optimización de antena Fabry-Perot
con escaneo cónico rápido para la
estimación del ángulo de llegada en
redes WiFi en la banda de 5 GHz.**

José Daniel Martínez Guillén



Agradecimientos

Me gustaría agradecer en esta memoria el apoyo que he recibido por parte de todo mi círculo cercano: familia, amigos... En esta época tan complicada, en la que estamos viviendo una pandemia global, tienen mucha importancia para mí las personas con las que comparto mi tiempo, ya que eso es lo que ayuda siempre a salir adelante. Sin ellos, nada habría sido posible; así que gracias a todos los que han estado, están y estarán.

También me gustaría agradecer la ayuda de todos los profesores de la UPCT, y en especial a mis directores de este proyecto, incluyendo también a Miguel Poveda (estudiante del doctorado), que ha resuelto siempre mis dudas sin importar el día ni la hora en la que nos encontrábamos. Sin todos ellos, no podría haber aprendido todo lo que sé ahora. No sólo me han enseñado los conocimientos impartidos durante mi etapa universitaria, sino que también me han enseñado a aprender por mi cuenta. El mundo está cambiando con rapidez, así que será importante para mi futuro desarrollar los conocimientos que se requieran conforme evolucione toda la tecnología. Además, hay una enorme implicación de la universidad para proporcionar acceso al mundo laboral, algo que me ha servido para poder trabajar en 3 empresas distintas durante mi etapa universitaria, incluyendo experiencia en el extranjero; y todo esto es de gran ayuda para mi futuro.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	10
1.1. Resumen.....	10
1.2. Objetivo.....	11
1.3. Estructura.....	12
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 θ - ϕ	21
2.5.2. Coordenadas u-v.....	22
2.6. Antena monopolo.....	23
3. Implementación de la alimentación en la antena.....	24
3.1. Optimización de la alimentación.....	32
4. Implementación de una superficie de alta impedancia (HIS).....	42
5. Estimación de la localización (postprocesado).....	46
5.1. Análisis de la función monopulso.....	46
5.1.1. Obtención de las funciones monopulso.....	47
5.1.2. Coordenadas tridimensionales θ - ϕ	50
5.1.3. Transformación a coordenadas u-v.....	51
5.2. Ejemplo de posición del dron y cálculo del DoA.....	53
6. Análisis de resultados.....	60
6.1. Caso 1.....	64
6.2. Caso 2.....	69
6.3. Caso 3.....	73
6.4. Caso 4.....	78
6.5. Resumen de los 4 casos.....	82
7. Análisis final y conclusión.....	84
7.1. Interfaz gráfica.....	84
7.2. Conclusión.....	86
7.3. Líneas futuras.....	88
8. Bibliografía.....	90

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 Antena de parche [20].....	14
Ilustración 2 Radiación en una antena de parche [21]	15
Ilustración 3 Ejemplo de array de antenas de parche [22]	16
Ilustración 4 Funcionamiento de un interferómetro Fabry-Pérot [23].....	17
Ilustración 5 Ejemplo de antena Fabry-Pérot [24]	17
Ilustración 6 Radiación en una antena Fabry-Pérot [25]	18
Ilustración 7 Ejemplo de satélite GPS [26]	19
Ilustración 8 Fundamentos del sistema GPS [27].....	20
Ilustración 9 Ejemplo de sistema radar monopolso [28]	21
Ilustración 10 Principio del sistema monopolso [29]	21
Ilustración 11 Sistema de coordenadas esférico [30]	22
Ilustración 12 Sistema de coordenadas u-v [31].....	22
Ilustración 13 Patrón de radiación de un monopolo [32]	23
Ilustración 14 Antena Fabry-Pérot con alimentación ideal.....	24
Ilustración 15 Alimentación ideal polarizada en el eje \hat{y}	24
Ilustración 16 Directividad del plano XZ de la FPA con alimentación ideal	25
Ilustración 17 Directividad del plano YZ de la FPA con alimentación ideal.....	25
Ilustración 18 Diagrama de radiación 5.1 GHz coordenadas rectangulares de la FPA con alimentación ideal.....	26
Ilustración 19 Diagrama de radiación 5.2 GHz coordenadas rectangulares de la FPA con alimentación ideal.....	26
Ilustración 20 Diagrama de radiación 5.3 GHz coordenadas rectangulares de la FPA con alimentación ideal.....	27
Ilustración 21 Diagrama de radiación 5.1 GHz coordenadas polares de la FPA con alimentación ideal.....	27
Ilustración 22 Diagrama de radiación 5.2 GHz coordenadas polares de la FPA con alimentación ideal.....	28
Ilustración 23 Diagrama de radiación 5.3 GHz coordenadas polares de la FPA con alimentación ideal.....	28
Ilustración 24 Evolución de θ con la frecuencia usando alimentación ideal	29
Ilustración 25 Conector coaxial.....	30
Ilustración 26 Antena Fabry-Pérot con alimentación real	30
Ilustración 27 Alimentación real polarizada en el eje \hat{y}	31
Ilustración 28 Alimentación real, vista lateral.....	31
Ilustración 29 Alimentación real, vista inferior.....	31
Ilustración 30 Alimentación real, vista frontal	32
Ilustración 31 Parámetros de la alimentación	32
Ilustración 32 Parámetros de la alimentación que se van a optimizar	32
Ilustración 33 Parámetro S11 con $H_{Aux} = -2\text{mm}$, $L_{Aux} = 8\text{mm}$	33
Ilustración 34 Directividad plano YZ con $H_{Aux} = -2\text{mm}$, $L_{Aux} = 8\text{mm}$	33
Ilustración 35 Directividad plano XZ con $H_{Aux} = -2\text{mm}$, $L_{Aux} = 8\text{mm}$	33
Ilustración 36 Parámetro S11 con $H_{Aux} = 0\text{mm}$, $L_{Aux} = 10\text{mm}$	34
Ilustración 37 Directividad plano YZ con $H_{Aux} = 0\text{mm}$, $L_{Aux} = 10\text{mm}$	34
Ilustración 38 Directividad plano XZ con $H_{Aux} = 0\text{mm}$, $L_{Aux} = 10\text{mm}$	34
Ilustración 39 Parámetro S11 con $H_{Aux} = -3\text{mm}$, $L_{Aux} = 4\text{mm}$	35
Ilustración 40 Directividad plano YZ con $H_{Aux} = -3\text{mm}$, $L_{Aux} = 4\text{mm}$	35

Ilustración 41 Directividad plano XZ con $H_{Aux} = -3\text{mm}$, $L_{Aux} = 4\text{mm}$	35
Ilustración 42 Parámetro S11 de la FPA con alimentación ideal.....	36
Ilustración 43 Parámetro S11 de la FPA con alimentación ideal en las frecuencias de trabajo .	37
Ilustración 44 Directividad del plano XZ de la FPA con alimentación real	37
Ilustración 45 Directividad del plano YZ de la FPA con alimentación real	38
Ilustración 46 Relación del FoV con la altura del dron respecto a la antena	38
Ilustración 47 Diagrama de radiación 5.1 GHz coordenadas rectangulares de la FPA con alimentación real.....	39
Ilustración 48 Diagrama de radiación 5.2 GHz coordenadas rectangulares de la FPA con alimentación real.....	39
Ilustración 49 Diagrama de radiación 5.3 GHz coordenadas rectangulares de la FPA con alimentación real.....	40
Ilustración 50 Diagrama de radiación 5.1 GHz coordenadas polares de la FPA con alimentación real	40
Ilustración 51 Diagrama de radiación 5.2 GHz coordenadas polares de la FPA con alimentación real	41
Ilustración 52 Diagrama de radiación 5.3 GHz coordenadas polares de la FPA con alimentación real	41
Ilustración 53 Parámetros de la alimentación optimizados.....	41
Ilustración 54 Antena Fabry-Pérot con HIS	42
Ilustración 55 Directividad 5.1GHz FPA con HIS, caso 1.....	43
Ilustración 56 Campo eléctrico FPA con HIS, caso 1	43
Ilustración 57 Directividad 5.1GHz FPA con HIS, caso 2.....	43
Ilustración 58 Campo eléctrico FPA con HIS, caso 2	44
Ilustración 59 Directividad 5.1GHz FPA con HIS, caso 3.....	44
Ilustración 60 Campo eléctrico FPA con HIS, caso 3	45
Ilustración 61 Directividad plano XZ para el postprocesado.....	47
Ilustración 62 Directividad normalizada plano XZ.....	48
Ilustración 63 Funciones monopulso	48
Ilustración 64 FoV (zona lineal) en las funciones monopulso	49
Ilustración 65 Pseudoespectro angular.....	50
Ilustración 66 Directividades en coordenadas θ - ϕ	50
Ilustración 67 Directividad 5.1GHz en coordenadas u-v	51
Ilustración 68 Directividad 5.2GHz en coordenadas u-v	52
Ilustración 69 Directividad 5.3GHz en coordenadas u-v	52
Ilustración 70 Comparación de los valores monopulso obtenidos en $\theta=10^\circ$ $\phi=90^\circ$ con las funciones monopulso.....	53
Ilustración 71 Pseudoespectro angular en $\theta=10^\circ$ $\phi=90^\circ$	54
Ilustración 72 Pseudoespectro angular en $\theta=10^\circ$ $\phi=90^\circ$ parte positiva	55
Ilustración 73 Posición del dron obtenida en coordenadas u-v, 5.1GHz	55
Ilustración 74 Posición del dron obtenida en coordenadas u-v, 5.2GHz	56
Ilustración 75 Posición del dron obtenida en coordenadas u-v, 5.3GHz	56
Ilustración 76 Pseudoespectro obtenido en coordenadas θ - ϕ cuando $\theta=10^\circ$ $\phi=90^\circ$	57
Ilustración 77 Pseudoespectro obtenido en coordenadas u-v cuando $\theta=10^\circ$ $\phi=90^\circ$	58
Ilustración 78 Comparativa de directividad plano XZ antes y después de implementar la alimentación.....	60
Ilustración 79 Directividad en función del canal y del tipo de alimentación, plano XZ	60

Ilustración 80 Comparativa de directividad plano YZ antes y después de implementar la alimentación.....	61
Ilustración 81 Directividad en función del canal y del tipo de alimentación, plano YZ	61
Ilustración 82 Comparativa de directividad normalizada plano XZ antes y después de implementar la alimentación	62
Ilustración 83 Comparativa de directividad normalizada plano YZ antes y después de implementar la alimentación	62
Ilustración 84 Directividad plano XZ con alimentación ideal	63
Ilustración 85 Directividad plano XZ con alimentación real.....	63
Ilustración 86 Evolución del ángulo de máxima radiación con la frecuencia, alimentación ideal	64
Ilustración 87 Evolución del ángulo de máxima radiación con la frecuencia, alimentación real	64
Ilustración 88 Funciones y valores monopulso caso 1, alimentación real	65
Ilustración 89 Pseudoespectro angular 2D caso 1, alimentación real	65
Ilustración 90 Diagramas u-v caso 1, alimentación real.....	66
Ilustración 91 Pseudoespectro angular 3D caso 1, alimentación real	66
Ilustración 92 Funciones y valores monopulso caso 1, alimentación ideal	67
Ilustración 93 Pseudoespectro angular 2D caso 1, alimentación ideal.....	67
Ilustración 94 Diagramas u-v caso 1, alimentación ideal.....	68
Ilustración 95 Pseudoespectro angular 3D caso 1, alimentación ideal.....	68
Ilustración 96 Funciones y valores monopulso caso 2, alimentación real.....	69
Ilustración 97 Pseudoespectro angular 2D caso 2, alimentación real	70
Ilustración 98 Diagramas u-v caso 2, alimentación real.....	70
Ilustración 99 Pseudoespectro angular 3D caso 2, alimentación real	71
Ilustración 100 Funciones y valores monopulso caso 2, alimentación ideal	71
Ilustración 101 Pseudoespectro angular 2D caso 2, alimentación ideal.....	72
Ilustración 102 Diagramas u-v caso 2, alimentación ideal	72
Ilustración 103 Pseudoespectro angular 3D caso 2, alimentación ideal.....	73
Ilustración 104 Funciones y valores monopulso caso 3, alimentación real.....	74
Ilustración 105 Pseudoespectro angular 2D caso 3, alimentación real	74
Ilustración 106 Diagramas u-v caso 3, alimentación real.....	75
Ilustración 107 Pseudoespectro angular 3D caso 3, alimentación real	75
Ilustración 108 Funciones y valores monopulso caso 3, alimentación ideal	76
Ilustración 109 Pseudoespectro angular 2D caso 3, alimentación ideal.....	76
Ilustración 110 Diagramas u-v caso 3, alimentación ideal	77
Ilustración 111 Pseudoespectro angular 3D caso 3, alimentación ideal.....	77
Ilustración 112 Funciones y valores monopulso caso 4, alimentación real.....	78
Ilustración 113 Pseudoespectro angular 2D caso 4, alimentación real	78
Ilustración 114 Diagramas u-v caso 4, alimentación real.....	79
Ilustración 115 Pseudoespectro angular 3D caso 4, alimentación real	79
Ilustración 116 Funciones y valores monopulso caso 4, alimentación ideal	80
Ilustración 117 Pseudoespectro angular 2D caso 4, alimentación ideal.....	80
Ilustración 118 Diagramas u-v caso 4, alimentación ideal	81
Ilustración 119 Pseudoespectro angular 3D caso 4, alimentación ideal.....	81
Ilustración 120 Comparativa de errores de predicción en función de la alimentación	82
Ilustración 121 Interfaz gráfica.....	84
Ilustración 122 Interfaz gráfica, datos cargados	85
Ilustración 123 Interfaz gráfica, rango dinámico modificado	85

Ilustración 124 Interfaz gráfica, dron posicionado	85
Ilustración 125 Interfaz gráfica, estimación hecha	86
Ilustración 126 Tabla comparativa de la antena con alimentación ideal y real.....	86
Ilustración 127 Directividad plano XZ alimentación ideal y real	87
Ilustración 128 Directividad plano YZ alimentación ideal y real	87

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 Máster pretende desarrollar un sistema de localización y aterrizaje autónomo de drones diseñando una antena Fabry-Pérot (FPA), así como su alimentación [1]. 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) [2] [3] [4].

En cuanto a la alimentación, estará formada por un conector SMA que tendrá soldado un monopolo orientado en el eje Y, a través del cual se radiará toda la potencia. Al final de la memoria aparecerá el datasheet de dicho conector [Anexo].

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 [5] [6]. Para ello se propone operar en la banda WiFi de 5 GHz para configurar un sistema monopolso, la cual cuenta con diferentes canales según el rango de frecuencia en el que nos encontremos [Anexo] [7] [8].

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 [9] [10]. Para usar las técnicas de [9] la FPA hay que modularla generando haces conformados (*broad-beam patterns*) tal y como se muestra en [10]. Para ello, habría que modular sus circuitos impresos (modulando

convenientemente los tamaños de los parches de la PRS y de la HIS) usando técnicas de control local del modo leaky-wave que permita controlar de manera flexible su ángulo de apuntamiento y su tasa de radiación [11] [12] [13] [14]. En el presente trabajo no se ha diseñado una antena FPA modulada para generar haces conformados, pero se propone para líneas futuras.

Con la antena desarrollada en este proyecto no se obtendrá la posición exacta del dron, pero sí que se sabrá a qué distancia estará respecto a la plataforma de aterrizaje. A partir de dicha distancia, se podrá saber si al moverse el dron estará situado más o menos cerca del centro respecto a la posición anterior. Iterando, será capaz de llevar al dron al centro de la plataforma. Con el uso de unas sencillas operaciones aritméticas de procesamiento digital monopulso se obtendrá una función de error de localización, a partir de la cual se estimará la distancia mencionada anteriormente [7] [15] [16].

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". Se partirá de una FPA con unas medidas determinadas, comprobado su funcionamiento previamente, y se colocará la alimentación que se usaría al fabricarla. Una vez hecho esto, se modificarán ciertas dimensiones de la antena y de la alimentación para que los resultados sean los esperados. Después, con los diagramas obtenidos, se programará en Matlab una técnica para estimar el ángulo de llegada de la señal WiFi, usando técnicas de procesamiento monopulso basado en la potencia recibida en cada canal. Finalmente, se desarrollará una interfaz para tener una mejor forma con la que mostrar los resultados y poder ver lo que se obtendría según dónde está situado el dron.

Este proyecto es una continuación de los Trabajos de Fin de Grado de Luis Miguel Martínez Tamargo, Eloy Andreu García y el que yo mismo realicé [17] [18] [19]. 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. En mi Trabajo de Fin de Grado se diseñó una antena Fabry-Pérot con las dimensiones adecuadas para ayudar también en el aterrizaje asistido del dron, y el presente proyecto tiene como objetivo la implementación de la alimentación para poder fabricar dicha antena y poder probarla en un futuro.

1.2. Objetivo.

Este Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo diseñar una alimentación para una antena Fabry-Pérot 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 en periodicidades de 20 milímetros, quedando una antena también cuadrada de 460 milímetros de lado. Además, el plano de masa estará 28 milímetros por debajo del sustrato. En cuanto a la alimentación, estará formada por un conector SMA en la parte central inferior de la antena y ascenderá contacto de cobre aislado por teflón hasta una altura de 19.5 milímetros. En esa altura colocaremos un monopolo orientado sobre el eje Y de la antena de 18.25 milímetros de largo (aproximadamente $\lambda/4$).

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. Además, también aprovechamos en esta banda el menor tamaño de antena y la mayor separación entre canales.

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

- Manejar el software HFSS.
- Comprobar el buen funcionamiento de la antena Fabry-Pérot sintonizada en la banda de 5 GHz de WiFi sin implementar la alimentación real.
- Diseñar, desarrollar y optimizar la alimentación para la antena.
- Analizar los resultados obtenidos, tanto parámetros S como diagramas de radiación, y compararlos con los obtenidos con la antena con alimentación ideal.
- Programación en Matlab de procesamiento de un pulso usando la potencia recibida en cada canal para estimar la distancia angular al centro de la antena (ángulo cónico).
- Obtención de resultados que muestren el 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 Máster.

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

En el tercer punto se explicará la implementación de la alimentación junto con los diferentes análisis que se han ido desarrollando hasta obtener el diseño y las medidas óptimas, mostrando los resultados y los diagramas que se van obteniendo. Además, se mostrará una comparativa de los resultados que teníamos antes de implementar la alimentación y después de haberlo hecho, es decir, los resultados de los que partíamos y los que finalmente hemos conseguido, viendo cómo han cambiado los diagramas al pasar de una alimentación ideal a una real.

En el cuarto punto se incluye una inclusión de una superficie de alta impedancia en la FPA para ampliar el FoV. Aunque los resultados no han sido los esperados en este punto, es interesante realizar un estudio más a fondo sobre ello para optimizar los resultados e incluirlos en un futuro proyecto.

El quinto punto tendrá en cuenta el análisis del sistema monopulso y todo su procesamiento, mostrando cómo es posible determinar la distancia de nuestro dron al centro de la plataforma de aterrizaje utilizando diagramas u-v. Incluirá también un ejemplo de demostración y una explicación detallada de cada gráfico.

En el sexto punto se verá una comparativa de los diagramas de radiación que teníamos antes de implementar la alimentación y después, fijándonos en las variaciones de directividad. Además, también mostrará un análisis de los resultados con diferentes ejemplos en función de distintas posiciones del dron y cómo se estima la localización. Analizaremos varios casos y veremos cómo ha afectado en los resultados la implementación de la alimentación, comparando estos resultados con los que tendríamos con una alimentación ideal.

Finalmente, en el último punto se mostrará la implementación de la interfaz y una conclusión, determinando si realmente la antena Fabry-Pérot con la alimentación real implementada es útil para la finalidad que abarca este proyecto. También se mostrarán unas posibles líneas futuras para continuar el proyecto, por ejemplo, con otro trabajo de fin de estudios próximo.

2. Conceptos teóricos.

2.1. Antenas de parche.

Las antenas de parche son una estructura que es fácil de implementar y económica, por eso se utilizan para construir arrays. Esta tecnología está asociada a la línea microstrip, y su origen proviene de esta tecnología. La diferencia entre las dos tecnologías es que el propósito de la línea microstrip es evitar la radiación, mientras que la antena de parche busca el efecto contrario.

En su configuración más simple, la antena de parche consiste en un dieléctrico y el parche de metal se coloca sobre el dieléctrico. El plano de tierra estará en el otro lado del dieléctrico. Podemos ver esta configuración en la siguiente ilustración:

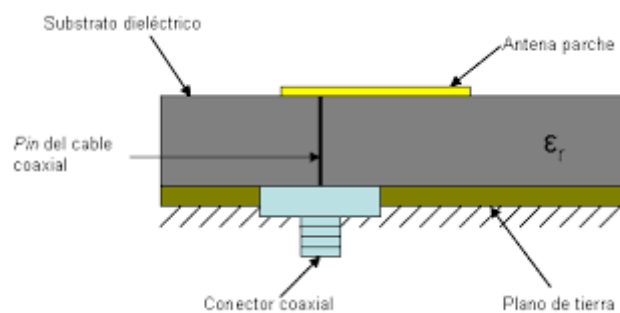


Ilustración 1 Antena de parche [20]

El parche puede tener cualquier forma, aunque en este caso se van a usar parches cuadrados de 16 milímetros de lado por simplicidad. Vamos a trabajar con sustrato FR4 de 3 milímetros de grosor, el cual tiene una permitividad relativa de 4.48 y una tangente de pérdidas de 0.01. Además, el sustrato estará situado a 28 milímetros del plano de tierra. 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.

La cavidad resonante ideal no tiene pérdidas y puede almacenar energía eléctrica y magnética por igual; sin embargo, si ingresamos a un caso real, cualquier cavidad resonante generará ciertas pérdidas de componentes pasivos.

En una situación ideal no hay pérdidas, y la cavidad resonante se realiza con condiciones de contorno que solo permiten el volumen correspondiente a la solución de onda estacionaria de la ecuación de Maxwell. Estas condiciones se dan para ciertas frecuencias llamadas frecuencias resonantes. En situaciones reales obtendremos un rango de frecuencia más amplio como solución a las ecuaciones de Maxwell.

La cavidad resonante generalmente se forma en condiciones de pared electromagnética:

- Una pared eléctrica es una superficie con un campo eléctrico tangencial cero y tiene las características de un conductor ideal, que generalmente está relacionado con la condición de cortocircuito en la teoría de circuitos.

- Por otro lado, una pared magnética es una superficie con un campo magnético tangencial cero, que generalmente está relacionado con una condición de circuito abierto en la teoría de circuitos.

Cuando una onda electromagnética golpea una pared eléctrica o una pared magnética, se reflejará totalmente y formará una onda estacionaria.

Teniendo en cuenta que la antena de parche se puede analizar desde la línea de microstrip, podemos analizarla desde la perspectiva de la línea de transmisión. En esta estructura las condiciones de contorno impuestas solo pueden satisfacer una solución de onda electromagnética específica, que se divide en modos. Estas soluciones dependerán de la longitud de nuestra línea de transmisión. Hay tres modos:

- Modo TEM (electromagnético transversal): los campos eléctricos y magnéticos transversales son cero en condiciones de contorno.
- Modo TE (eléctrico transversal): la solución se deriva del campo magnético con la condición de que el campo eléctrico transversal sea cero en las condiciones de contorno.
- Modo TM (campo magnético transversal): la solución se deriva del campo eléctrico cuando el campo magnético transversal es cero en las condiciones de contorno.

La antena de parche es como una cavidad resonante, compuesta por dos paredes eléctricas (plano de tierra y parche) y cuatro paredes magnéticas.

La frecuencia de resonancia se obtiene de la ecuación impuesta por las condiciones de contorno y la ecuación de onda derivada de la ecuación de Maxwell.

En cuanto a la radiación de este tipo de antenas, está directamente relacionada con la pérdida de la cavidad. La energía perdida es energía irradiada. La onda se propaga a lo largo de la antena y hay una pérdida en el camino; y esta potencia perdida es la potencia que se irradia hacia afuera.

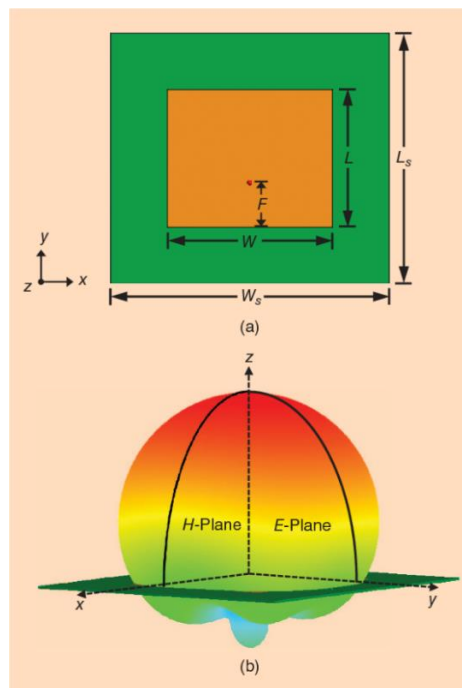


Ilustración 2 Radiación en una antena de parche [21]

Las principales ventajas de las antenas de parche son el bajo costo, el peso ligero, la fabricación simple y la estructura plana. Sin embargo, también tienen algunas desventajas. Estas desventajas son que excitan ondas superficiales que deben eliminarse, tienen modos de orden alto, bandas estrechas y baja eficiencia y pureza de polarización.

2.2. Arrays.

Un array se compone de varios grupos de antenas iguales, y las contribuciones de potencia individuales de estas antenas se agregan para producir un nuevo patrón de radiación. Generalmente, el nuevo patrón de radiación del array será más direccional que el de una sola antena.

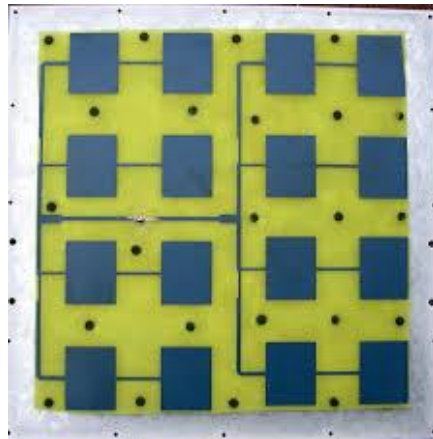


Ilustración 3 Ejemplo de array de antenas de parche [22]

Según la ubicación de los diferentes elementos del array, podemos distinguir tres tipos:

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

La antena es una fuente de radiación electromagnética y su onda sigue una propagación esférica, que se puede simplificar con la siguiente ecuación:

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

En esta ecuación k es la constante de propagación de la onda mientras que \hat{r} es la coordenada correspondiente al radio en coordenadas esféricas.

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

Con la siguiente ecuación podemos definir un factor de array FA:

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

A partir de este factor de array podemos definir el diagrama de radiación de la siguiente forma:

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

El factor de array aparece en factor absoluto porque nos interesa un análisis a nivel de potencias (diagrama de radiación) en lugar de a nivel de campos.

2.3. Antena Fabry-Pérot.

El nombre de esta antena proviene de la similitud entre la disposición de los elementos y la disposición del interferómetro Fabry-Pérot utilizado en óptica. El trabajo del interferómetro se basa en dos espejos colocados en paralelo a una determinada distancia, lo que permite el almacenamiento, la reflexión y la transmisión de la luz.

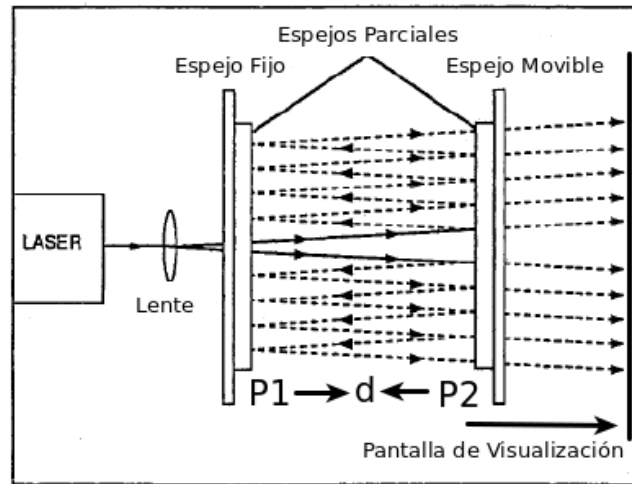


Ilustración 4 Funcionamiento de un interferómetro Fabry-Pérot [23]

La antena Fabry-Pérot consta de un sustrato dieléctrico delimitado por un plano de tierra y una superficie parcialmente reflectante. La excitación se genera internamente e incorpora una antena como fuente. Por ejemplo, esta excitación puede ser un dipolo eléctrico. En nuestro ejemplo, tendremos un monopolo polarizado en el eje \hat{y} .

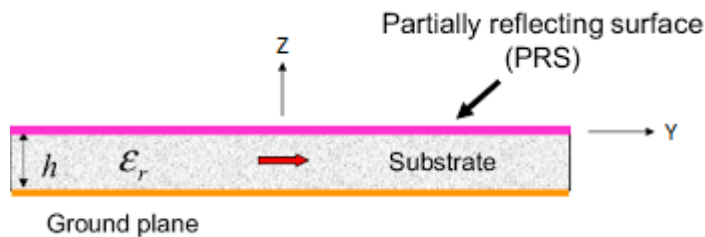


Ilustración 5 Ejemplo de antena Fabry-Pérot [24]

La antena Fabry-Pérot produce un patrón muy direccional, sumado a su sencilla fabricación y bajo costo, lo que la convierte en una antena muy interesante adecuada para muchas aplicaciones.

El principio de funcionamiento de esta antena se puede explicar mediante la teoría de rayos y la teoría de ondas:

- Modelo de rayos: Se considera que la fuente de luz interna es un emisor de luz que se propaga en todas direcciones. Cada rayo de luz se difracta y refleja en la interfaz de separación entre el sustrato y la superficie parcialmente reflectante, de modo que el ángulo de la luz transmitida en el aire con respecto al eje \hat{z} es pequeño y la directividad es mayor. Dado que la fuente de excitación de la cavidad no es un emisor de luz, también

es necesario utilizar un modelo alternativo. Este modelo es el modelo de ondas de fuga o Leaky-waves.

- Modelo de Leaky-waves: Para explicar la radiación generada en la antena, debemos recurrir a las conocidas ondas con fugas o Leaky-waves. Este tipo de ondas son ondas electromagnéticas guiadas, que liberan energía a medida que se propagan. Cuando la estructura tiene algunas rutas de escape se produce una fuga de energía. Esta fuga, que se expresa en forma de pérdidas es la potencia irradiada. En este caso el número de onda en la dirección de propagación consta de dos partes:

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

Donde β es la constante de propagación y α es la magnitud relacionada a las pérdidas (en nuestro caso estas pérdidas son la radiación). Este modelo de ondas de fuga explica perfectamente el principio de funcionamiento de la antena Fabry-Pérot; sin embargo, se utiliza también el modelo de rayos por su simplicidad y para explicar el diseño estructural.

La principal razón para utilizar esta antena es obtener un patrón de radiación direccional.

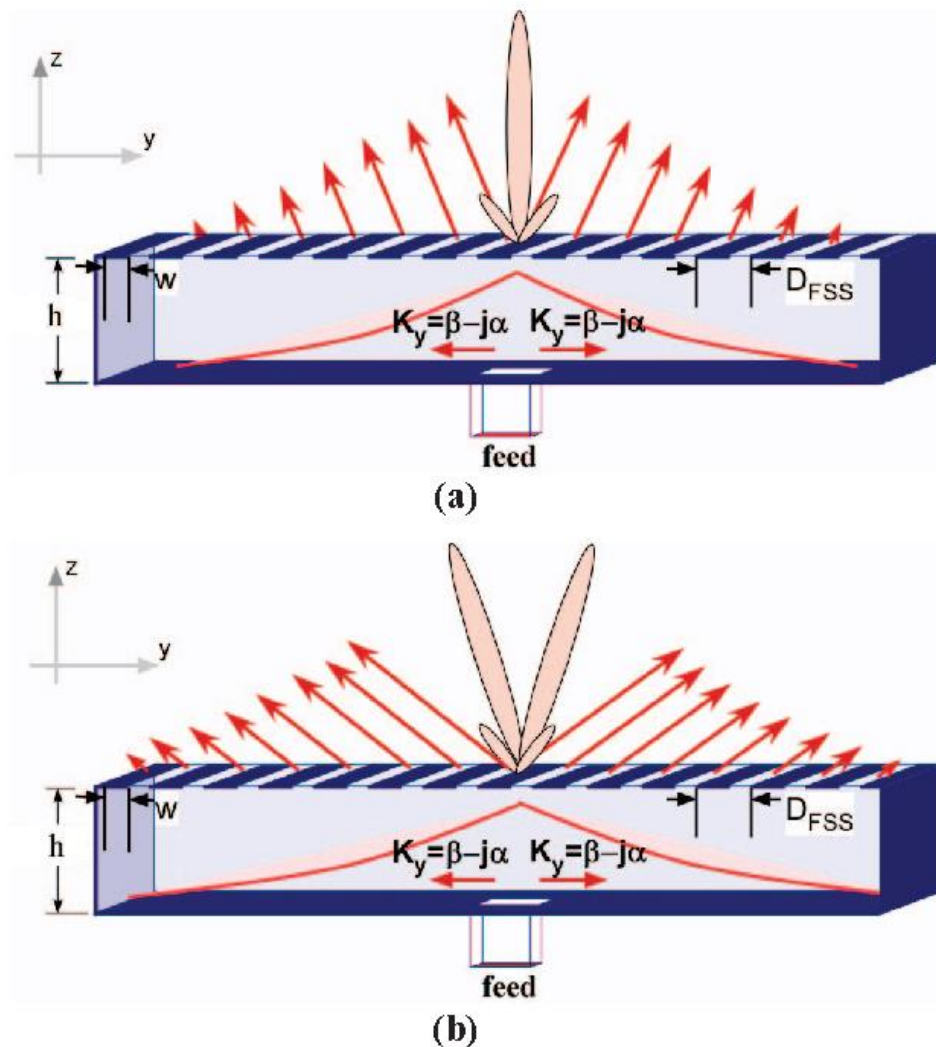


Ilustración 6 Radiación en una antena Fabry-Pérot [25]

2.4. Sistema de localización.

Este proyecto utilizará dos sistemas de posicionamiento:

- Primero usaremos GPS para permitir que el dron se posicione dentro del área determinada por las coordenadas terrestres de la posición de la antena. La zona tendrá un gran radio para intentar evitar posibles errores de posicionamiento en la posición GPS.
- Luego utilizaremos un sistema de radar monopulso para ejecutar el aterrizaje autónomo del dron y calcular su distancia desde el centro de la plataforma de aterrizaje al propio dron.

Nuestro sistema de posicionamiento detecta el ángulo θ de las coordenadas θ - ϕ en función del nivel de potencia recibido de cada frecuencia, obteniendo así el perímetro de la posición del dron en relación con la posible posición del centro de la plataforma. Con esta información y tras varias iteraciones del dron variando su posición, sabremos si nos estamos alejando o acercando al centro de la plataforma para así poder llegar con precisión a la posición deseada.

2.4.1. GPS.

GPS son las siglas de Sistema de Posición Global en inglés, es decir, de Global Position System. El sistema permite conocer la posición tridimensional (longitud, latitud y altitud) de cualquier objeto o persona con cierta precisión (puede tener un error de varios metros). Suele utilizar satélites MEO (satélites de órbita media) y una red de al menos 24 satélites, con órbitas distribuidas para que el receptor pueda ver al menos 4 satélites. Esto se debe a que para determinar la ubicación se utilizan 4 o más satélites y trilateración, por lo que si no hacemos contacto visual con estos 4 satélites no podremos saber dónde estamos. Cuantos más satélites se utilicen, mayor será la precisión de posicionamiento; pero en cualquier momento, en cualquier punto de la tierra, son necesarios al menos 4 satélites visibles.



Ilustración 7 Ejemplo de satélite GPS [26]

El funcionamiento del sistema es que el receptor localiza automáticamente al menos 4 satélites necesarios y recibe señales de ellos, que indican la identidad y la hora de cada satélite y la información de la constelación. Con esta información se calcula el tiempo necesario para que la señal llegue al receptor, y mediante trilateración, el propio receptor calcula su posición.

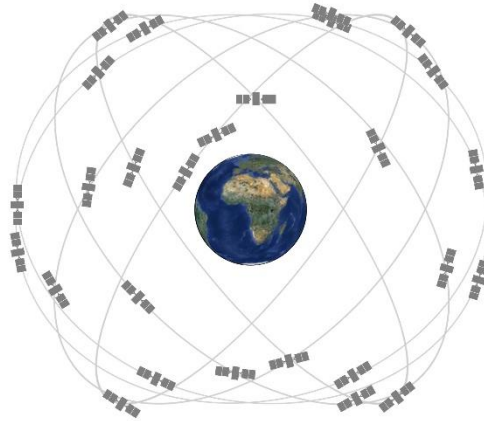


Ilustración 8 Fundamentos del sistema GPS [27]

El GPS nos brinda excelentes resultados permitiéndonos saber dónde estamos; sin embargo, un error de pocos metros puede inutilizar el sistema GPS en nuestra aplicación. Un error de 1 metro significa que el dron no aterrizará en la plataforma de interés y aterrizará en una ubicación diferente.

Se han mejorado los sistemas GPS dando lugar a sistemas como el GPS diferencial (que aporta mayor precisión y reduce los errores a centímetros), pero la solución propuesta en este Trabajo de Fin de Grado es más económica; ya que el sistema DGPS (siglas GPS diferencial) es muy caro.

2.4.2. Sistema radar monopulso.

Los sistemas de radar monopulso se utilizan en una variedad de aplicaciones, desde el control del tráfico aéreo civil hasta ciertas aplicaciones militares. Su principal objetivo es medir y monitorear el ángulo de llegada (AoA) o la dirección de llegada (DoA). Comparando las señales recibidas en dos o más haces simultáneos se obtiene la posición angular.

El término *monopulso* proviene de la capacidad del sistema para obtener una posición angular utilizando un único pulso. En la práctica se utilizan múltiples pulsos para mejorar la precisión de nuestra medición en curso: dirección de llegada o DoA.

La principal ventaja de estos sistemas es que si ocurren fluctuaciones de potencia su funcionamiento no cambiará mucho, porque la información de DoA se obtiene comparando las señales recibidas por múltiples haces en un instante. Si la amplitud de la señal cambia, sus cambios en todos los canales del receptor son los mismos, por lo que esta fluctuación no se verá afectada cuando se comparen las señales.

El sistema monopulso puede basarse en la comparación de amplitud, comparación de fase o una combinación de las dos comparaciones. Sin embargo, en este proyecto utilizaremos un sistema de comparación de amplitud.

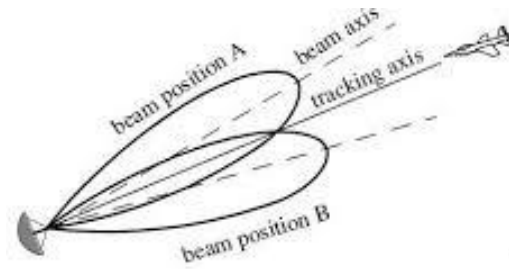


Ilustración 9 Ejemplo de sistema radar monopulso [28]

El sistema monopulso de comparación de amplitud debe tener dos antenas con patrones superpuestos y las direcciones del haz principal están intercaladas en un cierto ángulo. Así se obtienen dos patrones resultantes sumando y restando la señal de cada antena.

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

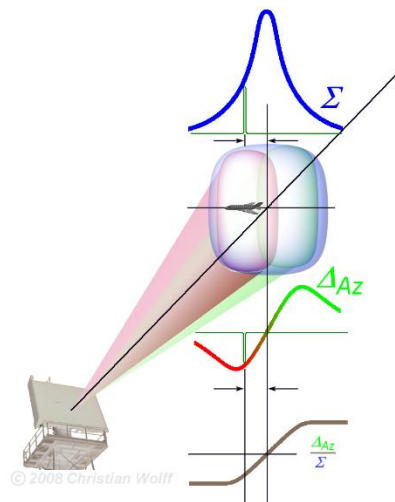


Ilustración 10 Principio del sistema monopulso [29]

2.5. Sistemas de coordenadas empleados.

2.5.1. Coordenadas θ - ϕ .

Este sistema de coordenadas se trata del sistema de coordenadas esférico, el cual tiene las siguientes medidas:

- Radio r
- Ángulo polar θ
- Ángulo azimutal ϕ

Se trata de dos ángulos y una distancia que sirven para determinar la posición de un punto.

En este trabajo se va a usar el ángulo azimutal y el ángulo polar; siendo este último el que obtendrá el dron y usará para poder llegar al centro de la plataforma de aterrizaje.

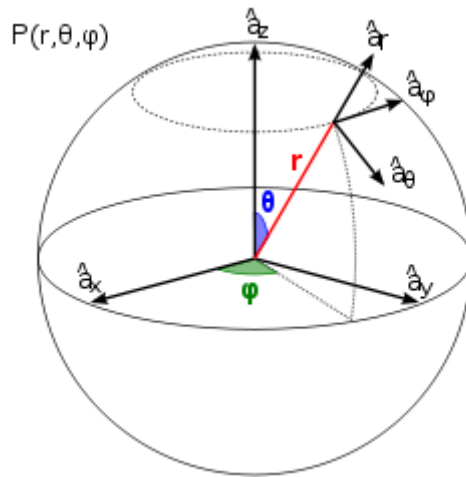


Ilustración 11 Sistema de coordenadas esférico [30]

2.5.2. Coordenadas u-v.

Las coordenadas u-v se pueden obtener mediante las coordenadas θ - ϕ obtenidas previamente aplicando la siguiente expresión de cada coordenada.

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

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

El valor máximo que puede tomar el espacio de coordenadas u-v es 1, ya que sus coordenadas están obtenidas mediante senos y cosenos. Este espacio nos es útil para tener una vista desde arriba del patrón de radiación de nuestra antena.

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

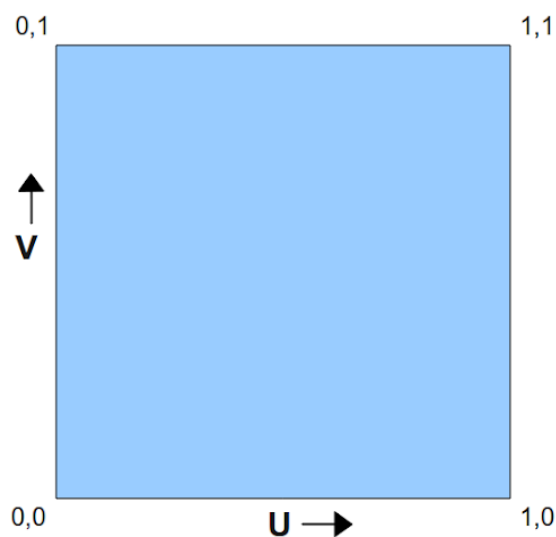


Ilustración 12 Sistema de coordenadas u-v [31]

2.6. Antena monopolo.

Un monopolo es un tipo de antena que es la mitad de un dipolo, y lo más común es tener un monopolo de longitud $\lambda/4$. Se trata de una antena que consta de un conductor recto en forma de varilla, a menudo montado perpendicularmente sobre algún tipo de superficie conductora, llamado plano de tierra.

El monopolo se utiliza a menudo como antena resonante; la varilla funciona como un resonador abierto para ondas de radio, oscilando con ondas estacionarias de voltaje y corriente a lo largo de su longitud. Por lo tanto, la longitud de la antena está determinada por la longitud de onda de las ondas con las que se utiliza.

El dipolo es por definición una antena simétrica respecto de su punto de alimentación central y por ello la denominación de alimentación balanceada, en cambio en el monopolo se configura una alimentación de tipo desbalanceada, siendo el *vivo* conectado al monopolo y el *retorno* conectado al plano de tierra.

Como un dipolo, un monopolo tiene un patrón de radiación omnidireccional: radia con la misma potencia en todas las direcciones azimutales perpendiculares a la antena. Sin embargo, la potencia radiada varía con el ángulo de elevación. El único cambio que hay que tener en cuenta es que la impedancia de un monopolo es la mitad de la de una antena de dipolo completo; y sólo se requiere la mitad de la tensión para conducir un monopolo a la misma corriente que un dipolo. Además, la directividad de un monopolo será el doble (hablando en escala lineal) que la directividad de un dipolo del doble de longitud.

Entre las ventajas de un monopolo está su fácil conexión a la alimentación mediante un cable coaxial sin perturbar las características de radiación del monopolo.

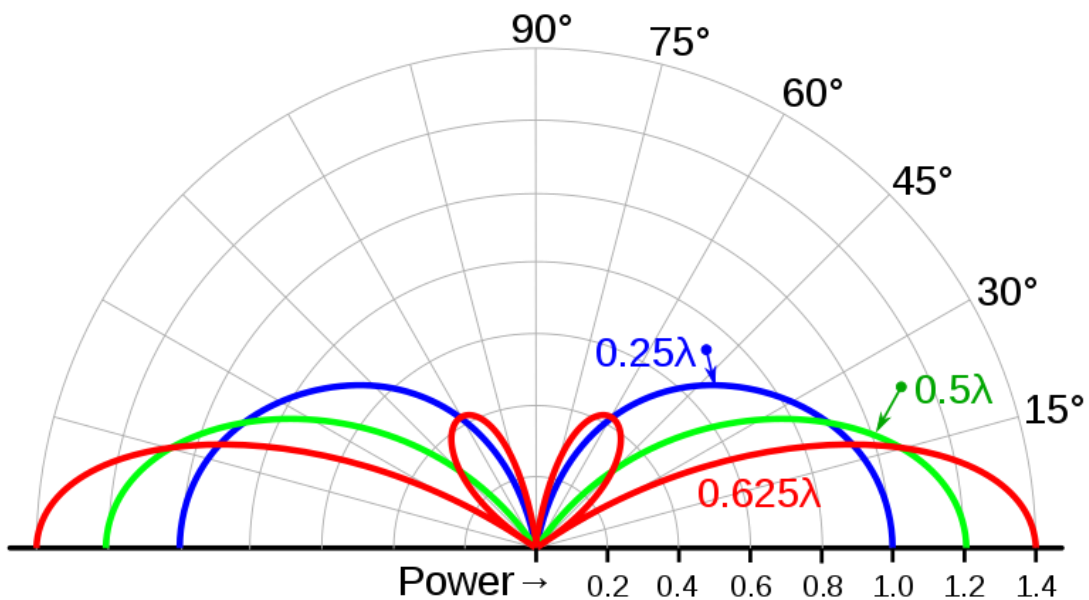


Ilustración 13 Patrón de radiación de un monopolo [32]

3. Implementación de la alimentación en la antena.

Para empezar con el desarrollo de la alimentación vamos a partir de una antena Fabry-Pérot con unas medidas ya estudiadas, siendo estas las definidas en mi Trabajo Final de Grado. La antena cuadrada de 460 milímetros de lado estaba formada por un plano de masa y un sustrato FR4 de 3 milímetros situado a 28 milímetros de altura, el cual tiene una permitividad relativa de 4.48 y una tangente de pérdidas dieléctrica de 0.01. Entre el plano de masa y la capa del sustrato (PRS o superficie parcialmente reflectante) tendremos una capa de un material esponjoso que tiene unas propiedades similares al aire, y es por ello por lo que en el simulador HFSS lo simplificaremos de esa forma. Sobre el sustrato estarían situados los parches cuadrados de 16 milímetros de lado en periodos de 20 milímetros, quedando un total de 23x23 parches.

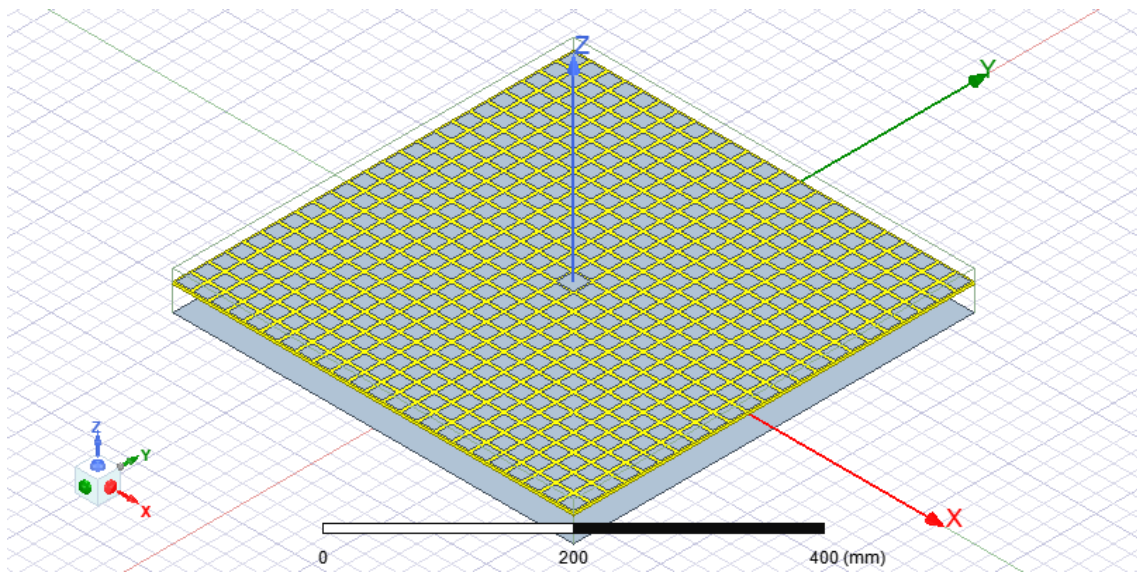


Ilustración 14 Antena Fabry-Pérot con alimentación ideal

Inicialmente, la antena estaba 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. Esto es una alimentación ideal que no se podría fabricar, y es por ello por lo que en este proyecto vamos a buscar una forma real con la que alimentar la FPA.

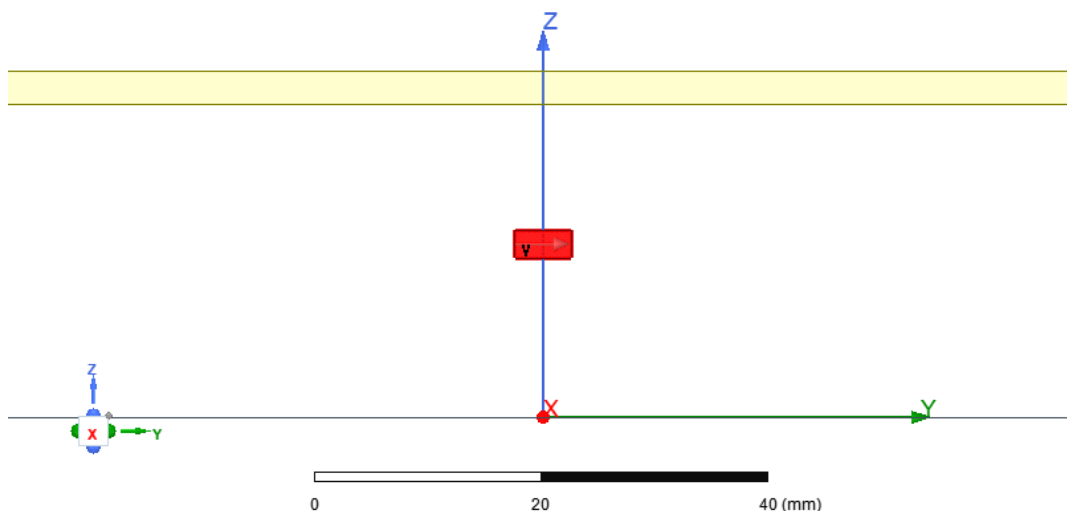


Ilustración 15 Alimentación ideal polarizada en el eje \hat{y}

Las frecuencias de interés son la banda WiFi de 5 GHz, y más en concreto nuestra antena va a funcionar desde 5.1 GHz hasta 5.3 GHz.

Al simular esta antena, en lo primero que vamos a fijarnos es en la directividad de los planos XZ e YZ, donde tenemos los siguientes resultados:

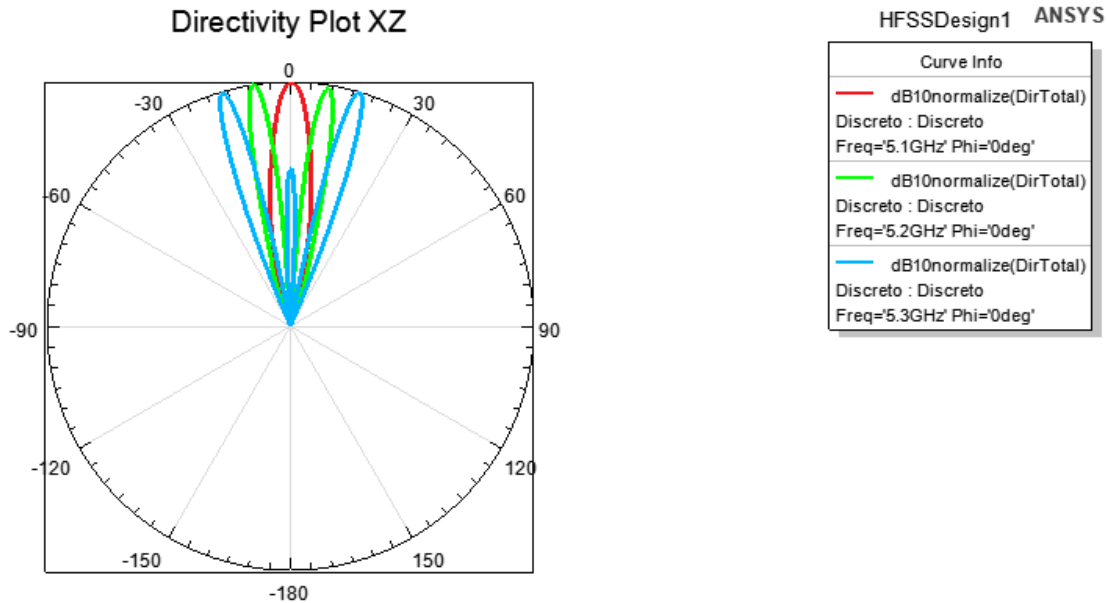


Ilustración 16 Directividad del plano XZ de la FPA con alimentación ideal

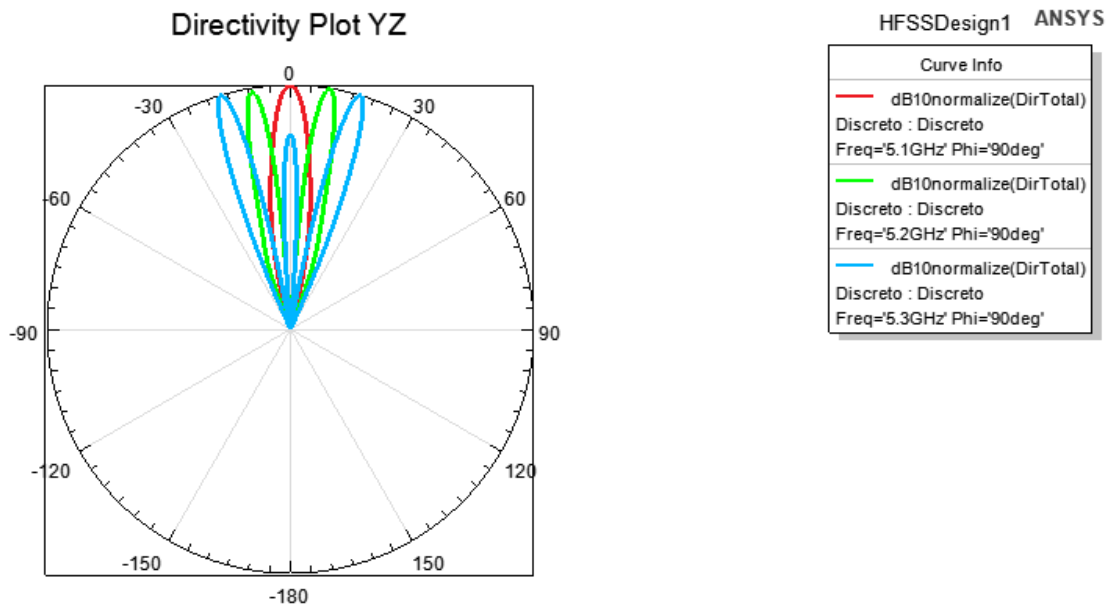


Ilustración 17 Directividad del plano YZ de la FPA con alimentación ideal

Podemos ver como a medida que aumentamos la frecuencia el haz se va abriendo, es decir, podemos apreciar la propiedad *conical-beam frequency-scanning* que vamos a usar para estimar la localización del dron.

Si pasamos a 3 dimensiones se puede ver también claramente la apertura cónica a medida que aumentamos en frecuencia. Mostrando gráficos en coordenadas rectangulares primero, y polares después, vamos a ver los resultados en las 3 frecuencias de interés mostradas también anteriormente (5.1 GHz, 5.2 GHz y 5.3 GHz):

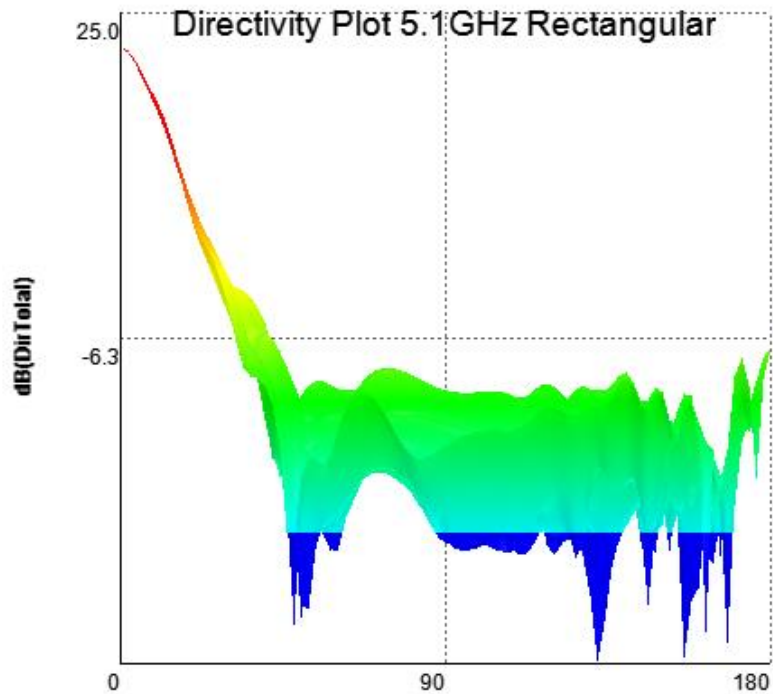


Ilustración 18 Diagrama de radiación 5.1 GHz coordenadas rectangulares de la FPA con alimentación ideal

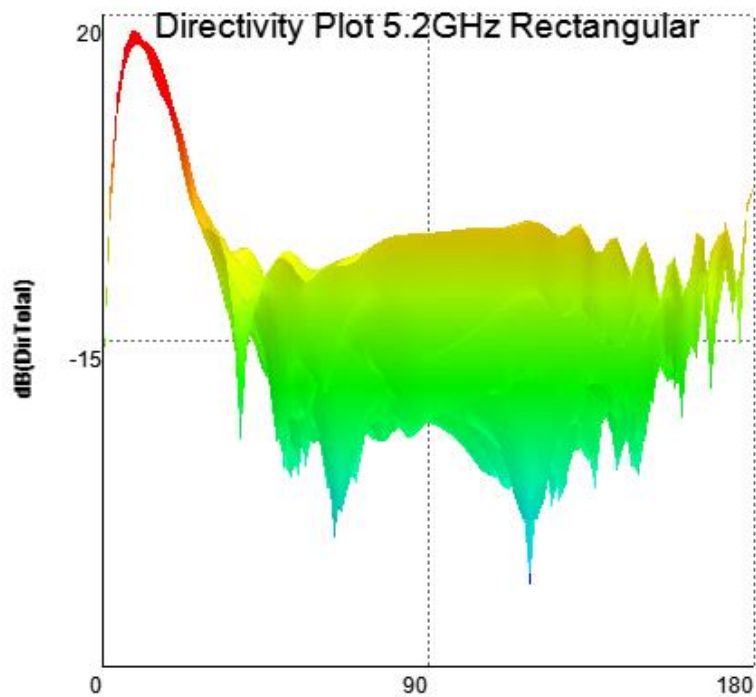


Ilustración 19 Diagrama de radiación 5.2 GHz coordenadas rectangulares de la FPA con alimentación ideal

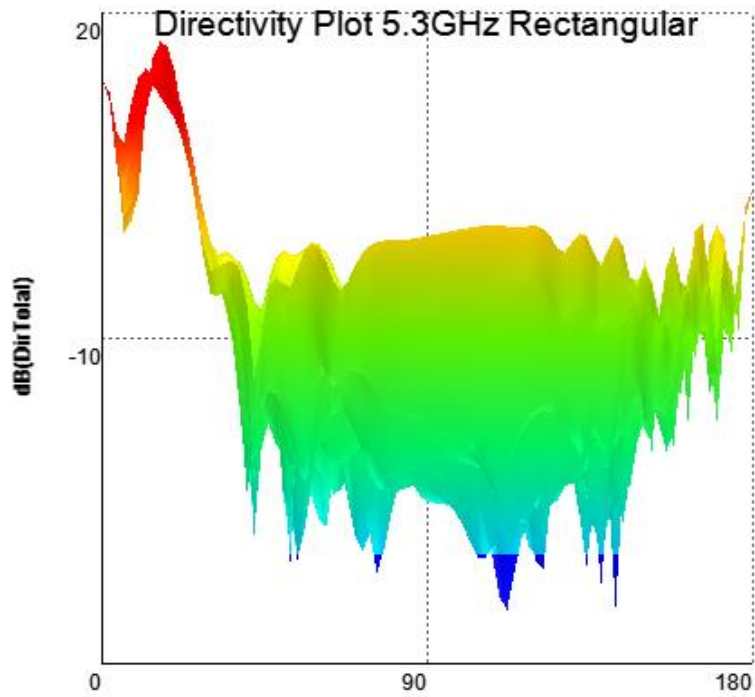


Ilustración 20 Diagrama de radiación 5.3 GHz coordenadas rectangulares de la FPA con alimentación ideal

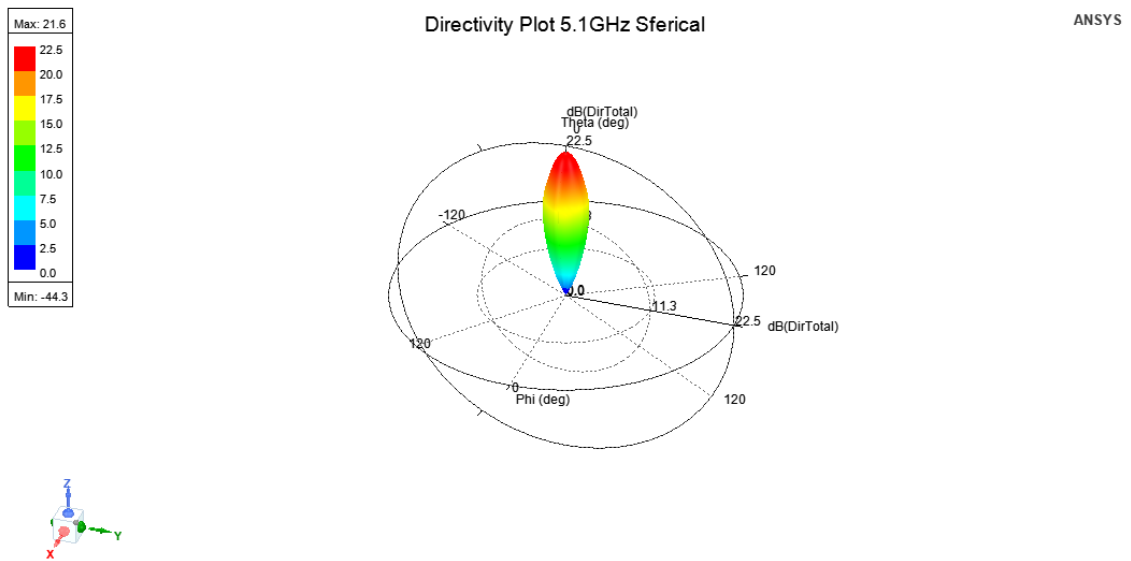
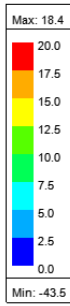


Ilustración 21 Diagrama de radiación 5.1 GHz coordenadas polares de la FPA con alimentación ideal



Directivity Plot 5.2GHz Sferical

ANSYS

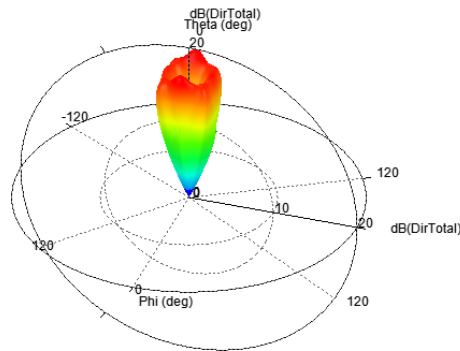
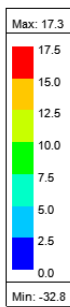


Ilustración 22 Diagrama de radiación 5.2 GHz coordenadas polares de la FPA con alimentación ideal



Directivity Plot 5.3GHz Sferical

ANSYS

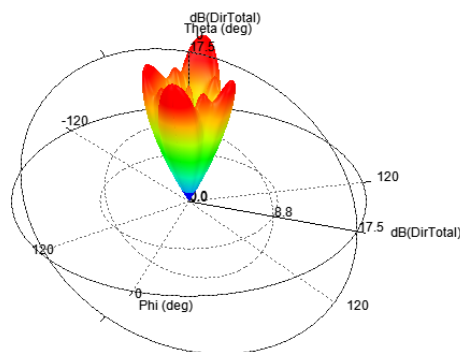


Ilustración 23 Diagrama de radiación 5.3 GHz coordenadas polares de la FPA con alimentación ideal

El dron se encarga de hacer un escaneo de la potencia según la frecuencia para encontrar el centro de la antena, es decir, de la plataforma de aterrizaje observando la apertura cónica de estos diagramas de radiación. Al principio tenemos un diagrama directivo, y conforme aumenta la frecuencia se puede apreciar la apertura en el haz de radiación.

El dron es capaz de averiguar el ángulo θ en el que se encuentra una vez esté dentro del campo de visión o field of view (FoV), y será capaz de llegar al centro de la plataforma mediante varias iteraciones (el dron debe estar correctamente programado).

Observando los diagramas de radiación (sobre todo si nos fijamos en los gráficos de los planos XZ e YZ) se puede ver que el FoV es de 36° , ya que abarcamos desde $+18^\circ$ hasta -18° con esta

antena. Hasta llegar a la zona del campo de visión el dron deberá usar la tecnología GPS, llegando así a introducirse en el área que queremos.

Podemos ver también cómo evoluciona el ángulo de máxima radiación en los planos XZ e YZ a medida que aumentamos en frecuencia en el siguiente gráfico, pudiendo comprobar así también el FoV, que será el ángulo de máxima radiación en la frecuencia de interés más alta, es decir, en 5.3 GHz:

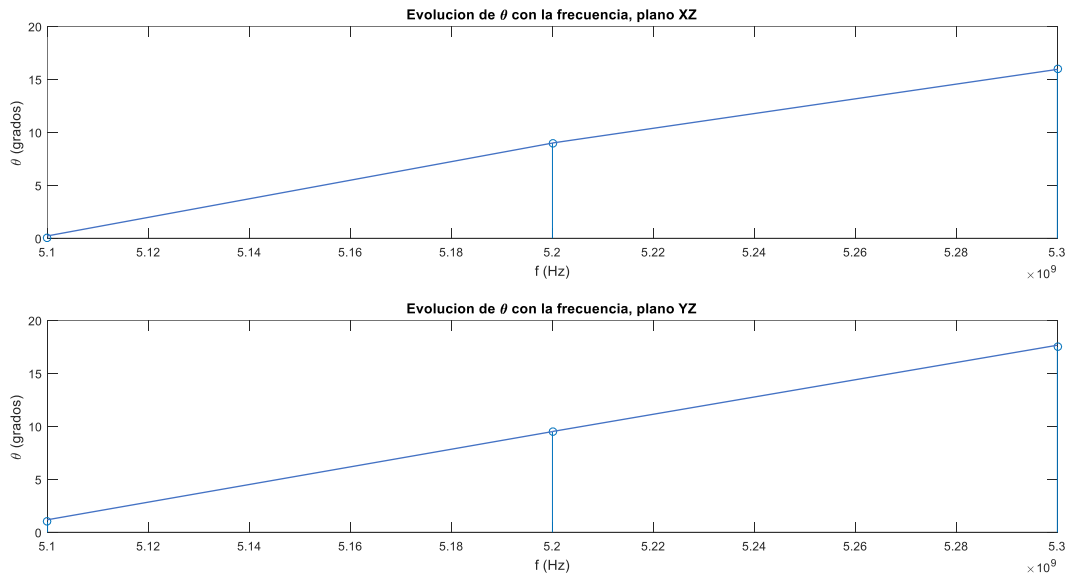


Ilustración 24 Evolución de ϑ con la frecuencia usando alimentación ideal

Una vez vistos los resultados con los que partimos, el objetivo es diseñar una alimentación con la que no se deterioren los resultados (o al menos lo hagan lo mínimo posible) para conseguir un correcto funcionamiento en el estacionamiento del dron.

Hay varias formas de alimentar nuestra FPA, y en este caso he escogido un monopolo orientado en el eje \hat{y} para tener la misma polarización. La idea es que el monopolo esté en el centro de la antena en términos de altura, al igual que situamos la alimentación ideal inicialmente. Sin embargo, puede haber variaciones según tengamos mejores o peores resultados, y es por ello por lo que la altura a la que colocamos el monopolo será uno de los parámetros a optimizar. Para ello, colocaremos el monopolo inicialmente en el centro de la antena y usaremos un parámetro auxiliar (H_{Aux}) el cual podrá ser positivo o negativo en función de si lo movemos hacia arriba o hacia abajo.

También hay que ver la longitud que tendrá el monopolo. Teóricamente debería ser $\lambda/4$, pero al igual que ocurría con la posición del monopolo puede haber variaciones. Es por ello por lo que la longitud será otro parámetro para optimizar, y más en concreto usaremos también una variable auxiliar (L_{Aux}) que podrá ser positiva o negativa en función de si la longitud final será mayor o menor que $\lambda/4$.

Como estamos en la banda de WiFi de 5GHz, el valor de λ se calcula a partir de esta frecuencia, quedando un valor de $\lambda=60$ milímetros. La cuarta parte será, por tanto, 15 milímetros.

Otro apartado importante es la forma de conectar el monopolo. Para ello, vamos a usar una conexión por coaxial. El conector es el siguiente:

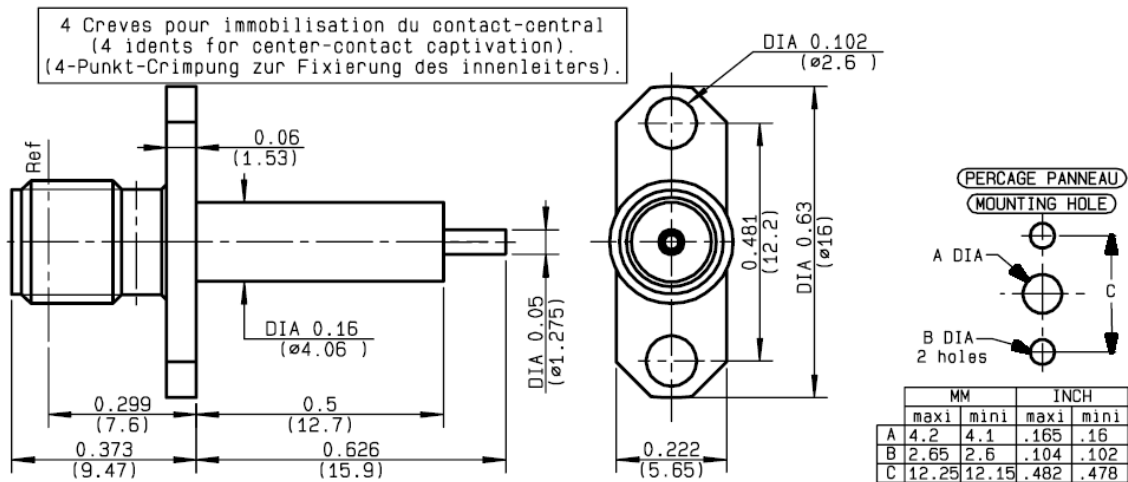


Ilustración 25 Conector coaxial

Una vez decidido todo esto, es momento de implementarlo en HFSS para ver si el funcionamiento es el esperado. La antena quedaría, por tanto, de la siguiente forma:

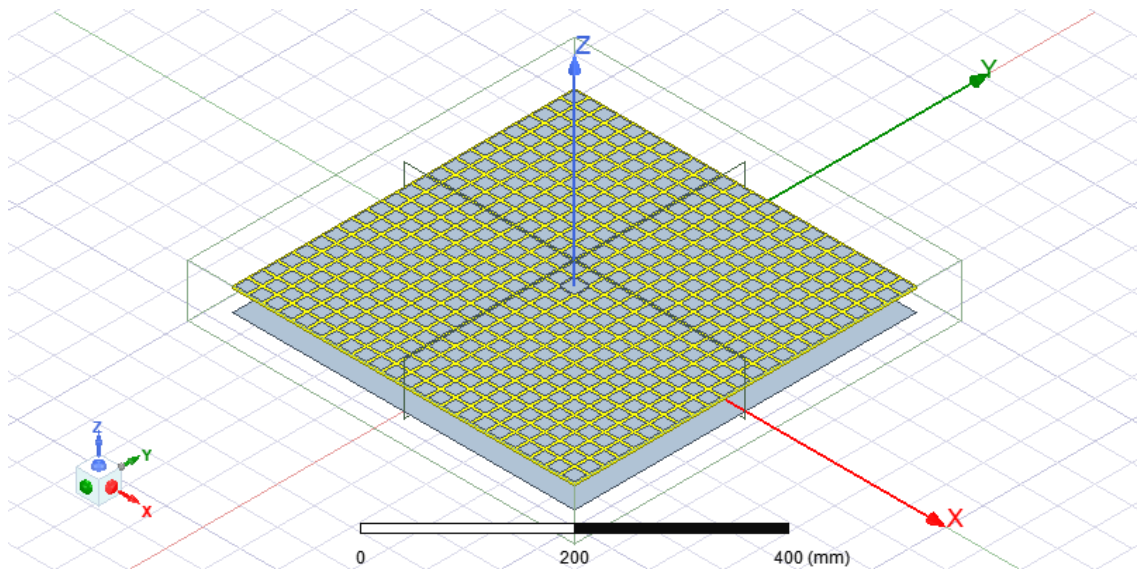


Ilustración 26 Antena Fabry-Pérot con alimentación real

Si nos fijamos en la alimentación, queda el conector colocado en la parte inferior. Por él, sube una conexión coaxial hasta llegar al monopolo que estará orientado en el eje \hat{y} . El monopolo estará a una altura de $(28 + 3) / 2 = 15.5$ milímetros, ya que la altura total de la antena son los 28 milímetros del material esponjoso y los 3 milímetros del substrato FR4. Tendrá una longitud inicial de 15 milímetros ($\lambda/4$), como bien se había especificado anteriormente.

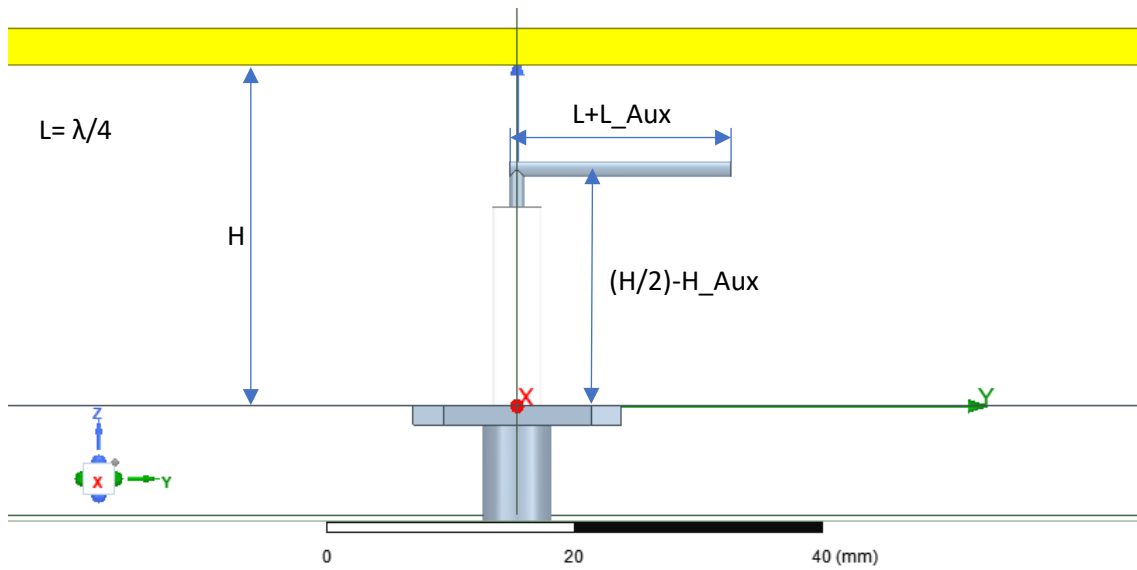


Ilustración 27 Alimentación real polarizada en el eje \hat{y}

Podemos ver más imágenes de la alimentación (observando desde diferentes puntos de vista) para ver claramente cómo está formada:

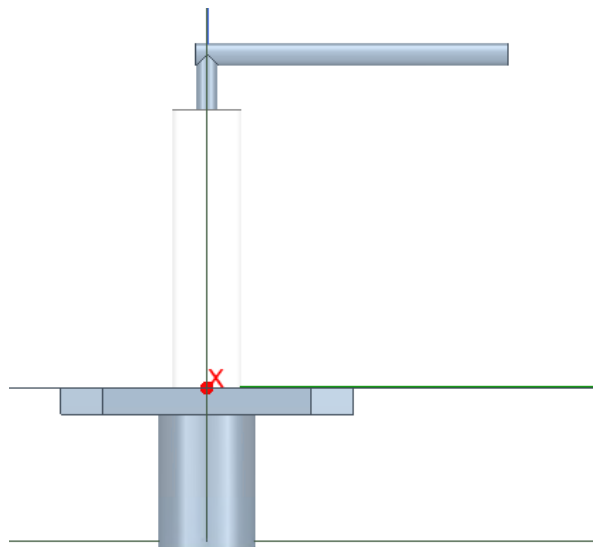


Ilustración 28 Alimentación real, vista lateral

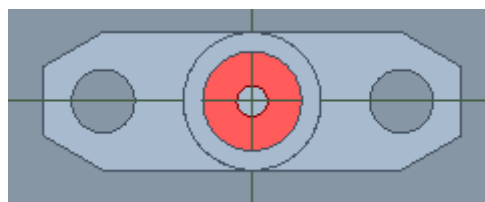


Ilustración 29 Alimentación real, vista inferior

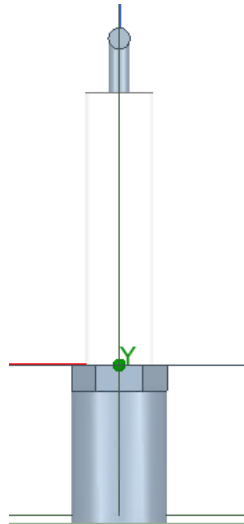


Ilustración 30 Alimentación real, vista frontal

Parámetro	Valor
Altura H desde el plano de masa hasta el sustrato FR4	28 mm
Longitud L ($\lambda/4$)	15 mm
Longitud del monopolo	L+L_Aux
Diámetro del monopolo y del conductor interior	1.275 mm
Diámetro del recubrimiento de teflón	4.06 mm
Altura del conductor interior	(H/2)-H_Aux
Altura del recubrimiento de teflón	[(H/2)-H_Aux]-3.2mm

Ilustración 31 Parámetros de la alimentación

Una vez hecho todo el diseño y quedando claro los parámetros que vamos a optimizar, es momento de empezar a simular.

Parámetro para optimizar	Descripción
H_Aux	Diferencia de altura en la que quedará el monopolo respecto al centro de la antena (15.5 milímetros)
L_Aux	Diferencia de longitud del monopolo respecto a $\lambda/4$ (15 milímetros)

Ilustración 32 Parámetros de la alimentación que se van a optimizar

3.1. Optimización de la alimentación.

Para escoger unas medidas u otras, es importante fijarnos en los diagramas de radiación (planos XZ e YZ inicialmente) y comprobar la apertura del haz de potencia a medida que aumentamos la frecuencia, pero también tenemos que ver el parámetro S11.

Lo que estamos buscando es que el parámetro S11 sea lo más lineal posible (escala logarítmica) y que haya una mayor diferencia de su valor entre 5.1 GHz y 5.3 GHz.

Para empezar a hacer pruebas, comencé con incrementos de 1 milímetro en ambos parámetros (H_Aux y L_Aux), tanto positivos como negativos, llegando hasta un límite de 10 milímetros por encima y por debajo de los valores que teóricamente eran los correctos. Los mejores resultados, tanto al referirnos al parámetro S11 como a los diagramas de radiación, fueron los siguientes:

- H_Aux = -2mm, L_Aux = 8mm

- $H_{Aux} = 0\text{mm}$, $L_{Aux} = 10\text{mm}$
- $H_{Aux} = -3\text{mm}$, $L_{Aux} = 4\text{mm}$

Si nos fijamos en las siguientes figuras, podemos ver el parámetro S11 y los diagramas de radiación de las combinaciones de medidas mencionadas anteriormente:

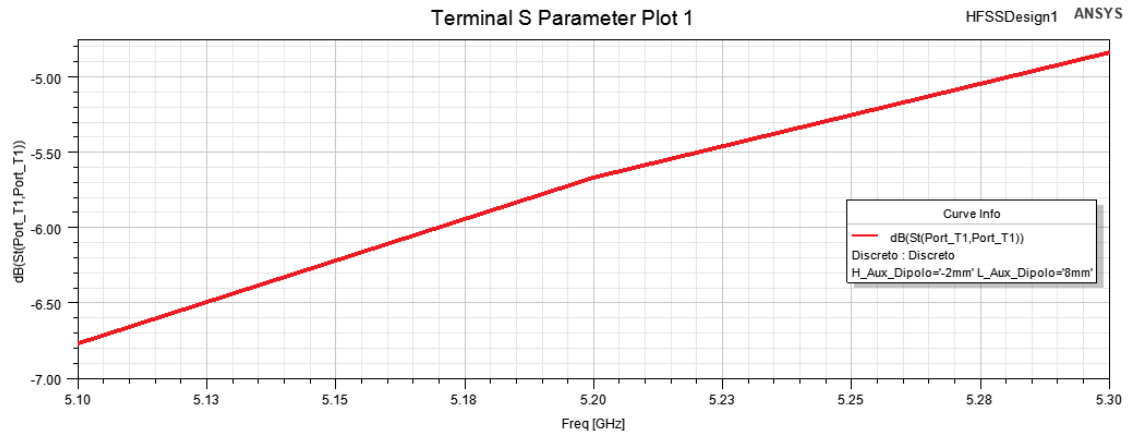


Ilustración 33 Parámetro S11 con $H_{Aux} = -2\text{mm}$, $L_{Aux} = 8\text{mm}$

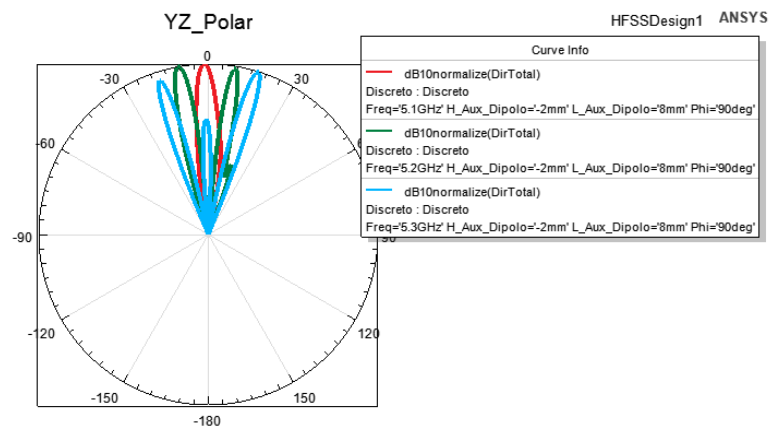


Ilustración 34 Directividad plano YZ con $H_{Aux} = -2\text{mm}$, $L_{Aux} = 8\text{mm}$

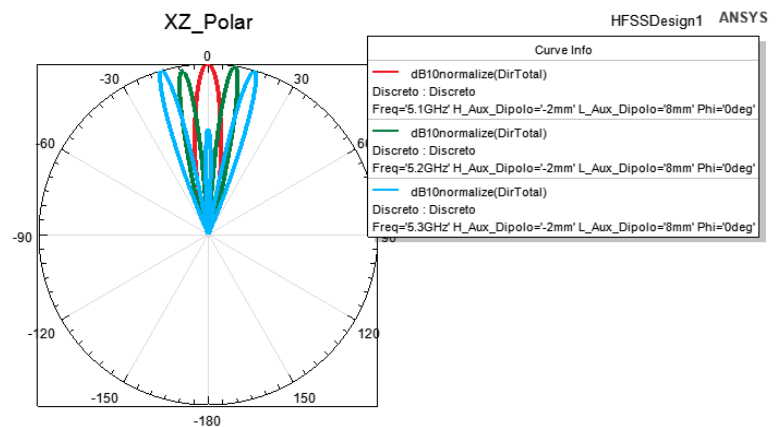


Ilustración 35 Directividad plano XZ con $H_{Aux} = -2\text{mm}$, $L_{Aux} = 8\text{mm}$

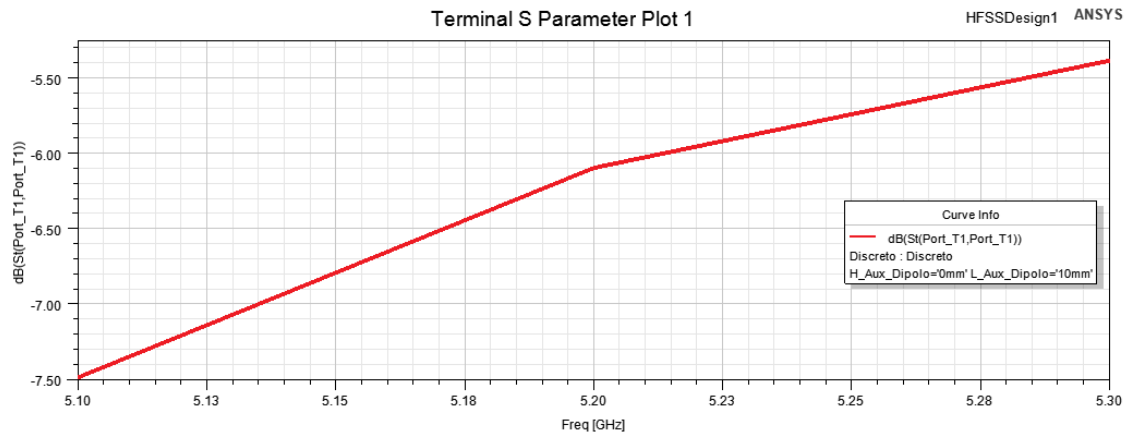


Ilustración 36 Parámetro S11 con $H_{Aux} = 0mm$, $L_{Aux} = 10mm$

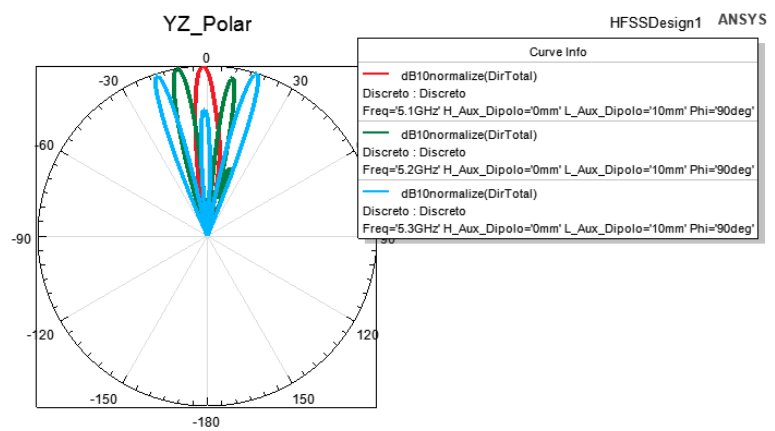


Ilustración 37 Directividad plano YZ con $H_{Aux} = 0mm$, $L_{Aux} = 10mm$

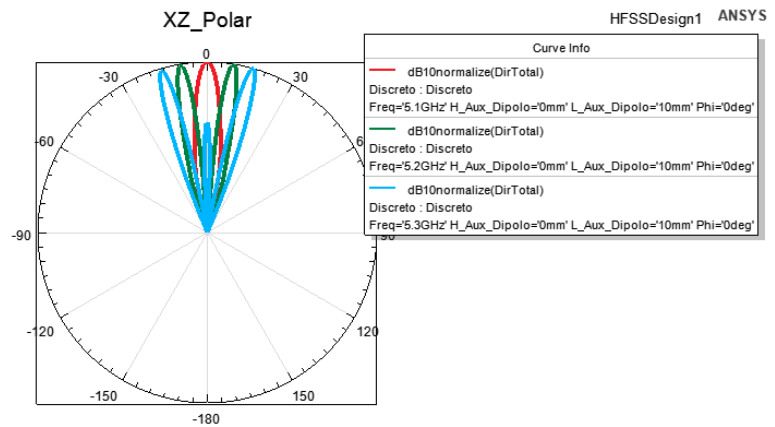


Ilustración 38 Directividad plano XZ con $H_{Aux} = 0mm$, $L_{Aux} = 10mm$

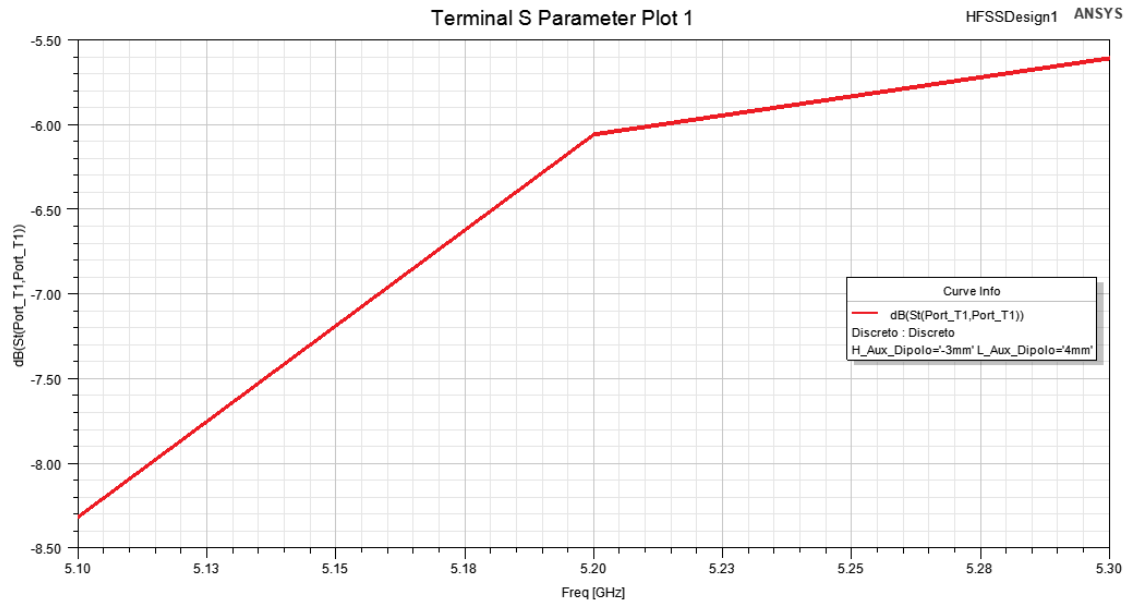


Ilustración 39 Parámetro S11 con $H_{Aux} = -3mm$, $L_{Aux} = 4mm$

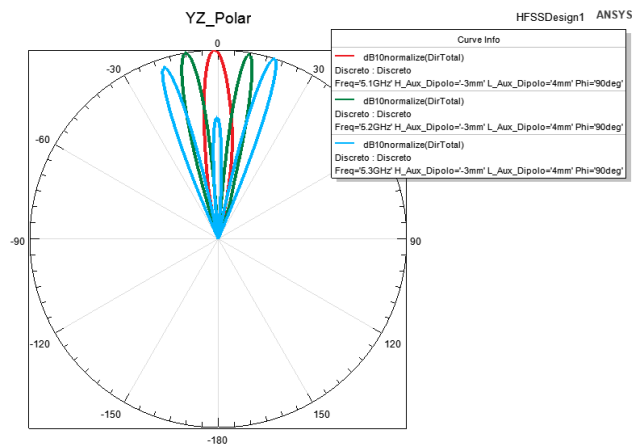


Ilustración 40 Directividad plano YZ con $H_{Aux} = -3mm$, $L_{Aux} = 4mm$

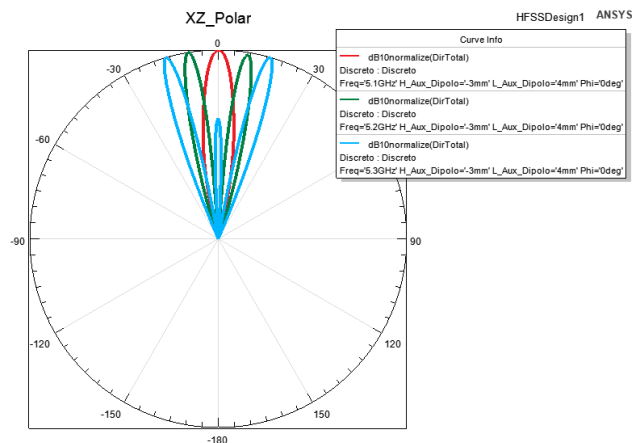


Ilustración 41 Directividad plano XZ con $H_{Aux} = -3mm$, $L_{Aux} = 4mm$

En todas las opciones se podía ver una correcta apertura del haz de potencia, pero hay diferencias en cuanto al parámetro S11. De arriba abajo, el resultado perdía linealidad a cambio de conseguir una mayor diferencia de su valor a 5.3GHz y a 5.1GHz.

La opción escogida fue la última ($H_{Aux} = -3\text{mm}$, $L_{Aux} = 4\text{mm}$), pero no fue la elección final. Una vez teníamos este resultado, pasé a realizar más simulaciones con incrementos de 0.25 milímetros en ambos parámetros, pero en lugar de abarcar medidas desde +10mm y -10mm respecto a los valores teóricos, me centré en valores cercanos a la opción escogida.

Finalmente, el diseño final tiene las siguientes dimensiones:

- $H_{Aux} = -4\text{mm}$, quedando el monopolo a una altura de la antena de 19.5 milímetros.
- $L_{Aux} = 3.25\text{mm}$, quedando un monopolo de 18.25 milímetros de largo.

Con lo cual, en lugar de los 15.5 milímetros teóricos de altura en la que debería estar el monopolo, estará situado en 19.5 milímetros; es decir, 4 milímetros más alto. También de los 15 milímetros que debería medir el monopolo ($\lambda/4$) teóricos, al final van a ser 18.25 milímetros. Esto se debe a que los valores teóricos serían con una alimentación ideal, pero al realizar la simulación el monopolo ocupa un espacio físico que puede afectar a los resultados, además del espacio que ocupa la propia conexión.

Aunque los valores que teóricamente deberían ser óptimos no lo son, sí que se aproximan mucho a los valores que finalmente han sido escogidos.

Con estas dimensiones, el parámetro S11 tiene la siguiente forma:

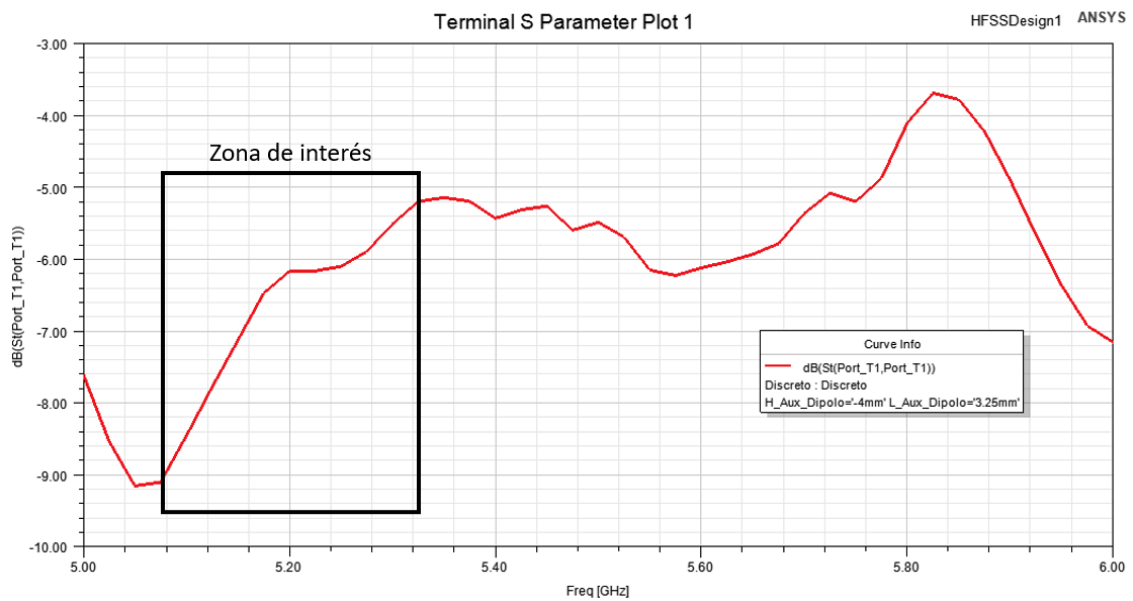


Ilustración 42 Parámetro S11 de la FPA con alimentación ideal

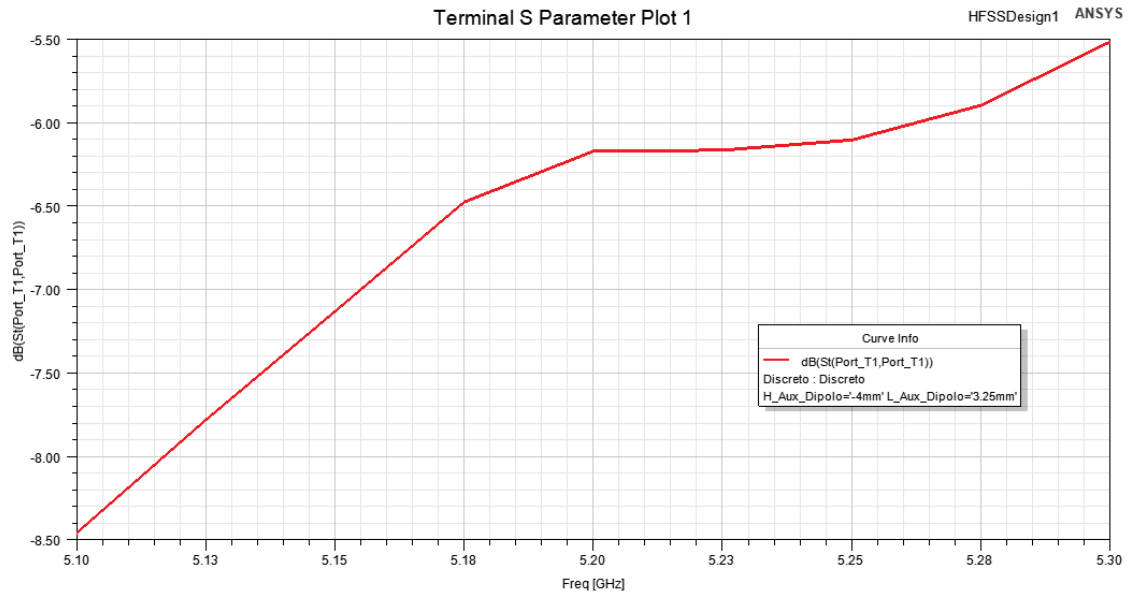


Ilustración 43 Parámetro S11 de la FPA con alimentación ideal en las frecuencias de trabajo

Conseguimos una diferencia de 3dB entre las frecuencias máxima y mínima en la que vamos a trabajar suficiente para el correcto funcionamiento de nuestra antena.

Si nos fijamos en los diagramas de radiación de los planos perpendiculares XZ e YZ podemos observar los siguientes resultados:

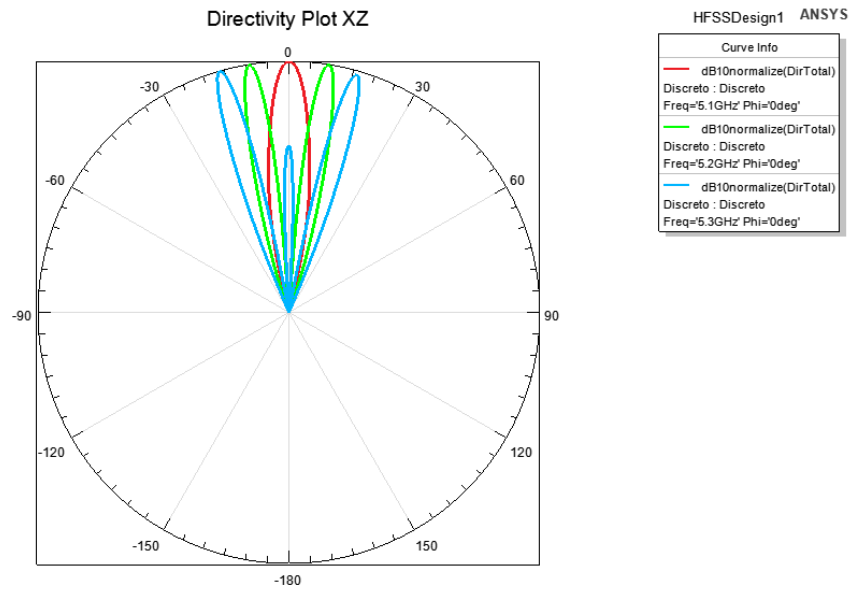


Ilustración 44 Directividad del plano XZ de la FPA con alimentación real

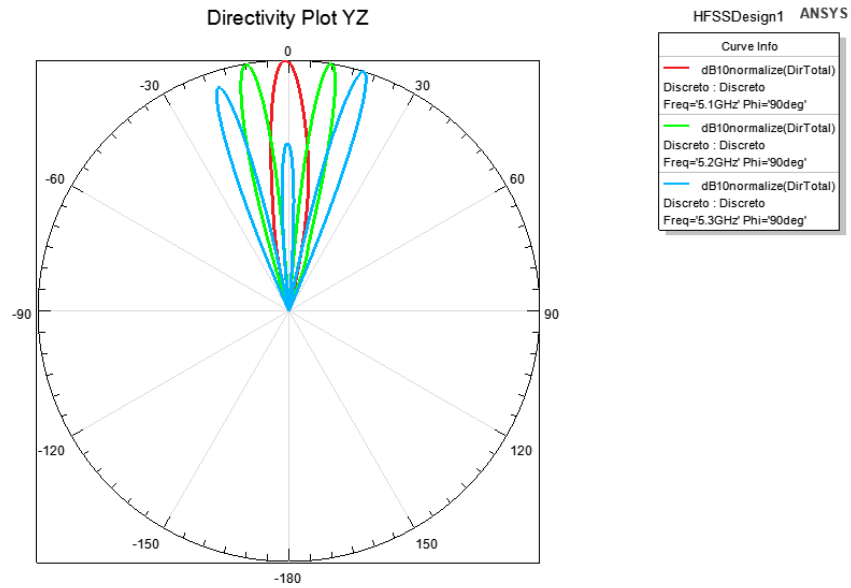


Ilustración 45 Directividad del plano YZ de la FPA con alimentación real

Al igual que con los casos anteriores, también tenemos una correcta apertura del haz de potencia. Además, el campo de visión o FoV de la antenna no se ha visto reducido respecto a la antenna con alimentación ideal, ya que sigue siendo de 36°.

Este FoV expresado en grados se puede ver también en función de la altura en la que se encuentra el dron, observando el radio del área que cubrimos:

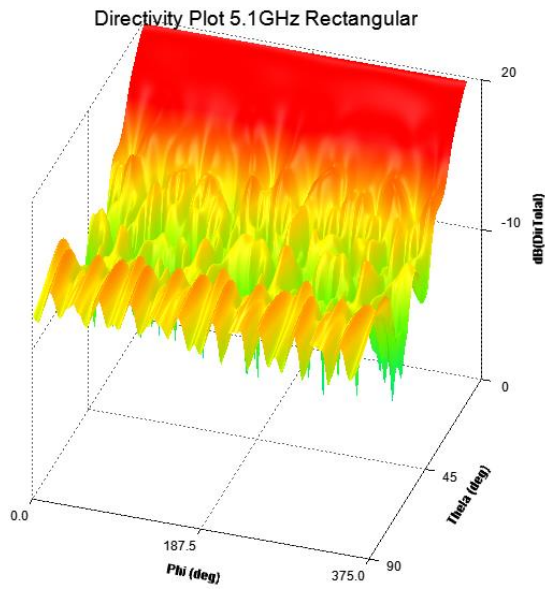
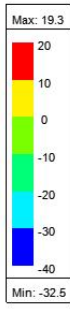
Altura del dron respecto a la antenna (h)	Radio que cubre la antenna (r)
1 metro	0.32 metros
3 metros	0.97 metros
5 metros	1.62 metros
10 metros	3.25 metros
15 metros	4.87 metros

Ilustración 46 Relación del FoV con la altura del dron respecto a la antenna

Esto se obtiene a partir de la siguiente relación trigonométrica:

$$r = h * \tan 18^\circ$$

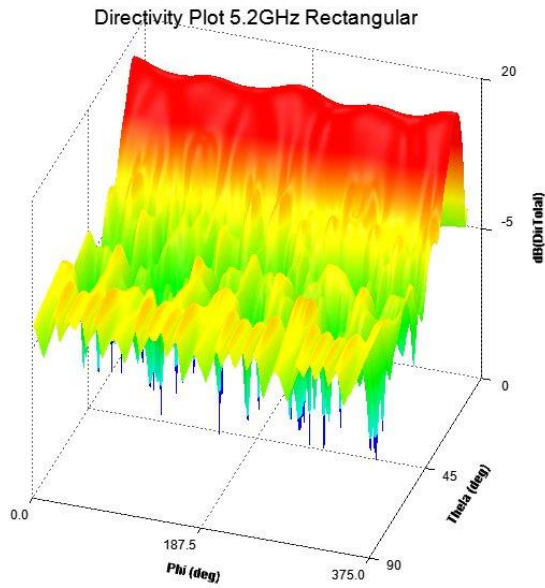
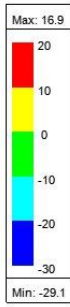
Si pasamos ahora a 3 dimensiones para ver los diagramas completos (en coordenadas rectangulares y polares):



ANSYS



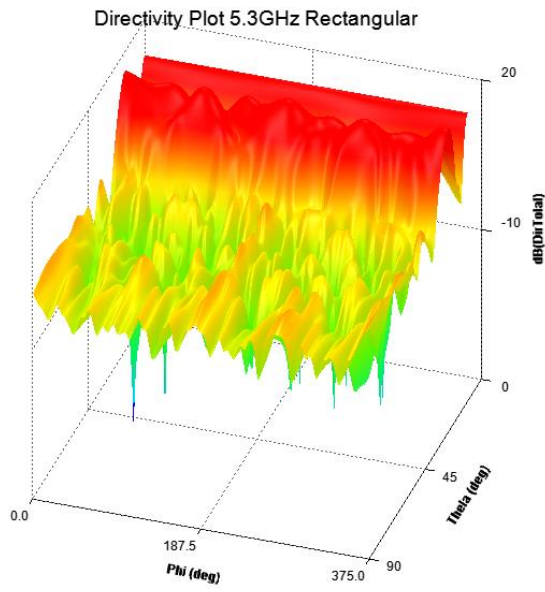
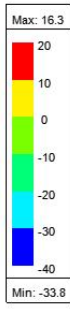
Ilustración 47 Diagrama de radiación 5.1 GHz coordenadas rectangulares de la FPA con alimentación real



ANSYS

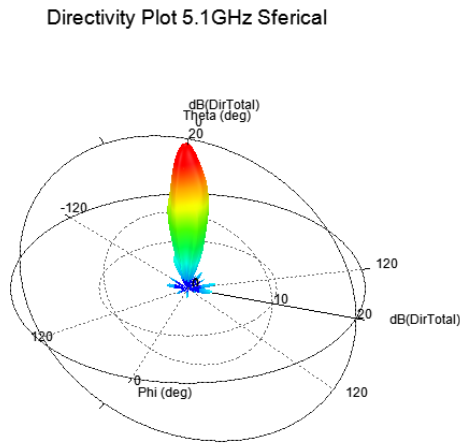
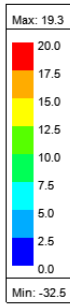


Ilustración 48 Diagrama de radiación 5.2 GHz coordenadas rectangulares de la FPA con alimentación real



ANSYS

Ilustración 49 Diagrama de radiación 5.3 GHz coordenadas rectangulares de la FPA con alimentación real



ANSYS

Ilustración 50 Diagrama de radiación 5.1 GHz coordenadas polares de la FPA con alimentación real

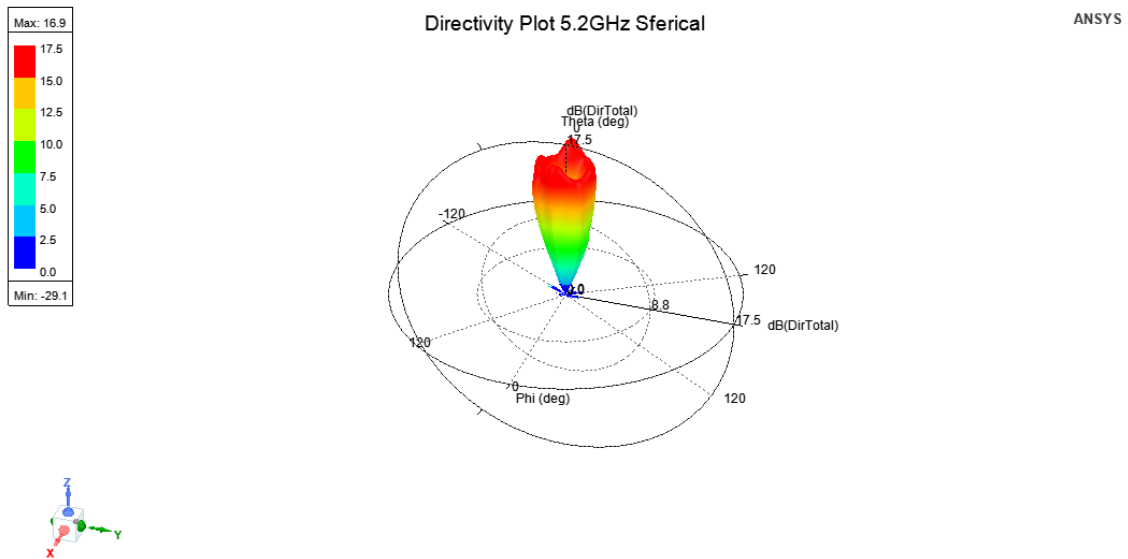


Ilustración 51 Diagrama de radiación 5.2 GHz coordenadas polares de la FPA con alimentación real

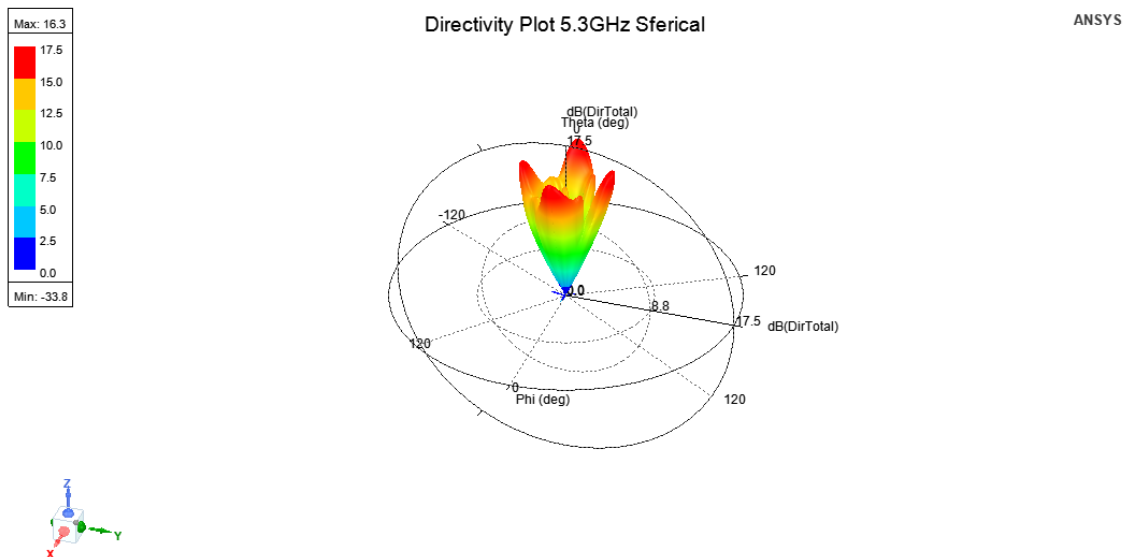


Ilustración 52 Diagrama de radiación 5.3 GHz coordenadas polares de la FPA con alimentación real

Estos diagramas se asemejan mucho a los obtenidos cuando teníamos una alimentación ideal, por lo que el funcionamiento de la antena debería ser también correcto. Podemos entonces establecer definitivamente el valor de los parámetros a optimizar:

Parámetro optimizado	Valor	Descripción
H_Aux	-4mm	Monopolo colocado a 19.5mm de altura (4mm sobre el centro de la antena)
L_Aux	3.25mm	Monopolo de 18.25mm de largo (3.25mm más sobre 15mm, es decir, sobre $\lambda/4$)

Ilustración 53 Parámetros de la alimentación optimizados

4. Implementación de una superficie de alta impedancia (HIS).

Es interesante también añadir en la antena Fabry-Pérot una superficie de alta impedancia o HIS sobre el plano de masa. Esta HIS estaría formada, al igual que la superficie parcialmente reflectante o PRS que tenemos en la parte superior, por sustrato FR4 y tendría parches cuadrados sobre ella. El grosor de esta y el tamaño de sus parches es algo que hay que optimizar.

La función de la HIS es ampliar el campo de visión o FoV de nuestra antena, de forma que podamos hacer un escaneo más preciso y cubramos un rango mayor desde el centro de la antena. Queremos aumentar el rango angular de escaneo usando el mismo ancho de banda, es decir, aumentar la velocidad o sensibilidad de escaneo con la frecuencia. [33]

La antena final tendría la siguiente forma:

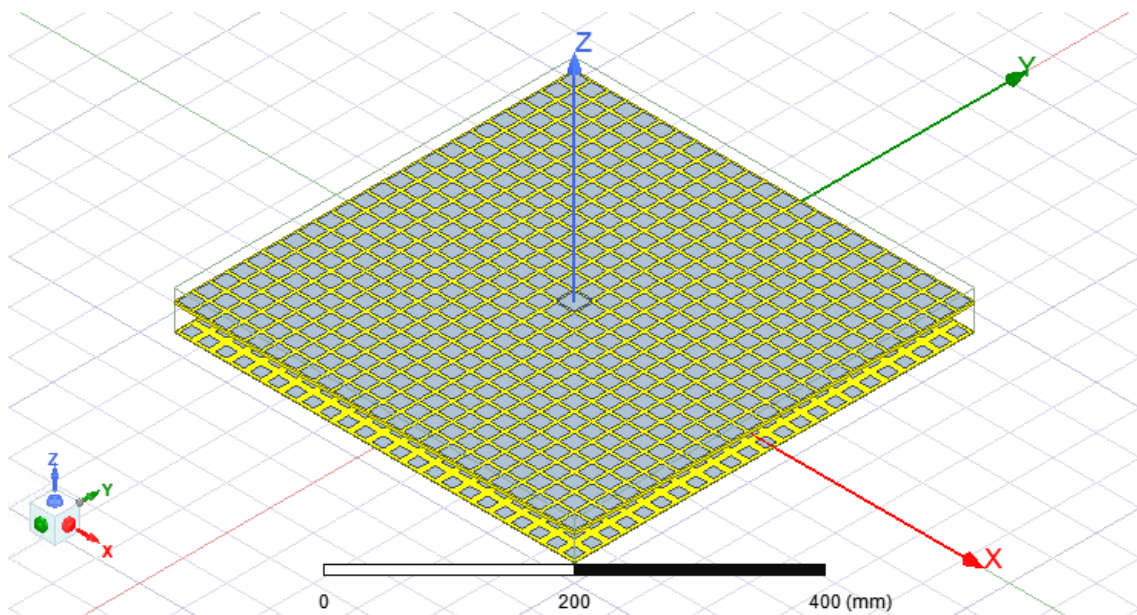


Ilustración 54 Antena Fabry-Pérot con HIS

Al igual que hice en mi Trabajo de Fin de Grado, habría que ver primero el caso más simple en el que tenemos la antena en 1 dimensión y pasar luego a las 2 dimensiones.

Sin embargo, tras numerosas simulaciones probando varias combinaciones de medidas (variando las dimensiones de la PRS y de la HIS) los resultados no fueron los esperados. Si nos fijamos en el primer canal de interés, situado en 5.1 GHz, algunos resultados fueron los siguientes:

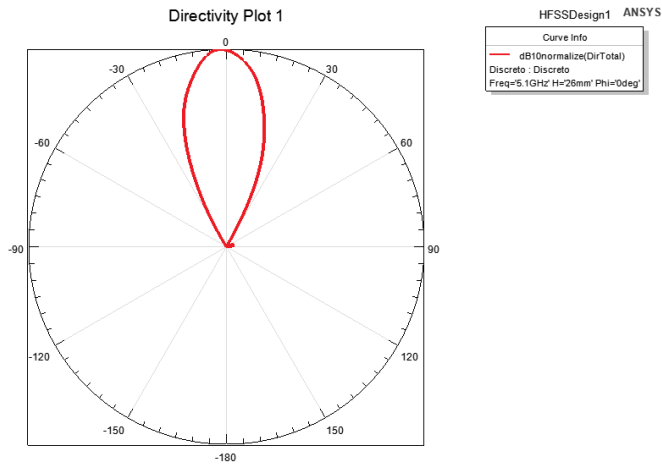


Ilustración 55 Directividad 5.1GHz FPA con HIS, caso 1

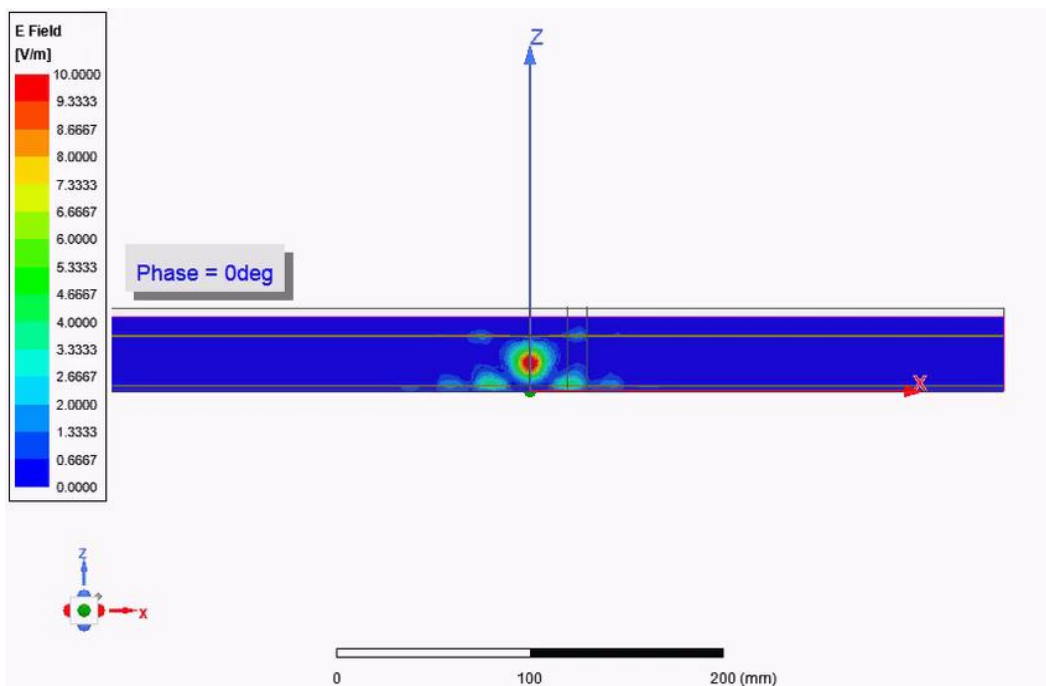


Ilustración 56 Campo eléctrico FPA con HIS, caso 1

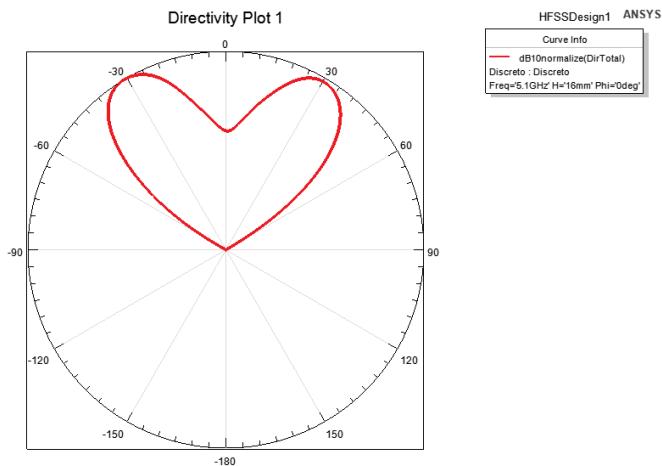


Ilustración 57 Directividad 5.1GHz FPA con HIS, caso 2

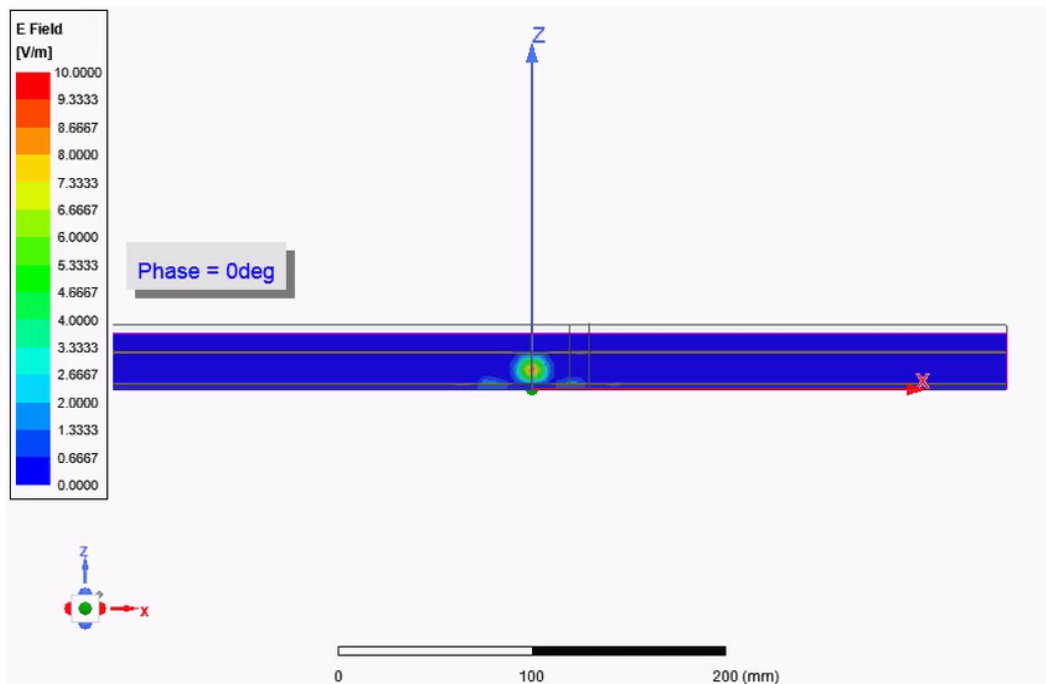


Ilustración 58 Campo eléctrico FPA con HIS, caso 2

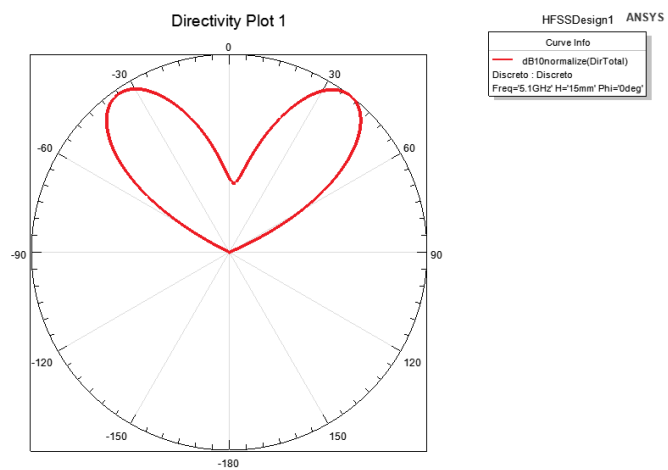


Ilustración 59 Directividad 5.1GHz FPA con HIS, caso 3

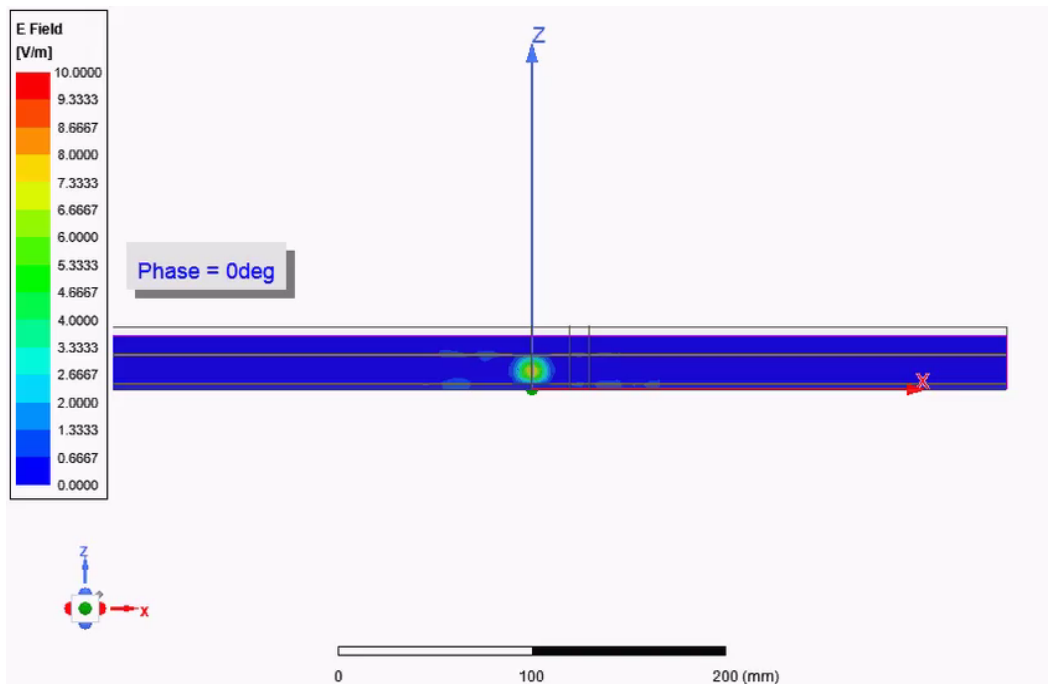


Ilustración 60 Campo eléctrico FPA con HIS, caso 3

En el caso 1 podemos ver el haz de potencia dirigido a 0° , mientras que en los casos 2 y 3 podemos comprobar que ya se comienza a ver la apertura del haz, por lo que el primer canal lo tendríamos a una frecuencia más baja. Sin embargo, siempre me he estado encontrando con el mismo problema: si nos fijamos en el campo eléctrico no se produce propagación.

Habría que conseguir de alguna forma que se produzca una propagación por toda la antena para que el funcionamiento sea correcto, ya que ahora mismo parece que toda la potencia es absorbida por la superficie de alta impedancia que tenemos sobre el plano de masa.

Esto sería interesante optimizarlo en un futuro Trabajo de Fin de Estudios, empezando por el diseño 1D y terminando con el diseño 2D. Se podría empezar con una alimentación ideal y luego pasar a una alimentación real que puede coincidir o no con la desarrollada en este proyecto.

Por tanto, para los resultados finales de este proyecto vamos a trabajar sin la HIS.

5. Estimación de la localización (postprocesado).

5.1. 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.

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

Δ corresponde a la función diferencia, mientras que Σ 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.

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

5.1.1. Obtención de las funciones monopulso.

Lo primero que hay que hacer para obtener las funciones monopulso y empezar así con el postprocesado es exportar los resultados de directividad o ganancia que teníamos en HFSS para así poder trabajar con ellos en Matlab. Necesitamos además escoger un plano para elaborar las funciones monopulso, que en este caso será el plano XZ (podría ser también el plano YZ y el funcionamiento sería el mismo o muy similar).

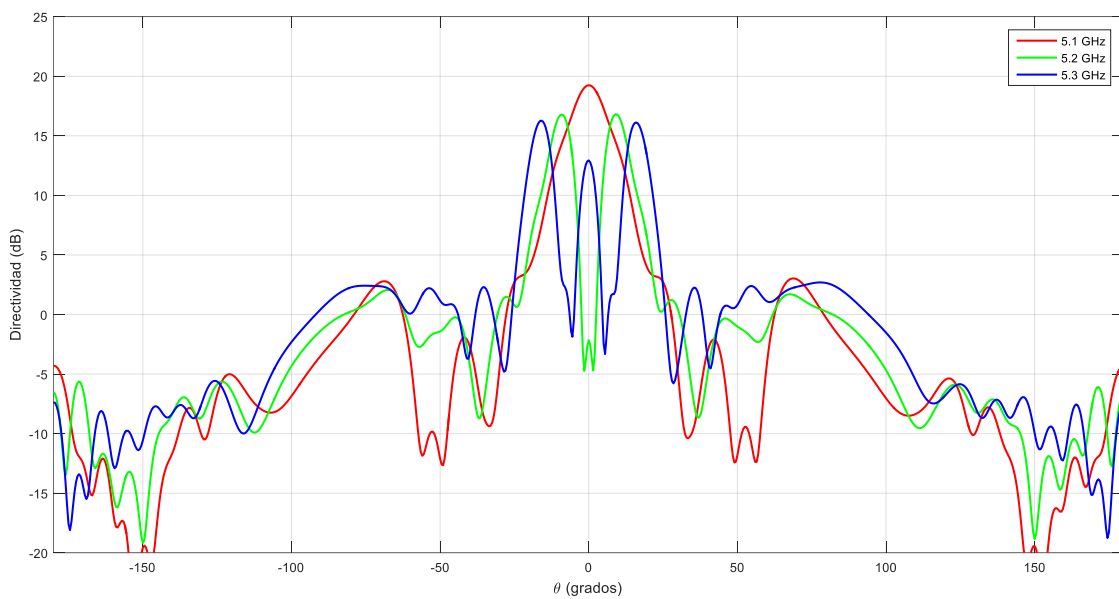


Ilustración 61 Directividad plano XZ para el postprocesado

Para trabajar con estos datos en Matlab, hay que separar los resultados de cada frecuencia (5.1GHz, 5.2GHz y 5.3GHz) en función del ángulo θ en matrices, de forma que se permitan operaciones con ellos.

El siguiente paso es normalizar estos valores respecto a la potencia máxima de cada canal, quedando el gráfico de la siguiente forma:

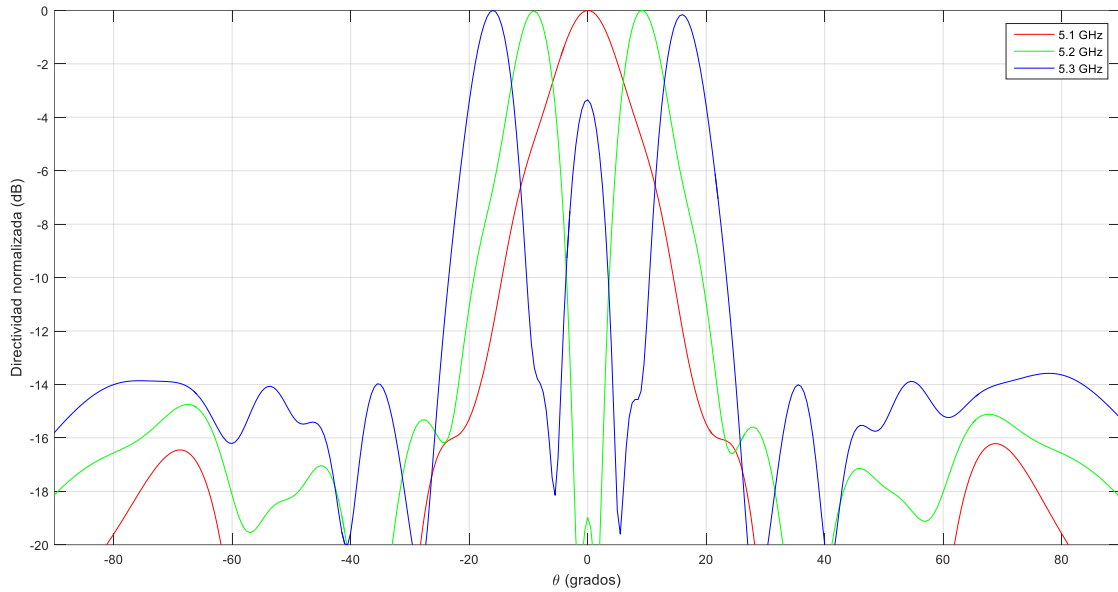


Ilustración 62 Directividad normalizada plano XZ

Estos valores se pasarán a escala lineal y, una vez hecho, se construirán las funciones monopulso. Hay que escoger también un ángulo de llegada (o DoA) que esté dentro del campo de visión con el que hacer las pruebas, que en este caso será de 10° .

Las funciones monopulso se calculan a partir de las siguientes expresiones:

- $f_{5152} = (dnorm_52 - dnorm_51) / (dnorm_51 + dnorm_52)$;
- $f_{5253} = (dnorm_53 - dnorm_52) / (dnorm_53 + dnorm_52)$;

Al representarlas podemos ver la forma que tienen gráficamente:

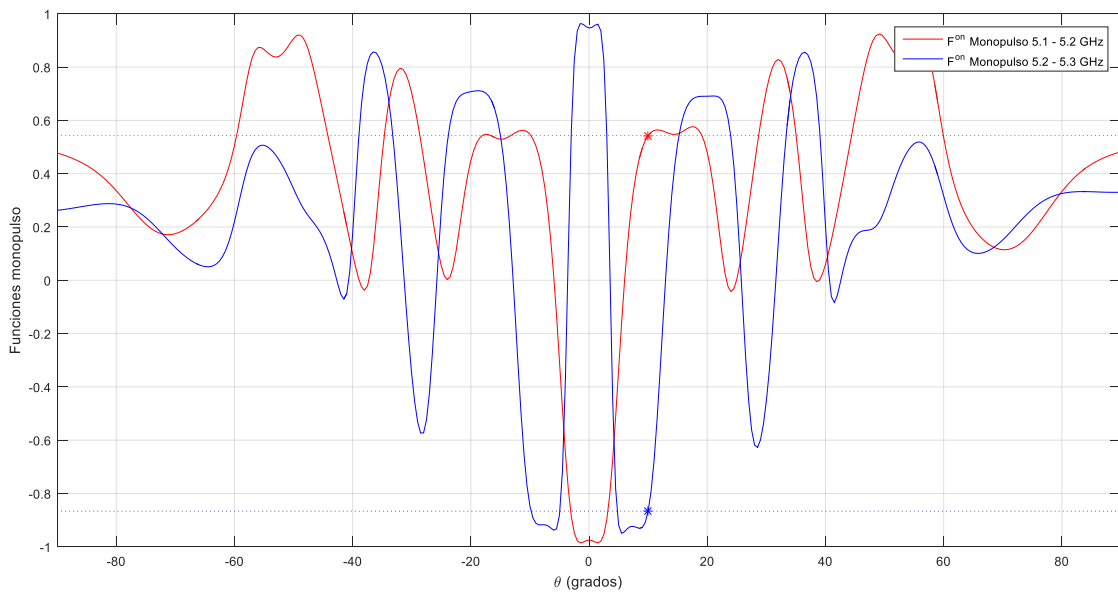


Ilustración 63 Funciones monopulso

Queda representado también con un asterisco el valor que toman las funciones monopulso en el DoA de 10° establecido anteriormente.

El FoV viene también determinado en las funciones monopulso, siendo la zona lineal de estas. Por tanto, siempre que el dron se sitúe dentro de esta zona lineal seremos capaces de obtener el ángulo θ en el que nos encontramos. Este FoV queda representado de forma gruesa en la siguiente gráfica:

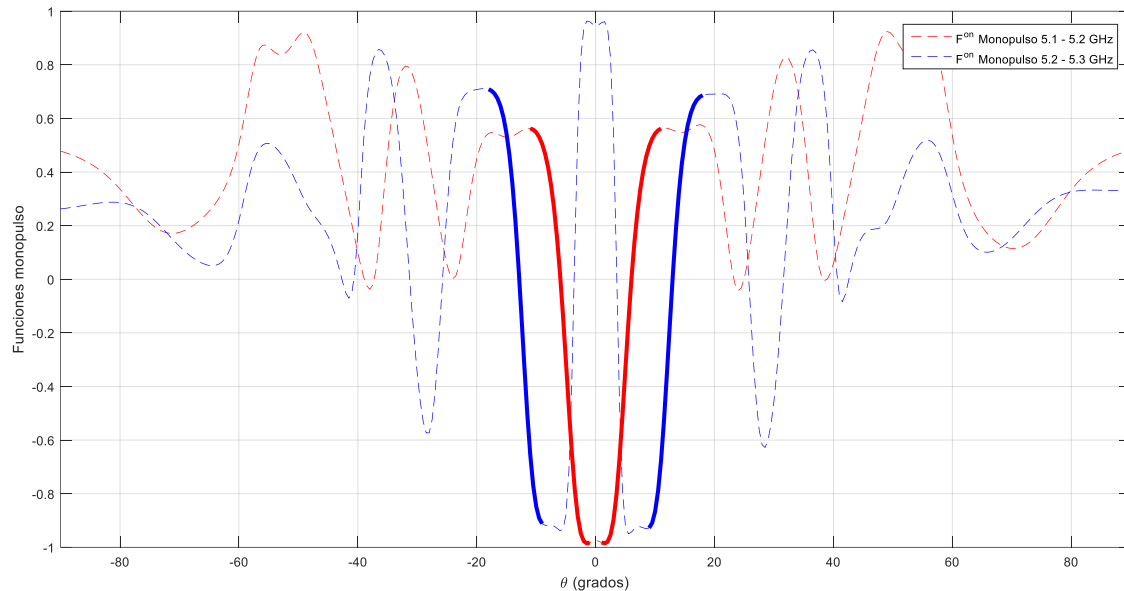


Ilustración 64 FoV (zona lineal) en las funciones monopulso

Podemos ver que el FoV es, como se comprobó en apartados anteriores, de 36° (desde -18° hasta +18°). Si nos salimos de esta zona lineal, la posición del dron que obtendríamos podría no ser correcta, por lo que es necesario que el dron se introduzca en el campo de visión para así poder aterrizar en el punto de interés. Interesa, por tanto, que este FoV sea lo más amplio posible.

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). Queda marcado este ángulo con una circunferencia roja en el pico más alto del pseudoespectro (representado en negro).

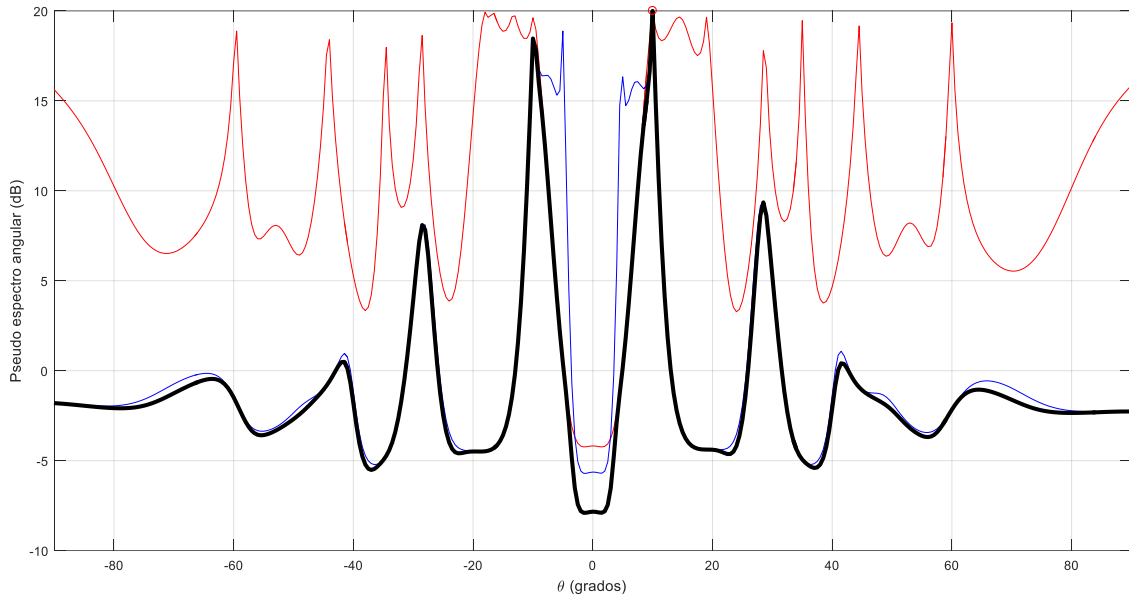


Ilustración 65 Pseudoespectro angular

5.1.2. Coordenadas tridimensionales θ - ϕ .

Los datos tratados en el apartado anterior podemos observarlos en coordenadas tridimensionales; y el sistema de coordenadas más directo es el θ - ϕ .

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

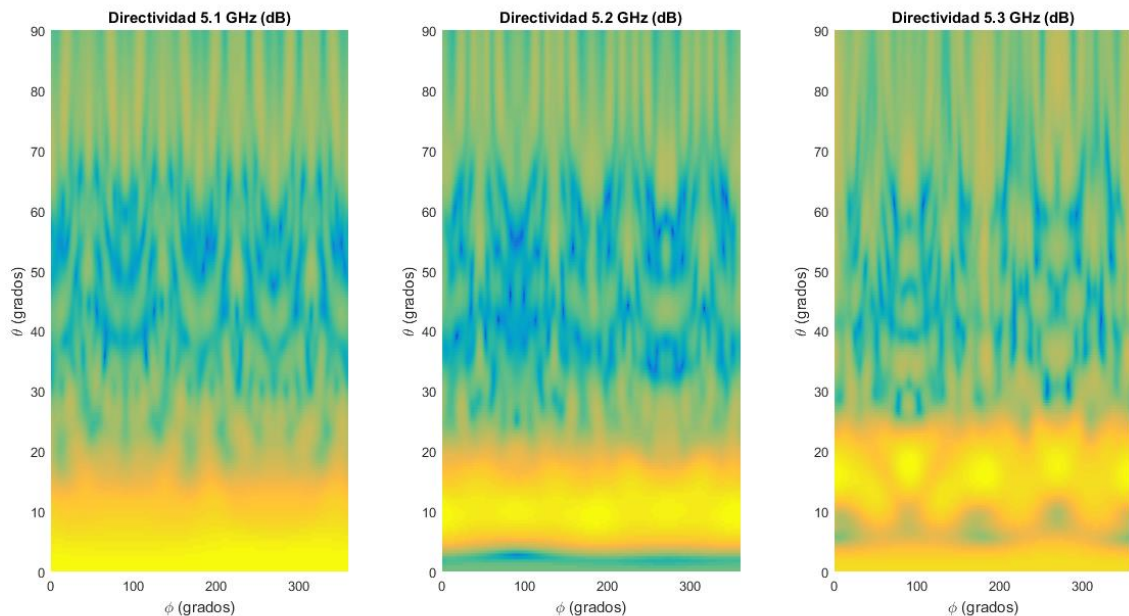


Ilustración 66 Directividades en coordenadas θ - ϕ

En el eje ordenadas podemos ver el valor de θ y en el eje de abscisas se encuentra la coordenada ϕ . El valor de la directividad para esas coordenadas se distingue mediante los diferentes colores, siendo el amarillo donde tenemos un valor más alto.

Este sistema de coordenadas no es del todo visual en el sentido de que no podemos apreciar bien la apertura cónica; y es por eso por lo que es conveniente recurrir al sistema de coordenadas u-v.

5.1.3. Transformación a coordenadas u-v.

Para convertir de coordenadas a coordenadas θ - ϕ u-v hay que hacer las siguientes operaciones:

- $U = \text{sen}(\theta) * \cos(\phi)$
- $V = \text{sen}(\theta) * \text{sen}(\phi)$

Cada posición θ - ϕ anterior se corresponderá con una posición u-v, con su valor de directividad correspondiente.

Al hacer la transformación a coordenadas u-v podemos tener como una vista de la directividad desde la parte superior de la antena, observando así de forma fácil la apertura cónica que se produce a medida que aumenta la frecuencia.

Por tanto, la directividad de los 3 canales que hemos representado en el apartado anterior quedaría de la siguiente forma:

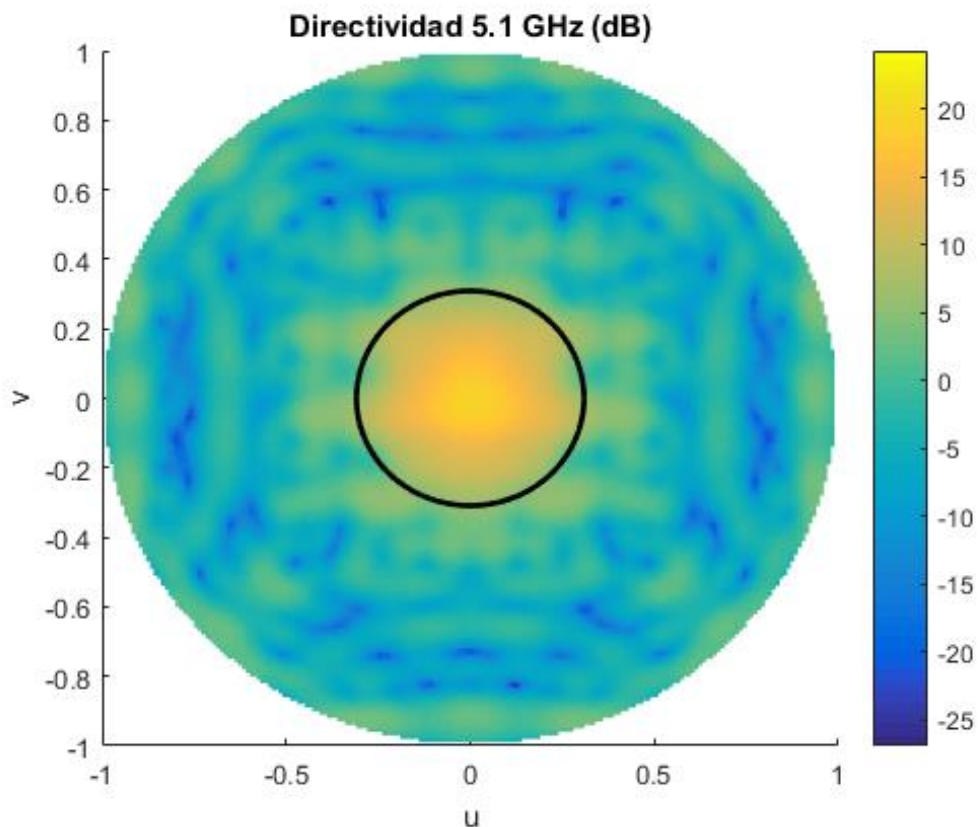


Ilustración 67 Directividad 5.1GHz en coordenadas u-v

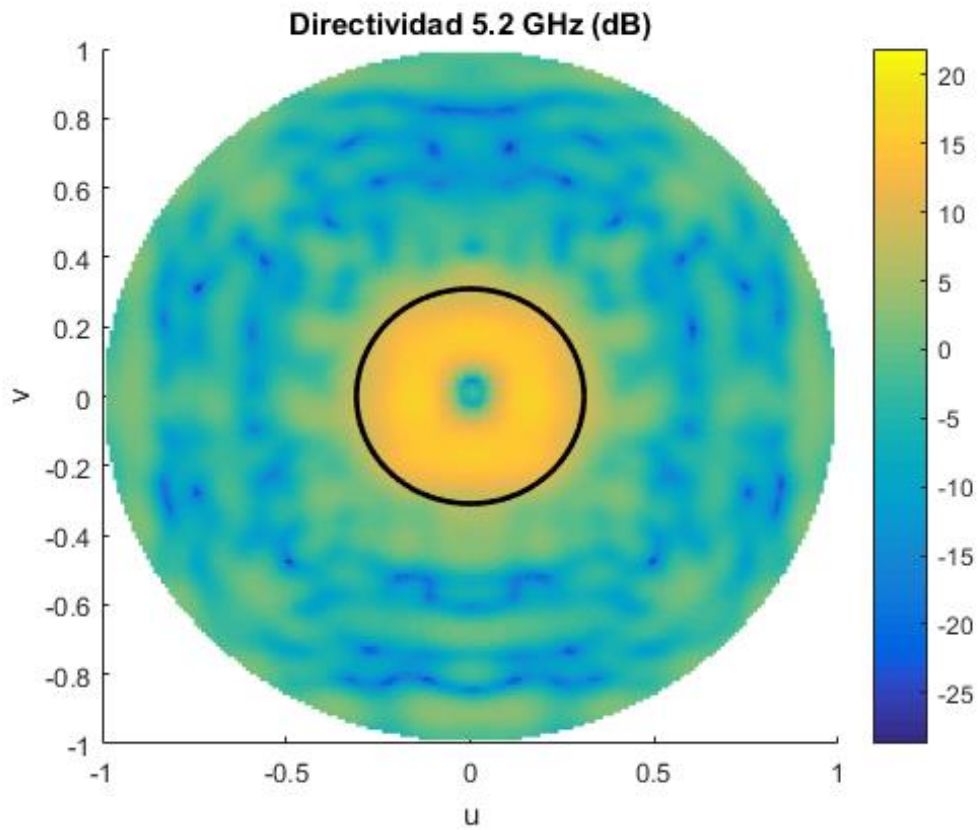


Ilustración 68 Directividad 5.2GHz en coordenadas u-v

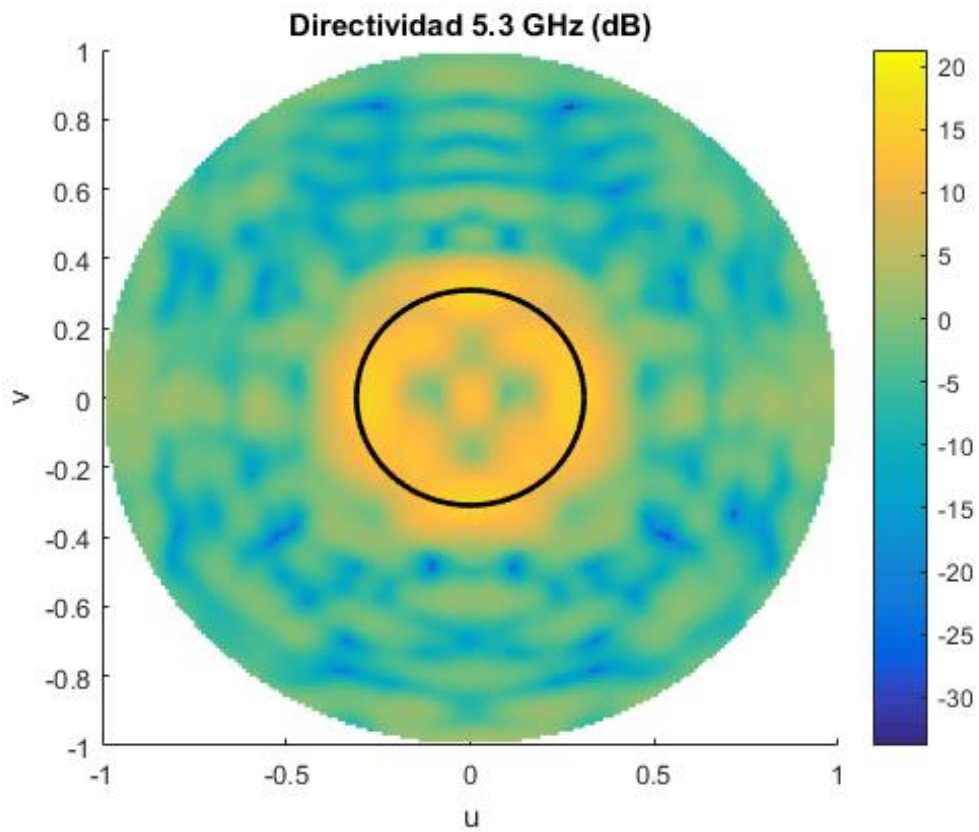


Ilustración 69 Directividad 5.3GHz en coordenadas u-v

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, es decir, respecto a la plataforma de aterrizaje.

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.

5.2. Ejemplo de posición del dron y cálculo del DoA.

Para empezar con una simulación en la que el dron está situado dentro del campo de visión, hay que darle una posición con unos ángulos θ y ϕ válidos. Como primer ejemplo para comprobar el buen funcionamiento voy a situar el dron en una posición de $\theta=10^\circ$ y $\phi=90^\circ$.

El ángulo $\theta=10^\circ$ es el DoA que escogimos en el apartado anterior en el que se formaron las funciones monopulso, y $\phi=90^\circ$ hace referencia a que estamos en el plano YZ. Aunque las funciones monopulso estén hechas a partir de la directividad en el plano XZ, el funcionamiento debería ser correcto al encontrarnos dentro del campo de visión.

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

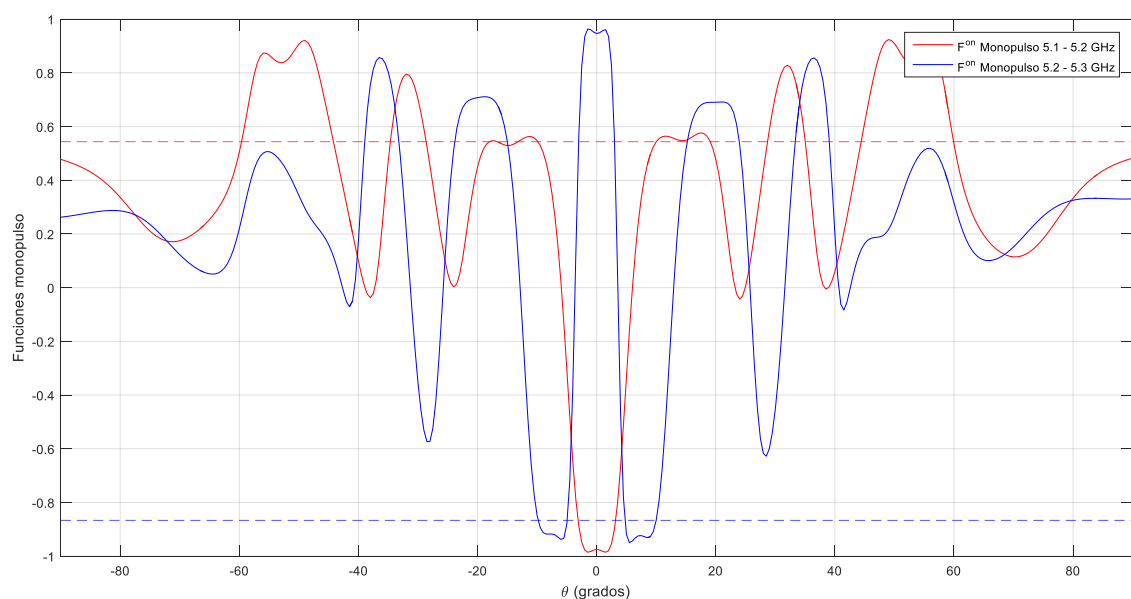


Ilustración 70 Comparación de los valores monopulso obtenidos en $\vartheta=10^\circ$ $\varphi=90^\circ$ con las funciones monopulso

En línea roja continua está representada la función monopulso 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 está representado en línea roja discontinua. 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 monopulso obtenidos en varios puntos de las funciones monopulso. Sin embargo, tenemos que fijarnos en el error mínimo (más próximo a 0) para un mismo ángulo θ en ambas funciones. Es decir, habrá que ver en cada valor de θ el error que tenemos entre cada valor monopulso y su respectiva función monopulso y ver en qué ángulo es menor; o lo que es lo mismo, en qué ángulo tenemos un valor del pseudoespectro más grande.

El pseudoespectro angular en este caso tiene la siguiente forma:

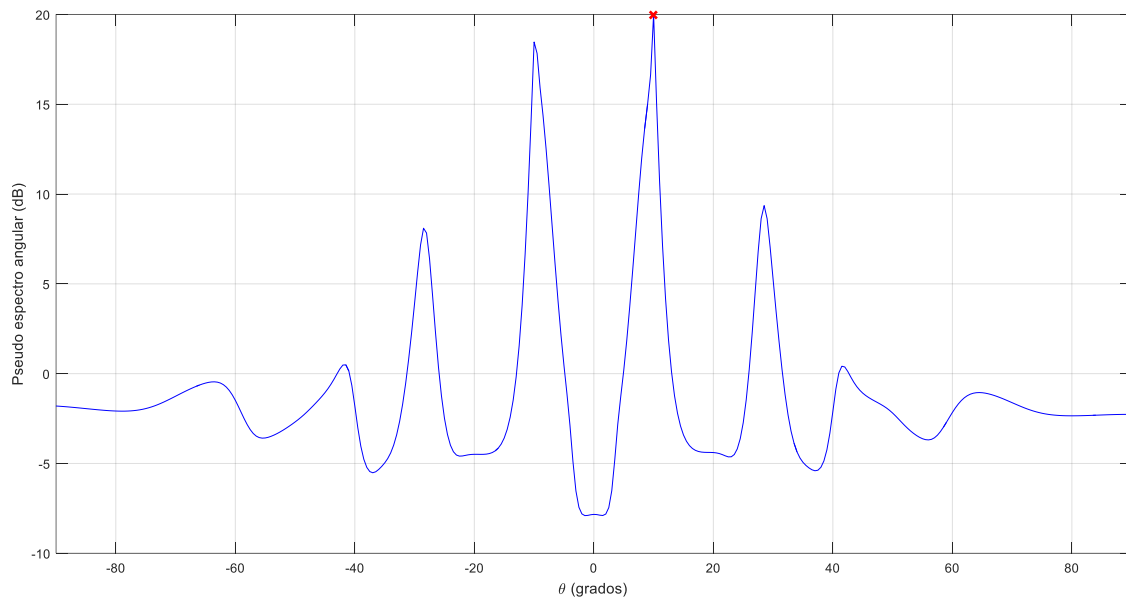


Ilustración 71 Pseudoespectro angular en $\vartheta=10^\circ$ $\varphi=90^\circ$

Podemos ver que el valor máximo está en $\theta=10^\circ$, por lo que se ha determinado la dirección de llegada del dron sin error alguno.

Además, lo que nos interesa realmente es el valor absoluto de θ , por lo que si hubiéramos obtenido un valor de $\theta=-10^\circ$ también hubiera sido correcto. Interesa el valor absoluto porque lo que queremos no es saber la posición exacta del dron, sino su dirección de llegada para que, después de varias iteraciones, el dron haya conseguido llegar a la posición de $\theta=0^\circ$ disminuyendo el valor absoluto del ángulo en el que se encuentre.

Las iteraciones consisten en, una vez detectada la posición actual, ir moviendo el dron de un punto a otro y ver si nos hemos acercado o alejado respecto al centro de la plataforma o antena. En el caso de acercarse el dron continuaría en esa dirección, mientras que si se aleja deberá cambiar la dirección hasta encontrar una en la que el valor absoluto del ángulo θ vaya disminuyendo.

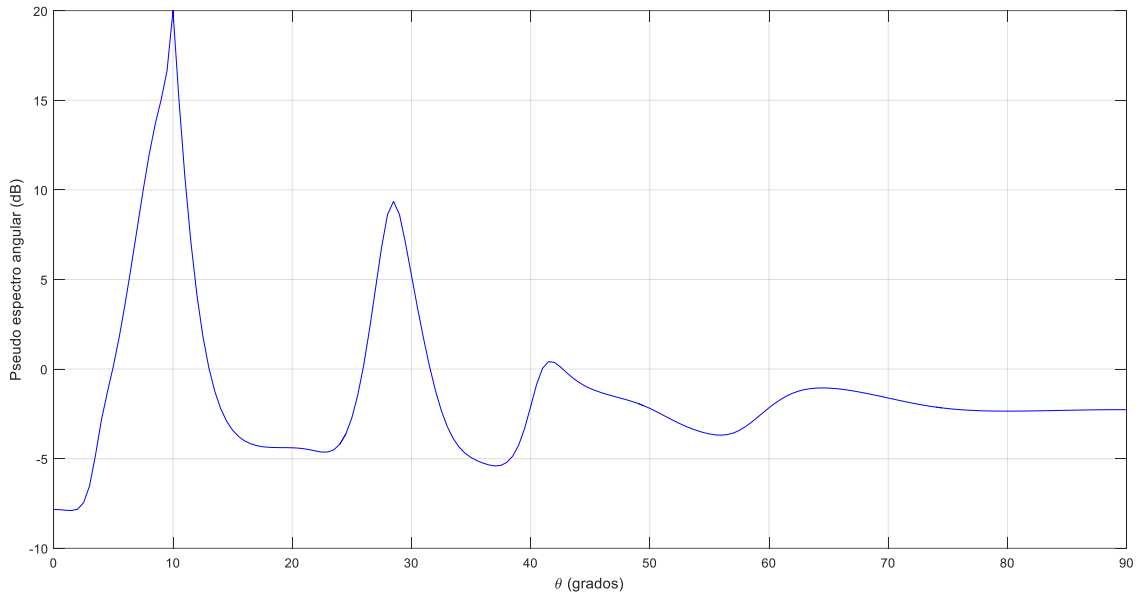


Ilustración 72 Pseudoespectro angular en $\vartheta=10^\circ$ $\varphi=90^\circ$ parte positiva

Podemos ver el significado de lo que hemos obtenido de forma más sencilla en los gráficos u-v:

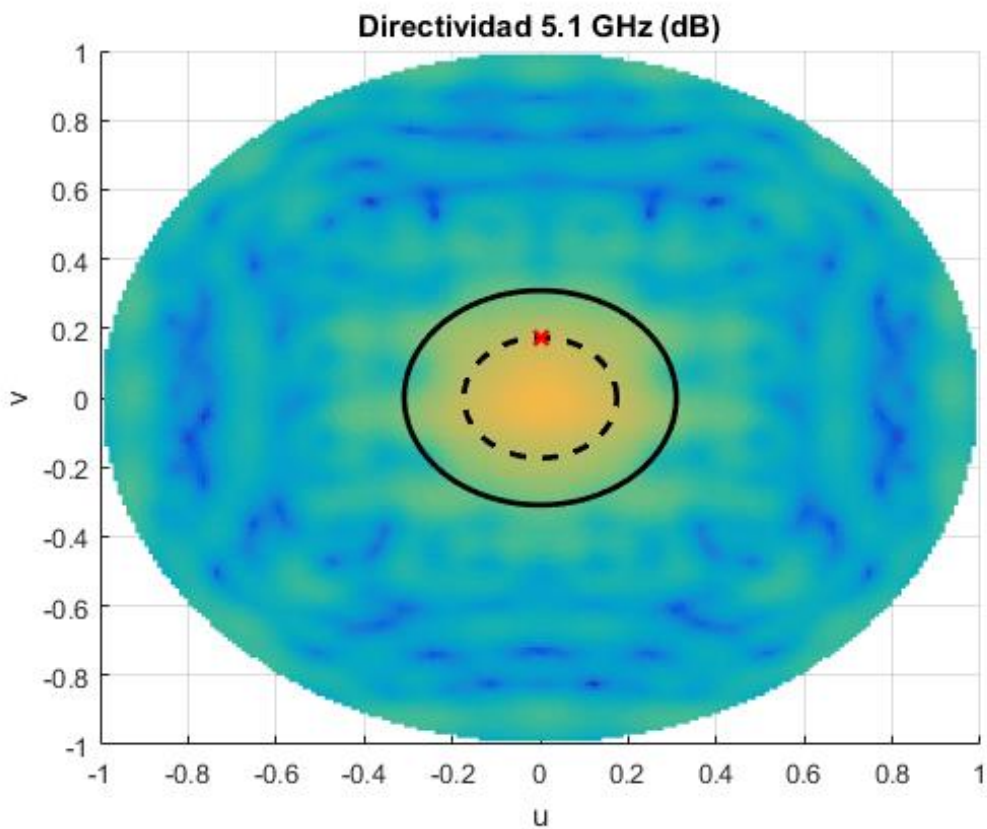


Ilustración 73 Posición del dron obtenida en coordenadas u-v, 5.1GHz

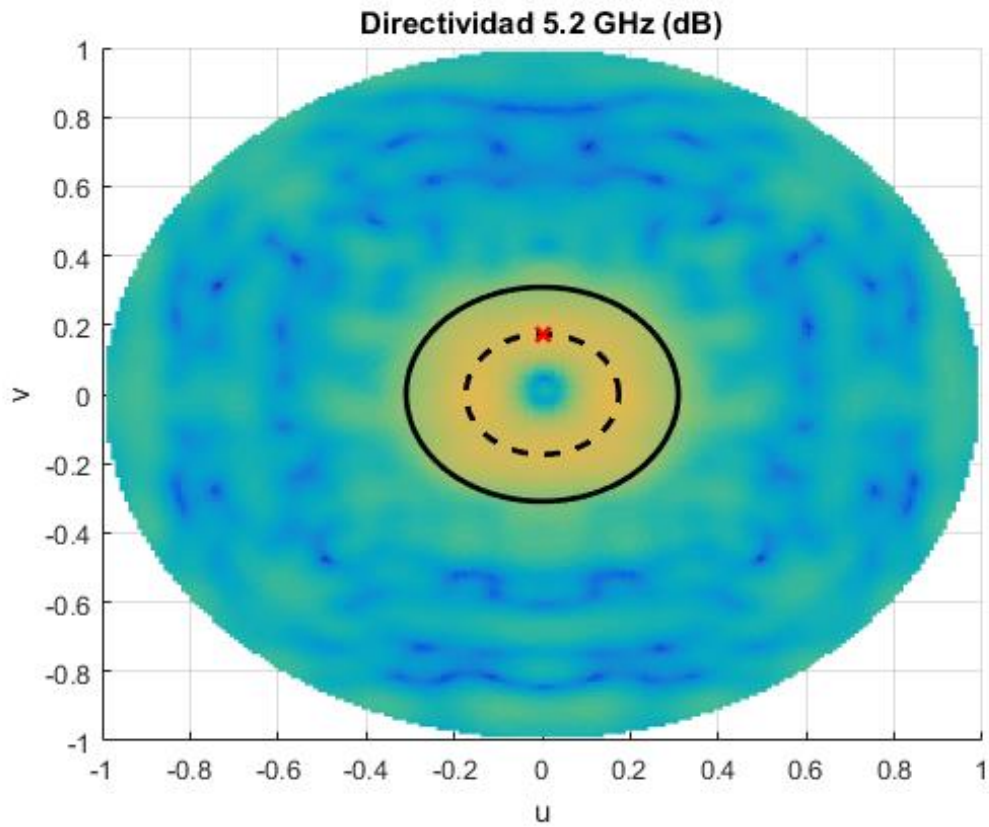


Ilustración 74 Posición del dron obtenida en coordenadas u-v, 5.2GHz

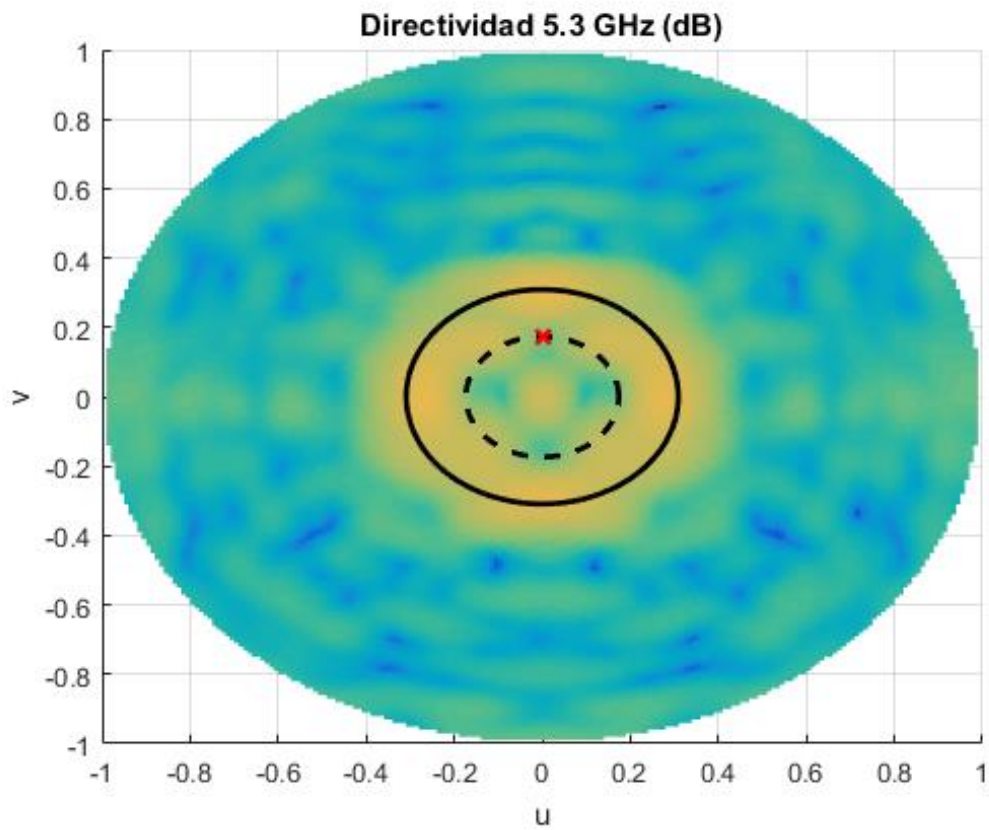


Ilustración 75 Posición del dron obtenida en coordenadas u-v, 5.3GHz

En estos gráficos:

- La línea negra continua representa el campo de visión o FoV.
- La cruz roja representa la posición del dron.
- La línea negra discontinua representa el DoA obtenido del dron.

Se puede ver que independientemente del ángulo ϕ en el que estuviera el dron, lo que hay que obtener es el ángulo θ . No nos interesa la posición exacta, sino lo lejos que está del centro de la antena.

El dron contaría también con un altímetro para conocer la altura a la que se encuentra, que junto con el ángulo θ obtenido será capaz de aterrizar en el punto correspondiente.

También podemos ver el pseudoespectro obtenido en coordenadas tridimensionales en el siguiente gráfico:

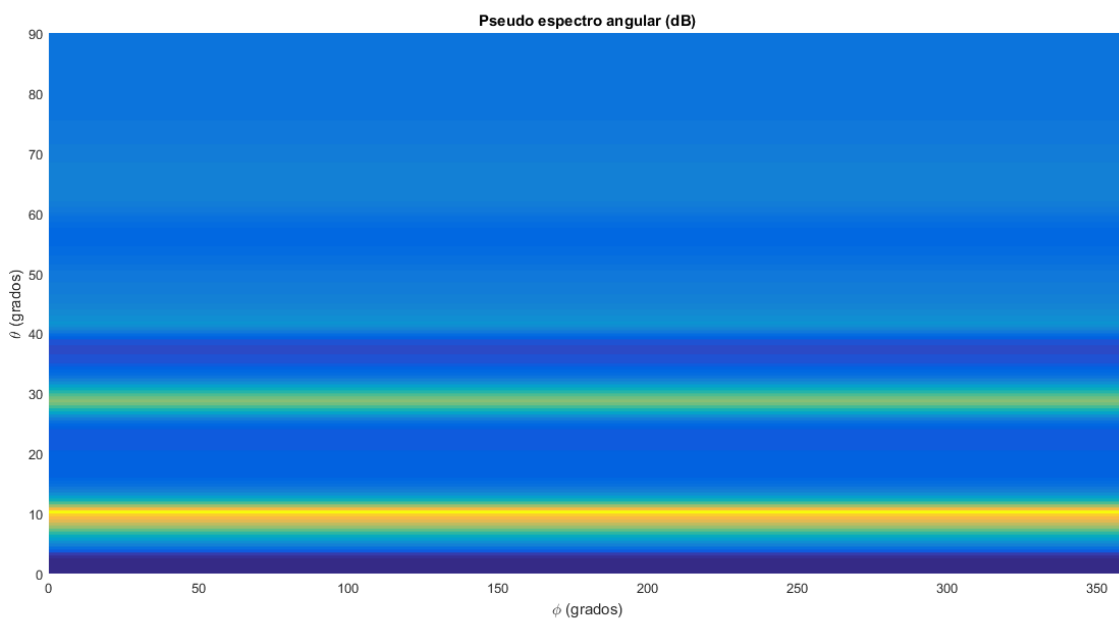


Ilustración 76 Pseudoespectro obtenido en coordenadas ϑ - ϕ cuando $\vartheta=10^\circ$ $\phi=90^\circ$

El valor más alto, representado en amarillo en este caso, se corresponde con la posición $\theta=10^\circ$ en la que estaba el dron.

Si hacemos la transformación a coordenadas u-v obtenemos lo siguiente:

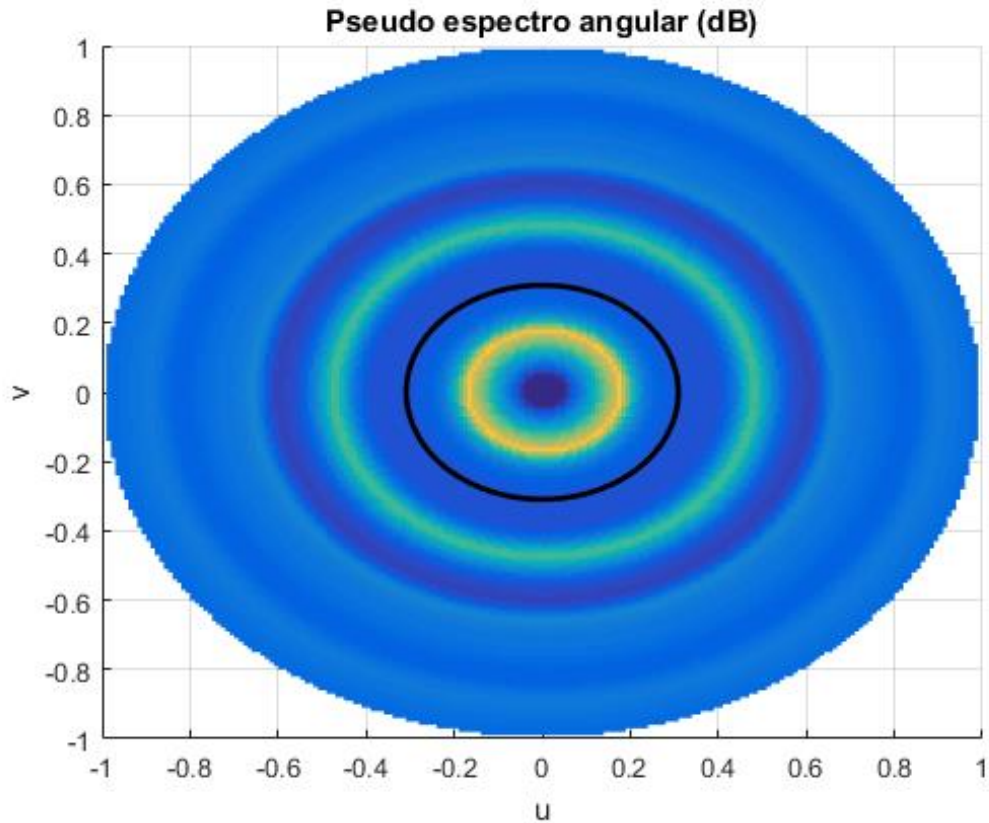


Ilustración 77 Pseudoespectro obtenido en coordenadas u-v cuando $\vartheta=10^\circ$ $\varphi=90^\circ$

La línea continua en negro representa, al igual que en los casos anteriores, el FoV. Se aprecia también claramente con la línea amarilla el ángulo θ que se ha obtenido en el que está situado el dron, que es el valor donde el pseudoespectro toma un valor mayor; o lo que es lo mismo, cuando el error en valor absoluto más se aproxima al valor nulo.

6. Análisis de resultados.

El sustituir una alimentación ideal por una real produce variaciones en los diagramas de radiación. Si nos fijamos en los planos XZ e YZ, podemos juntar en un mismo gráfico la directividad de los 3 canales (5.1GHz, 5.2GHz y 5.3GHz) antes y después de implementar la alimentación real.

Si observamos primero el plano XZ y luego también el plano YZ vemos lo siguiente:

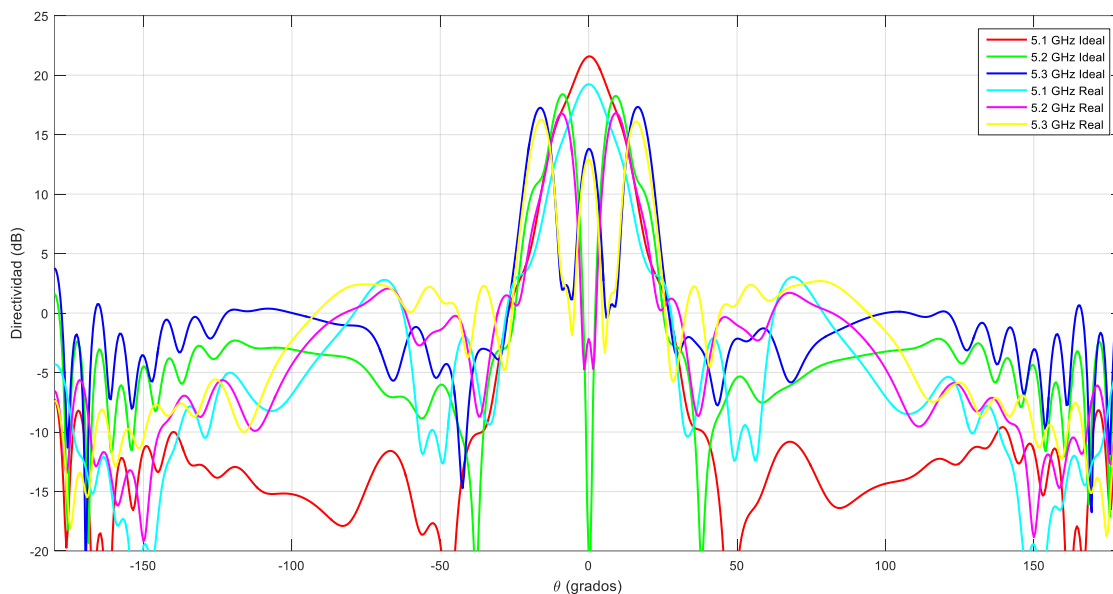


Ilustración 78 Comparativa de directividad plano XZ antes y después de implementar la alimentación

	Alimentación real	Alimentación ideal
Frecuencia 5.1GHz	19.24 dB	21.58 dB
Frecuencia 5.2GHz	16.81 dB	18.39 dB
Frecuencia 5.3GHz	16.27 dB	17.34 dB

Ilustración 79 Directividad en función del canal y del tipo de alimentación, plano XZ

En la tabla mostrada podemos ver el valor máximo de directividad en función del canal y del tipo de alimentación en el plano XZ.

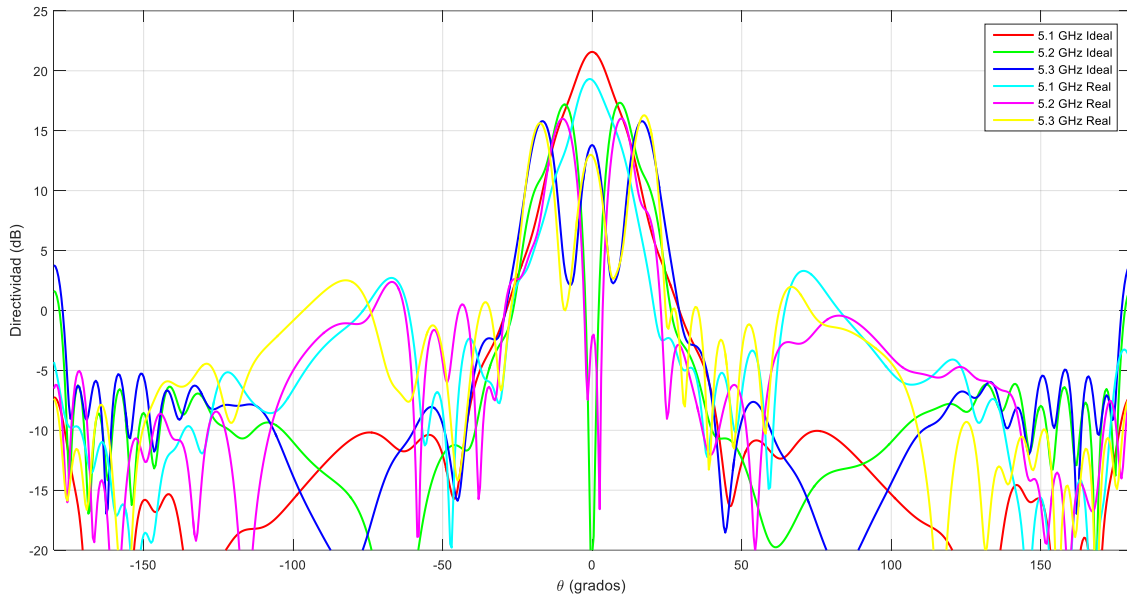


Ilustración 80 Comparativa de directividad plano YZ antes y después de implementar la alimentación

	Alimentación real	Alimentación ideal
Frecuencia 5.1GHz	19.24 dB	21.58 dB
Frecuencia 5.2GHz	15.89 dB	17.33 dB
Frecuencia 5.3GHz	16.26 dB	15.78 dB

Ilustración 81 Directividad en función del canal y del tipo de alimentación, plano YZ

Al igual que con el plano XZ, en la tabla anterior podemos ver también el valor máximo de directividad en función de la frecuencia y del tipo de alimentación, pero ahora con el plano YZ.

Vemos que la apertura del haz de potencia es prácticamente la misma antes y después en ambos planos, y que la única variación está en la diferencia entre el nivel máximo de potencia de los canales entre sí. Eso es indiferente, ya que nosotros al final vamos a trabajar con diagramas normalizados.

Si nos fijamos en los mismos diagramas, pero ahora normalizados, podremos observar que no hay apenas diferencia entre lo que teníamos antes de implementar la alimentación y después:

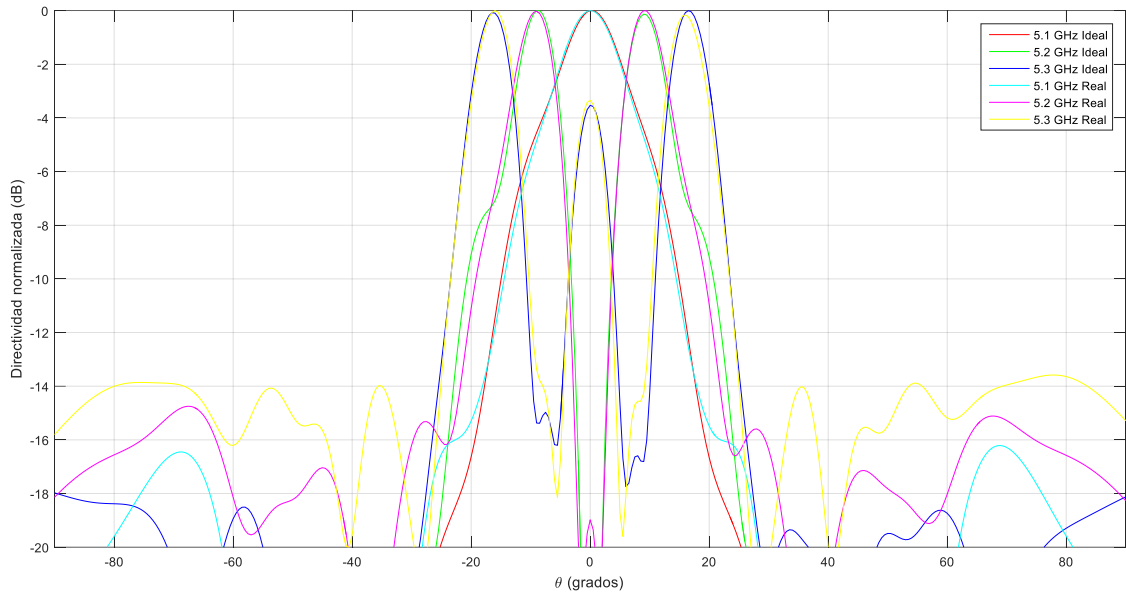


Ilustración 82 Comparativa de directividad normalizada plano XZ antes y después de implementar la alimentación

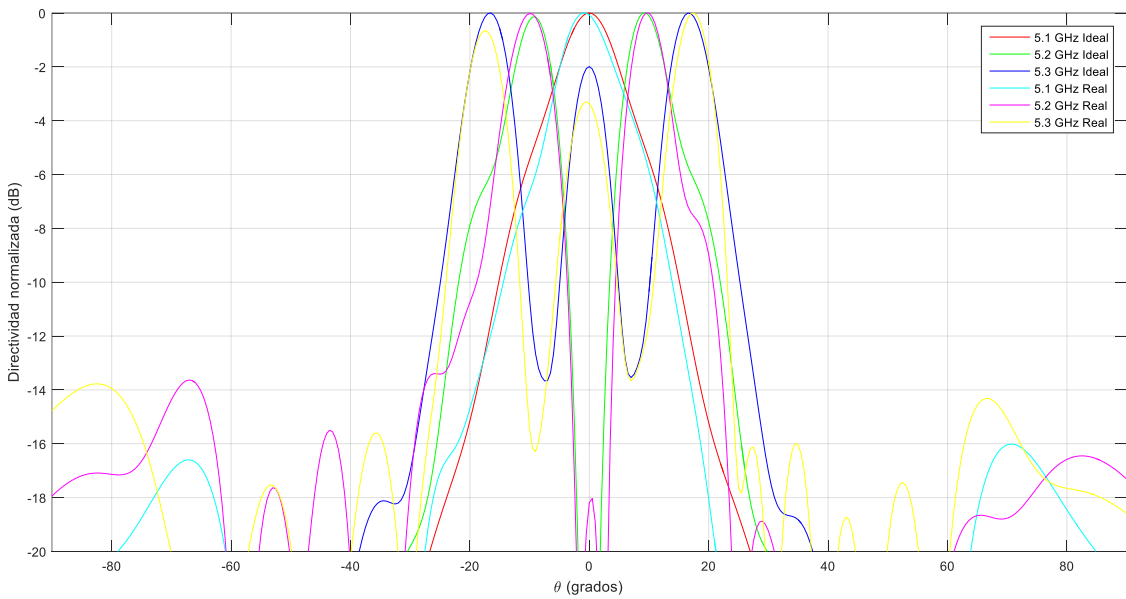


Ilustración 83 Comparativa de directividad normalizada plano YZ antes y después de implementar la alimentación

La diferencia es mínima, especialmente en el plano XZ, pero vamos a ver en los siguientes apartados diferentes ejemplos en función de la posición del dron para comprobar que el funcionamiento es correcto tanto antes como después de implementar la alimentación.

Las funciones monopulso, en nuestro caso, se harán con el plano XZ. Podemos comparar también numéricamente los valores máximos de potencia en los casos de alimentación ideal y real en las siguientes gráficas:

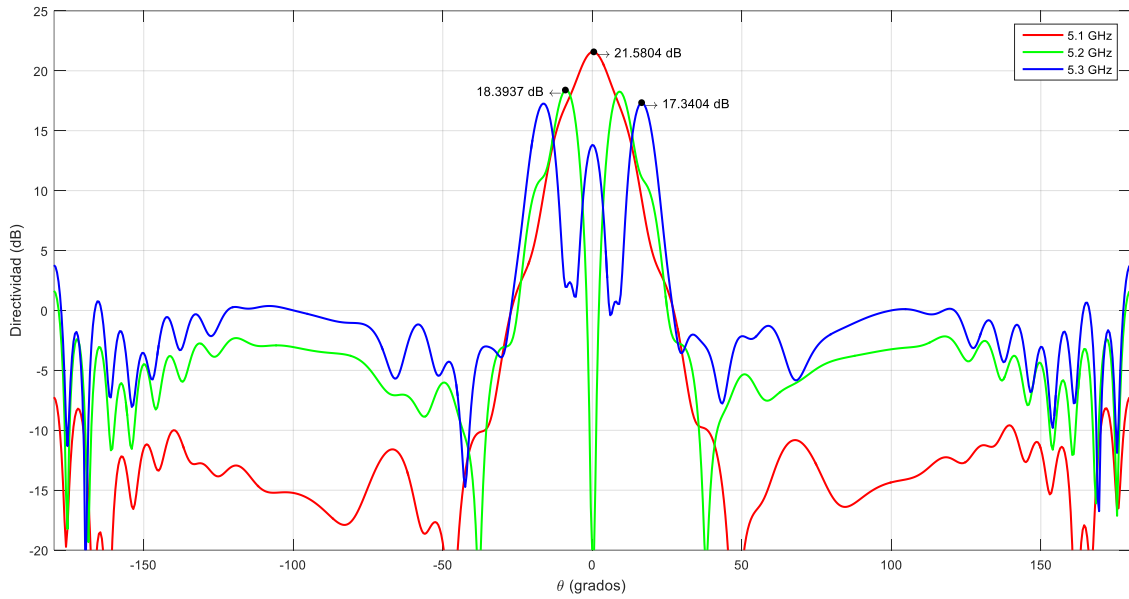


Ilustración 84 Directividad plano XZ con alimentación ideal

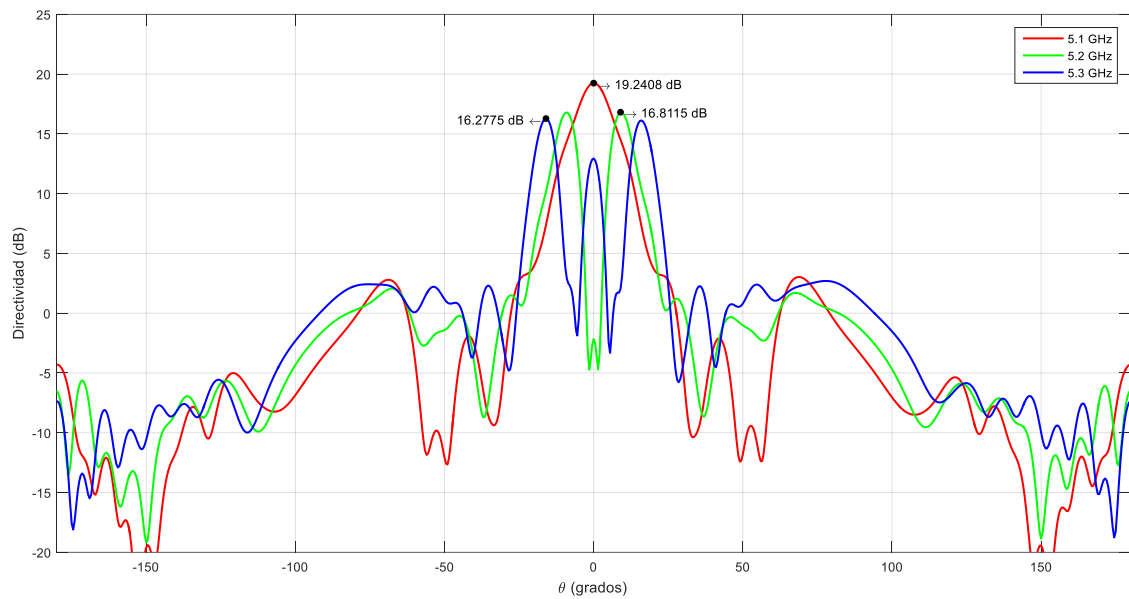


Ilustración 85 Directividad plano XZ con alimentación real

Se observa como los valores de máxima potencia han disminuido.

También podemos comparar el ángulo de máxima radiación de los 3 canales que tenemos ahora con el que teníamos antes. En las gráficas mostradas anteriormente se ve que es prácticamente igual, y en las siguientes ilustraciones podemos volver a comprobarlo:

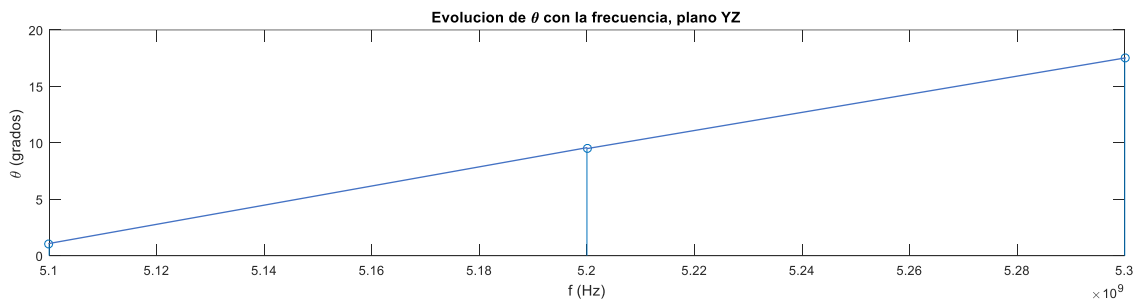
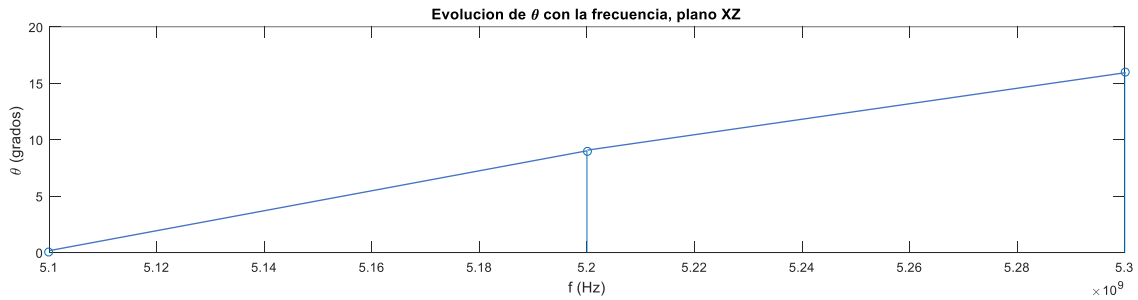


Ilustración 86 Evolución del ángulo de máxima radiación con la frecuencia, alimentación ideal

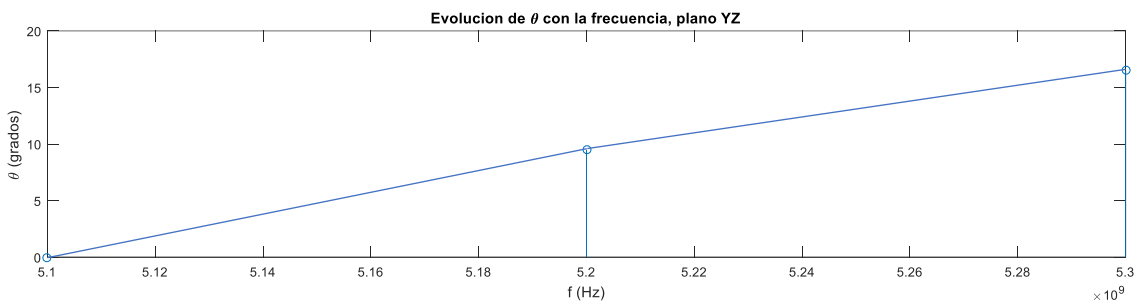
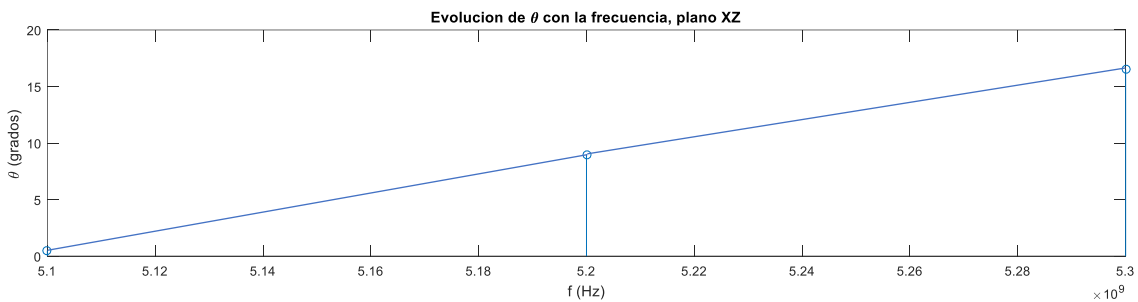


Ilustración 87 Evolución del ángulo de máxima radiación con la frecuencia, alimentación real

Vamos a ver ahora diferentes ejemplos concretos, situando el dron dentro y fuera del FoV, para ver la posición que se obtendría con alimentación ideal y real.

6.1. Caso 1.

Primero vamos a estudiar el caso en el que estamos en $\phi=0^\circ$ (plano XZ con el que se han hecho las funciones monopolso) y dentro del FoV, donde vamos a escoger un ángulo de $\theta=10^\circ$. El error esperado debe ser nulo tanto en el caso de alimentación ideal como en el caso de alimentación real.

Primero vamos a fijarnos en el caso de la alimentación real, es decir, en la antena final. Tenemos los siguientes resultados:

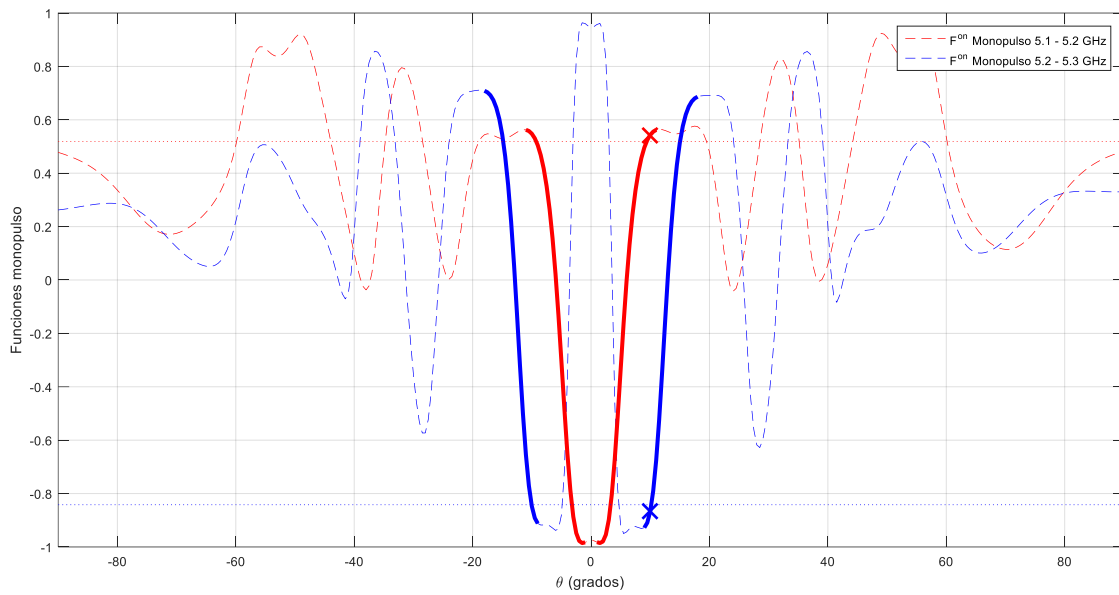


Ilustración 88 Funciones y valores monopulso caso 1, alimentación real

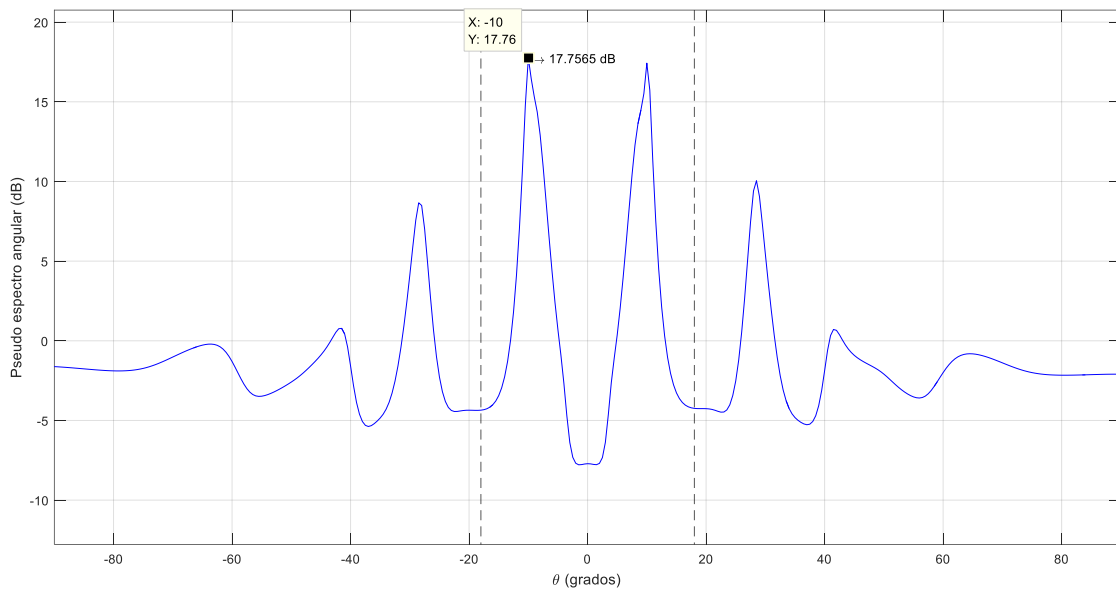


Ilustración 89 Pseudoespectro angular 2D caso 1, alimentación real

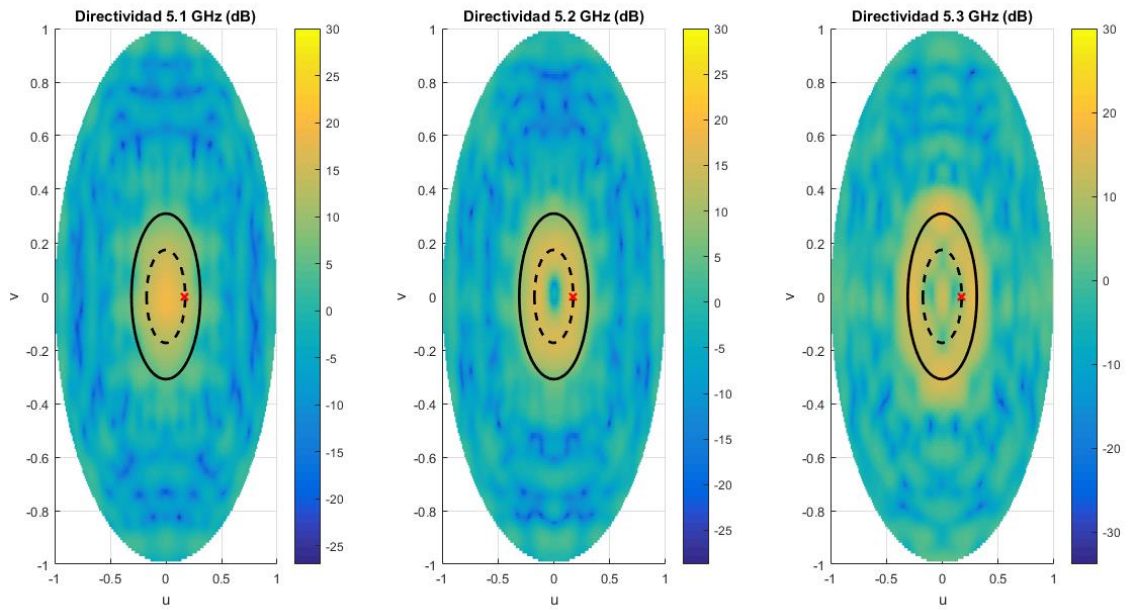


Ilustración 90 Diagramas u-v caso 1, alimentación real

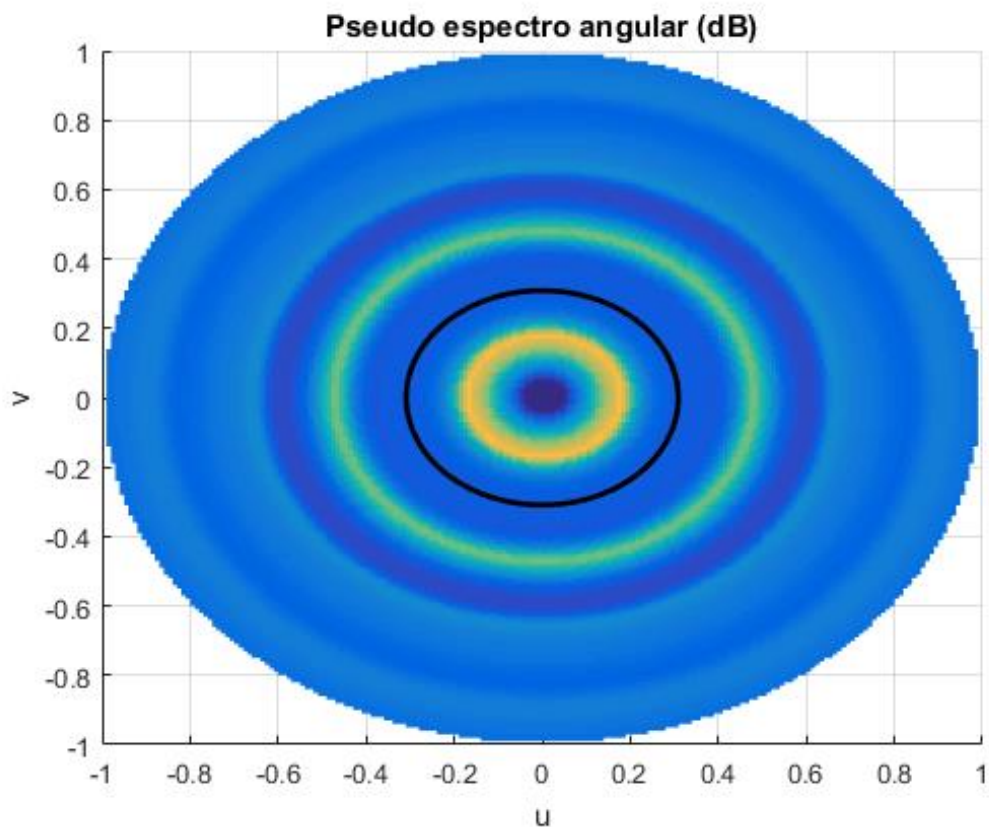


Ilustración 91 Pseudoespectro angular 3D caso 1, alimentación real

Se puede ver que la posición obtenida es $\theta = -10^\circ$, que nos quedamos con $\theta = 10^\circ$ ya que nos interesa el valor absoluto. Por lo tanto, el error es 0° .

Si vamos ahora al caso de alimentación ideal:

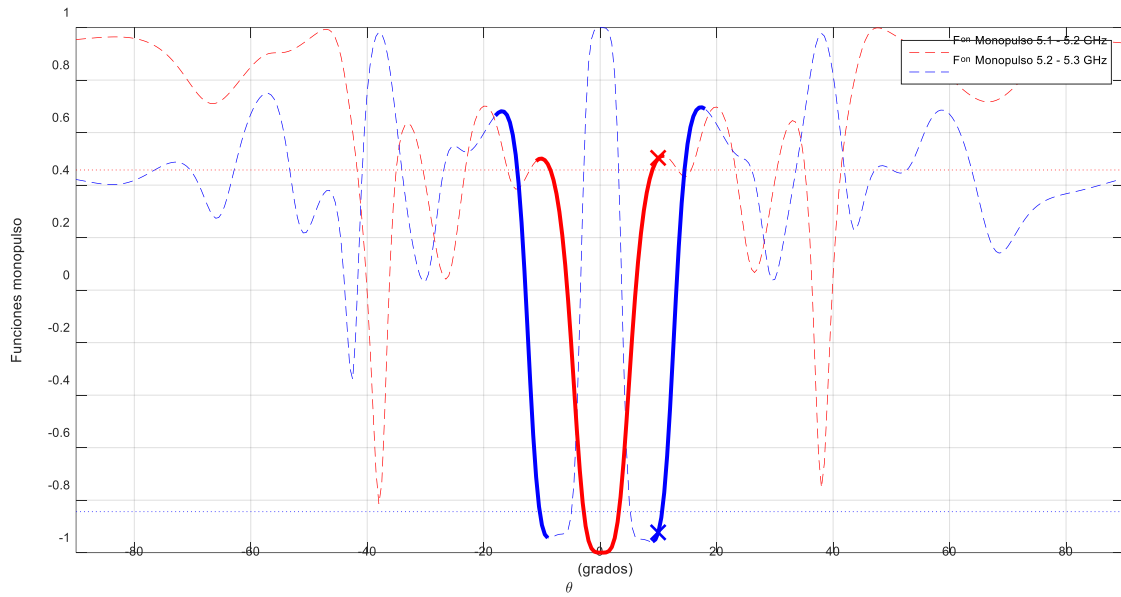


Ilustración 92 Funciones y valores monopulso caso 1, alimentación ideal

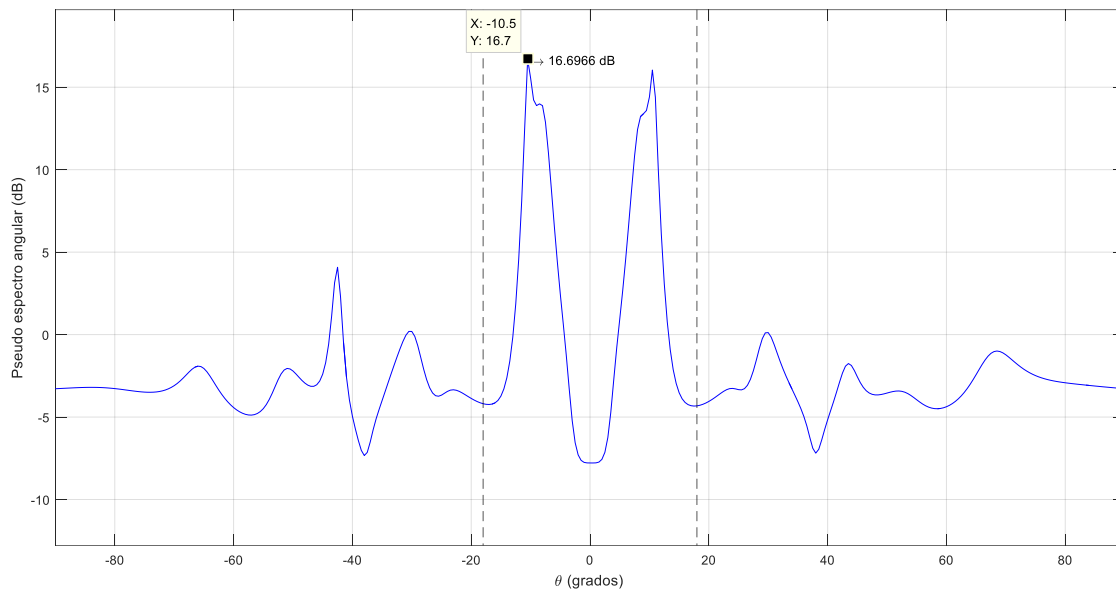


Ilustración 93 Pseudoespectro angular 2D caso 1, alimentación ideal

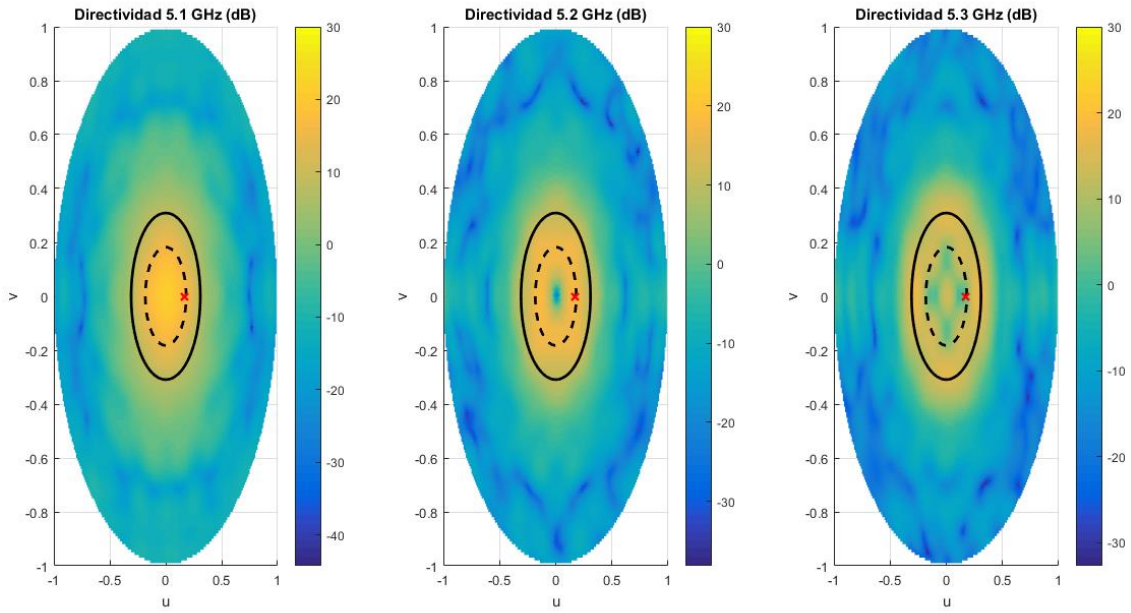


Ilustración 94 Diagramas u-v caso 1, alimentación ideal

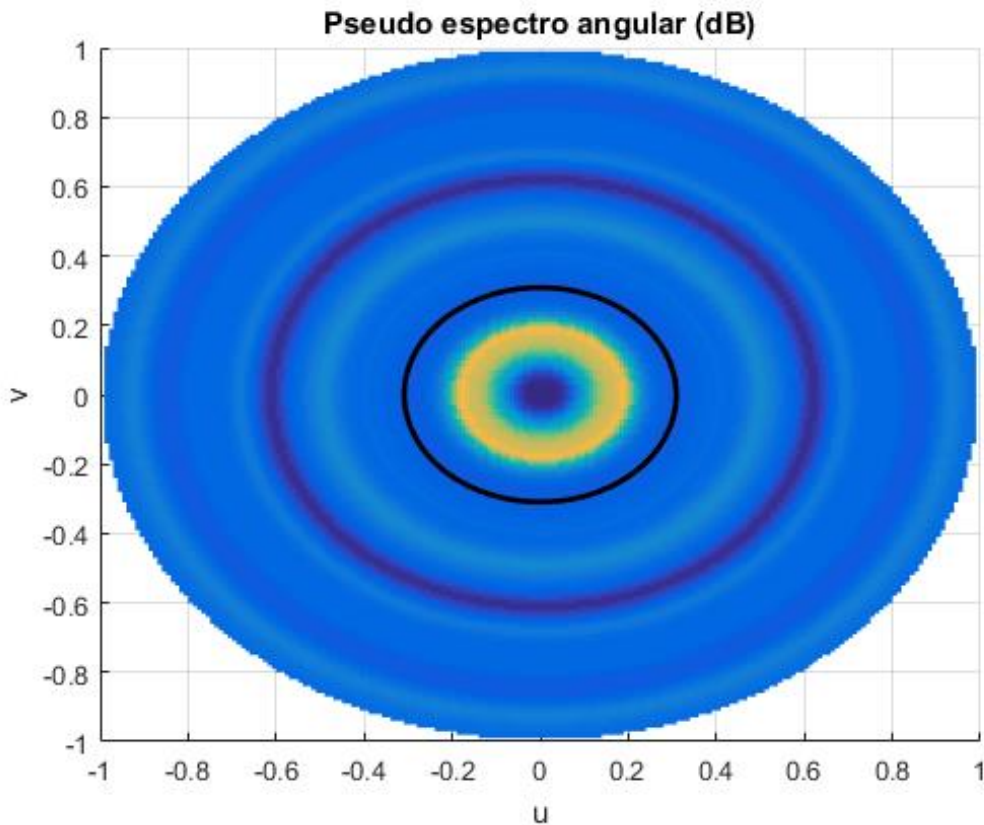


Ilustración 95 Pseudoespectro angular 3D caso 1, alimentación ideal

En este caso la posición obtenida es $\theta = -10.5^\circ$, que como nos interesa el valor absoluto el resultado final es $\theta = 10.5^\circ$. Vemos que ahora hay un error de 0.5° , pero es debido a las operaciones en Matlab relacionadas con la conversión $\theta\phi$ -uv (y viceversa) y al número de decimales y redondeos de las operaciones.

Por lo tanto, podemos concluir que el error es nulo en ambos casos. Esto es lo que esperábamos teóricamente, ya que estamos dentro del FoV y además estamos situados en el plano con el que se han formado las funciones monopulso.

6.2. Caso 2.

Ahora vamos a estudiar el caso en el que estamos en $\phi=0^\circ$ (plano XZ con el que se han hecho las funciones monopulso) pero fuera del FoV, donde vamos a escoger un ángulo de $\theta=21^\circ$. El error esperado debe ser similar tanto en el caso de alimentación ideal como en el caso de alimentación real.

Primero vamos a fijarnos en el caso de la alimentación real, donde tenemos los siguientes resultados:

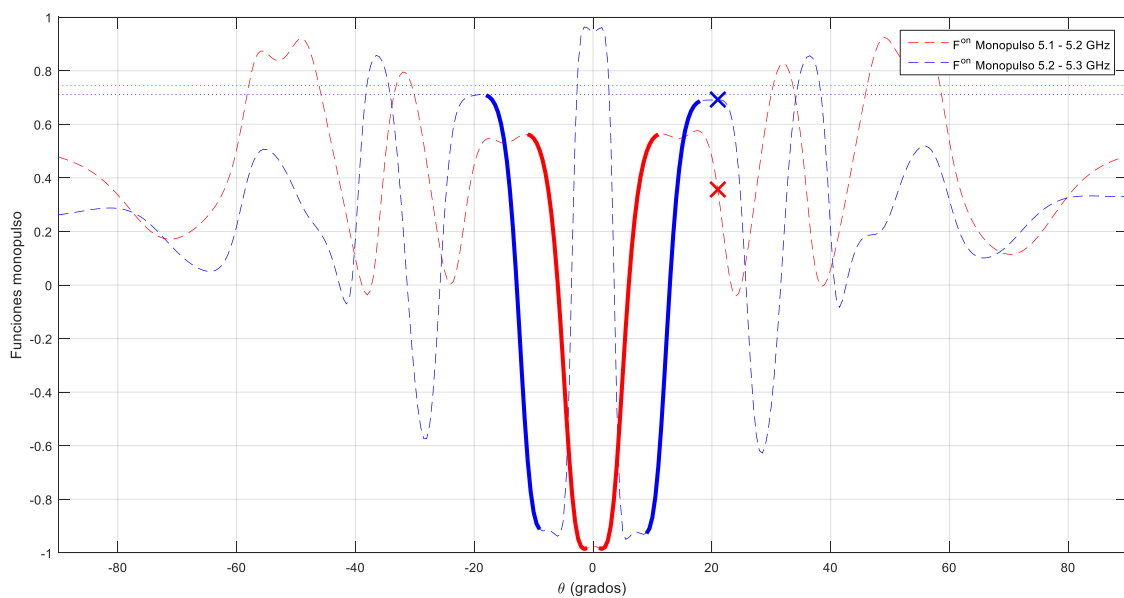


Ilustración 96 Funciones y valores monopulso caso 2, alimentación real

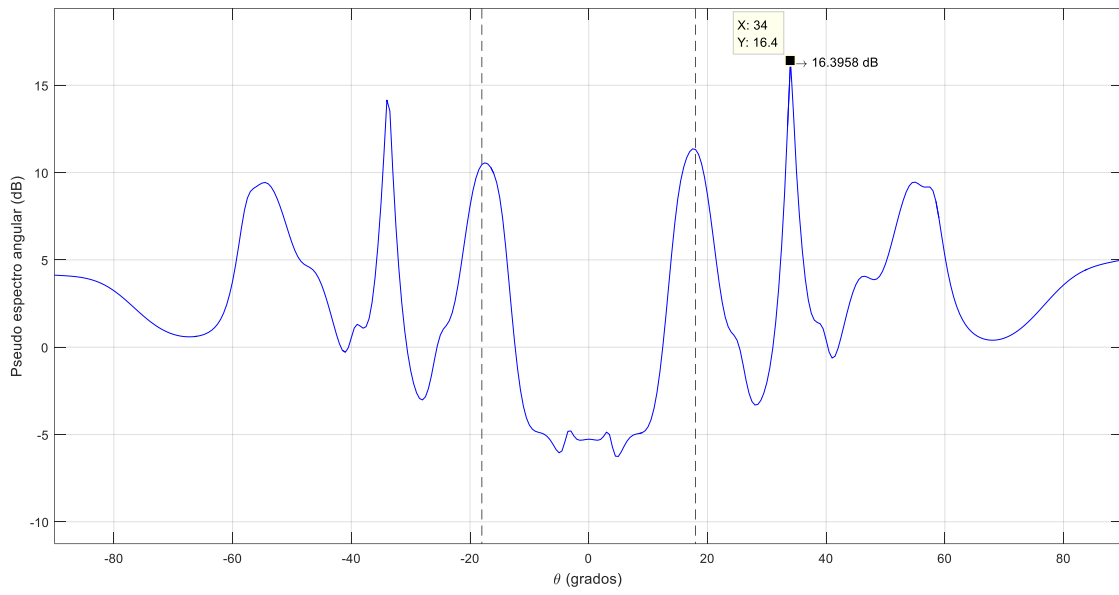


Ilustración 97 Pseudoespectro angular 2D caso 2, alimentación real

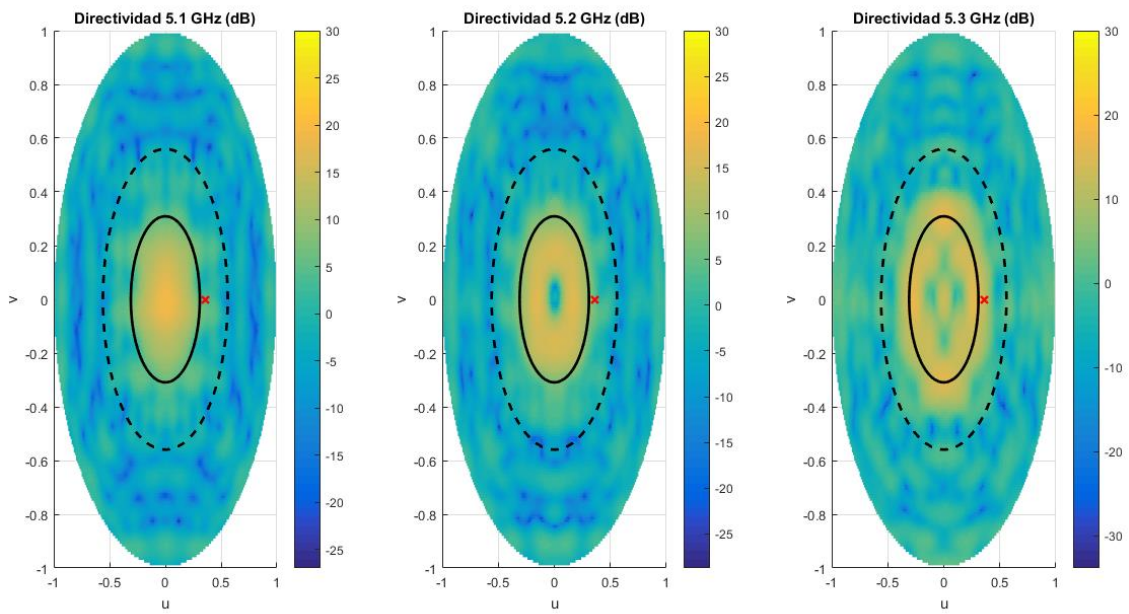


Ilustración 98 Diagramas u-v caso 2, alimentación real

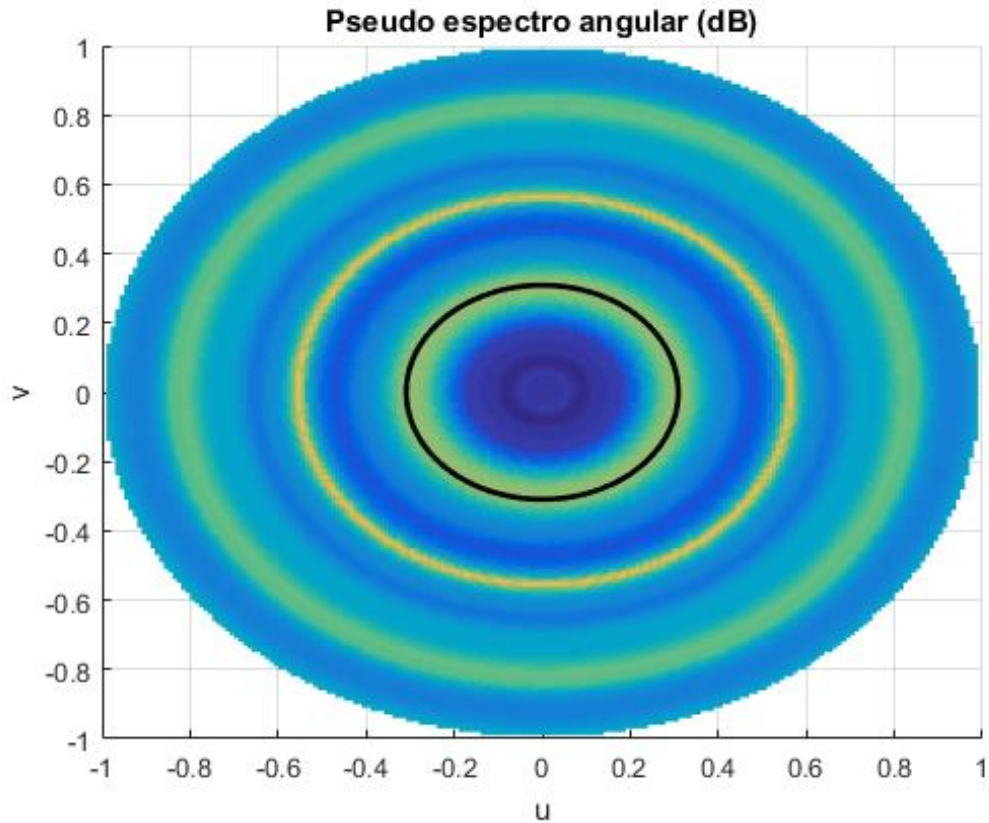


Ilustración 99 Pseudoespectro angular 3D caso 2, alimentación real

Al estar fuera del FoV es normal que el ángulo θ obtenido no sea el correcto. En este caso concreto se ha detectado un $\theta=34^\circ$, por lo que tenemos un error de 13° . Hay que ver si en el caso de tener alimentación ideal el error es similar, ya que teóricamente debería serlo al haber usado estar en el plano XZ (plano con el que hemos formado las funciones monopulso) y estar fuera del FoV:

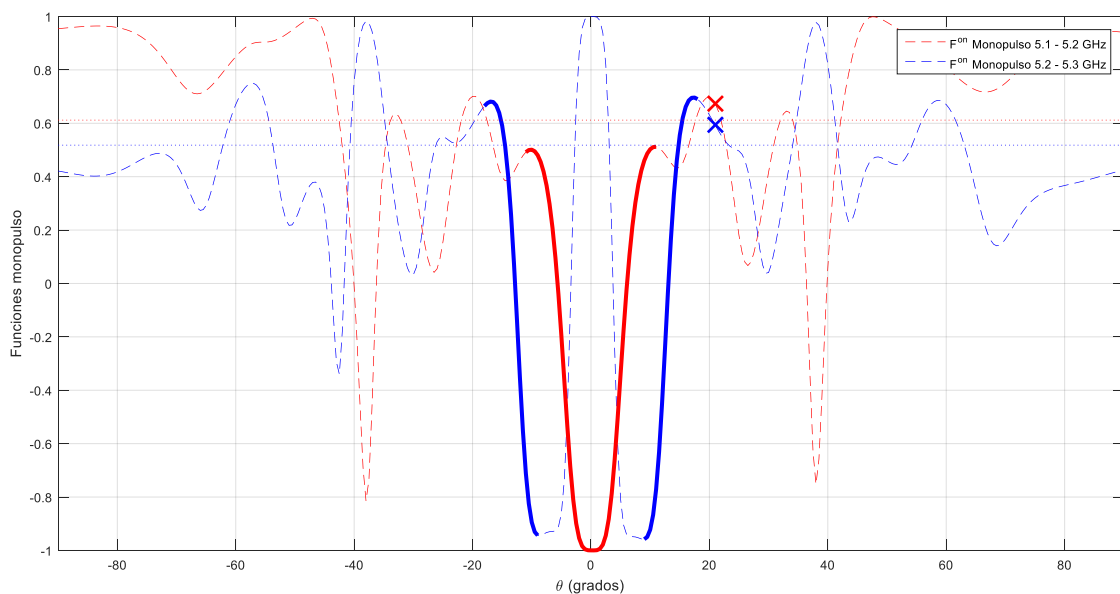


Ilustración 100 Funciones y valores monopulso caso 2, alimentación ideal

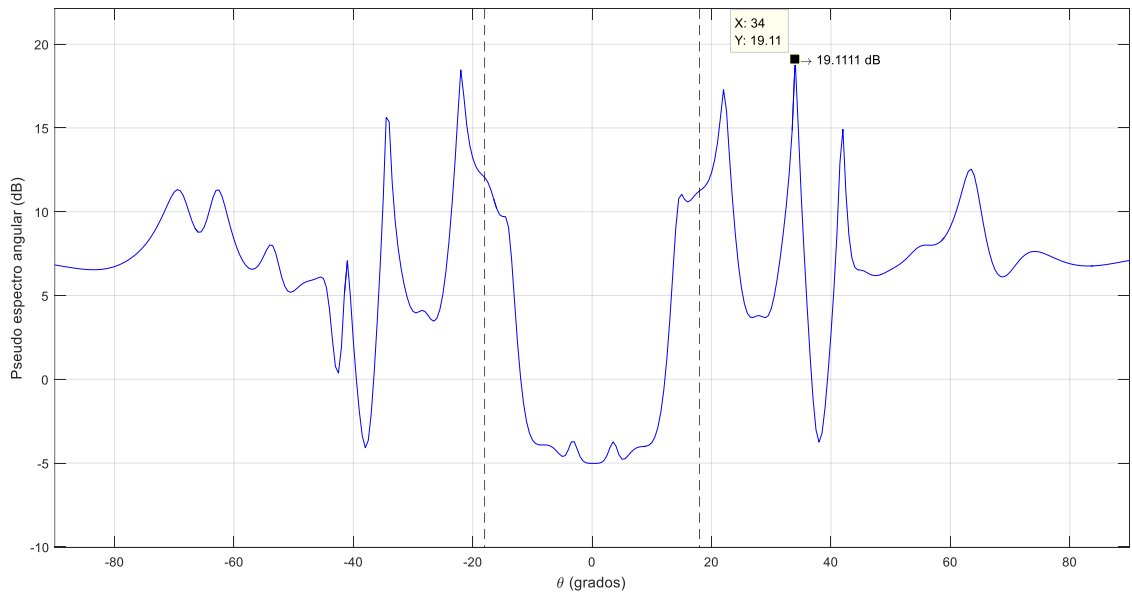


Ilustración 101 Pseudoespectro angular 2D caso 2, alimentación ideal

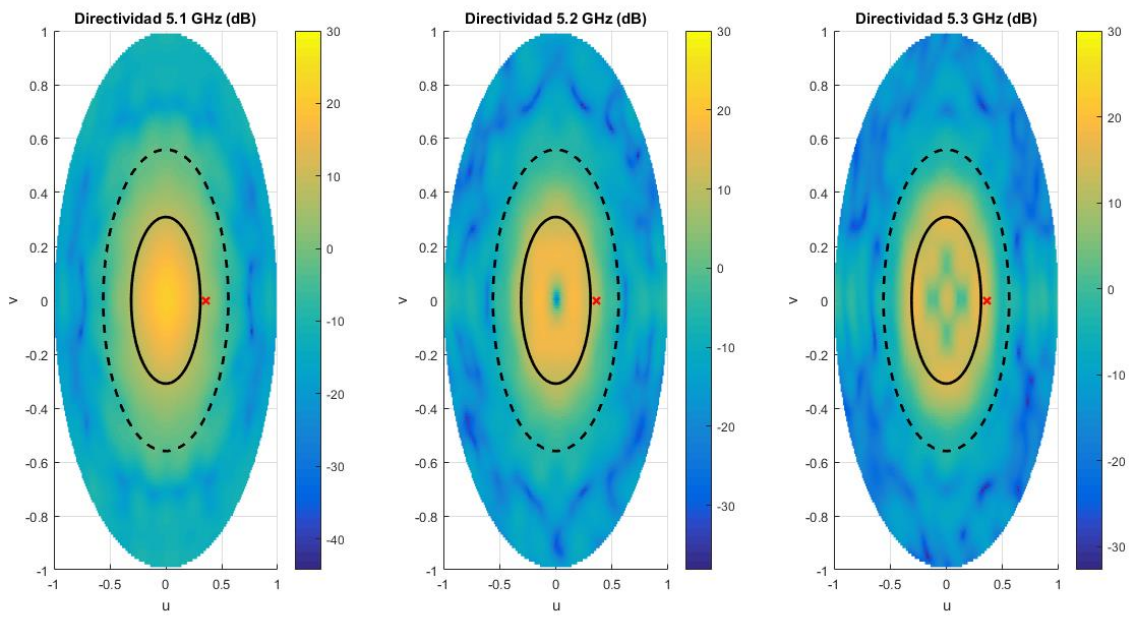


Ilustración 102 Diagramas u-v caso 2, alimentación ideal

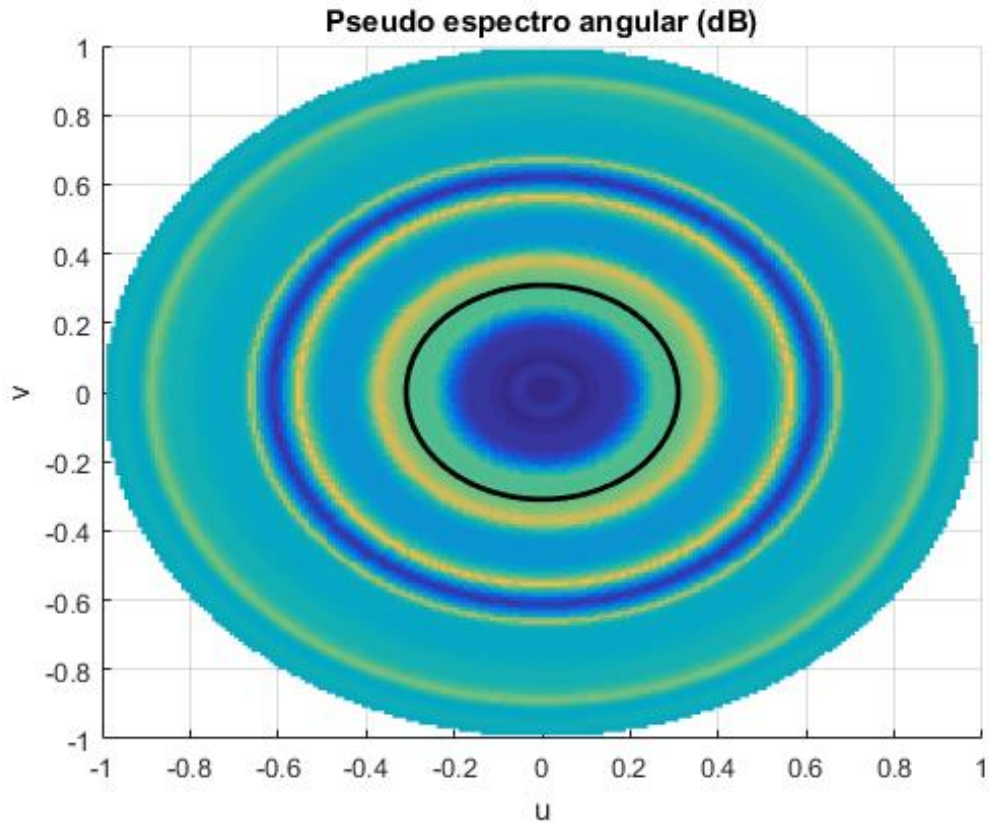


Ilustración 103 Pseudoespectro angular 3D caso 2, alimentación ideal

Con alimentación ideal se ha detectado también un $\theta=34^\circ$, por lo que el error es exactamente el mismo como se suponía teóricamente.

6.3. Caso 3.

En el tercer caso vamos a ver que dentro del FOV pero fuera de los planos XZ e YZ el error esperado debe ser mayor para el caso de alimentación real, ya que los diagramas pierden simetría, pero la estimación debería ser bastante aproximada. La función monopulso al “alejarnos” de los ejes (de los planos XZ e YZ, es decir, de $\phi=0^\circ$ y de $\phi=90^\circ$) se deforma más en el caso de alimentación real.

Vamos a ver este ejemplo situando al dron en $\phi=-45^\circ=315^\circ$ y $\theta=5^\circ$. Los resultados con alimentación real son los siguientes:

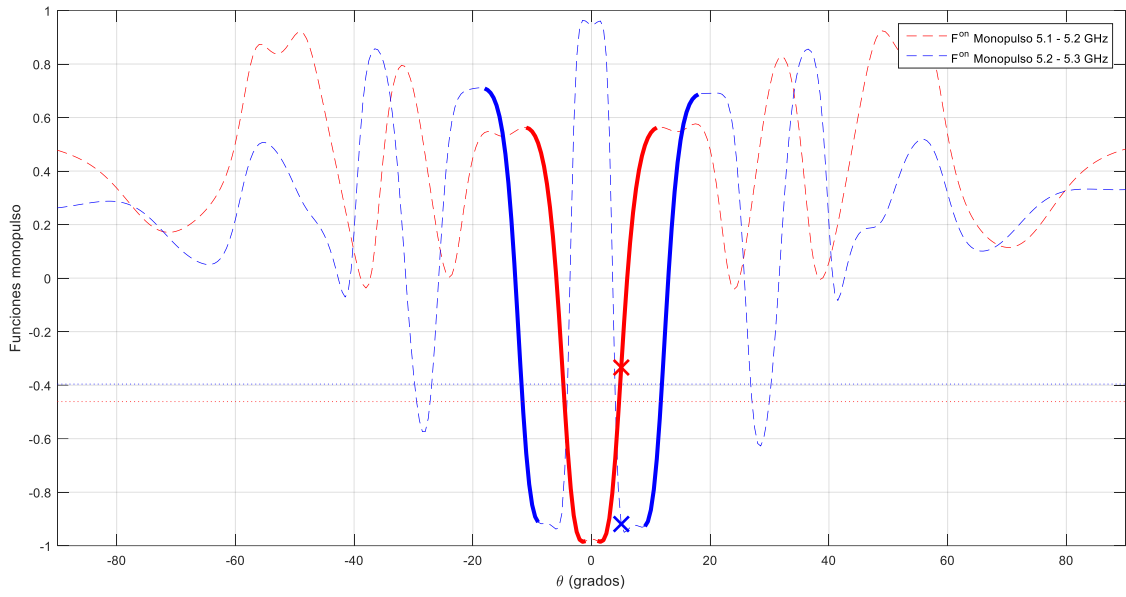


Ilustración 104 Funciones y valores monopulso caso 3, alimentación real

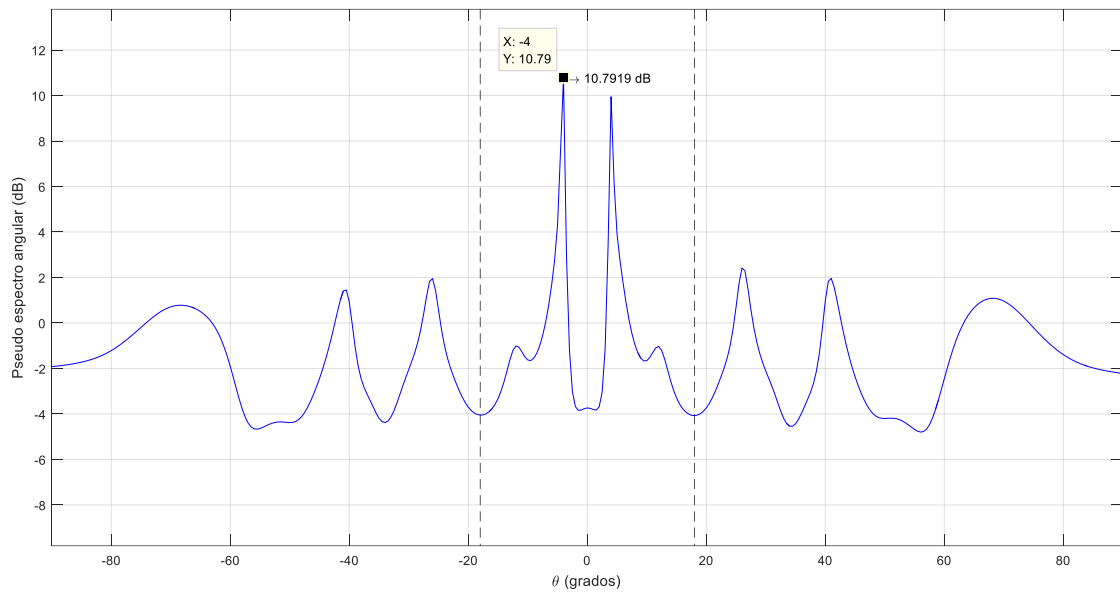


Ilustración 105 Pseudoespectro angular 2D caso 3, alimentación real

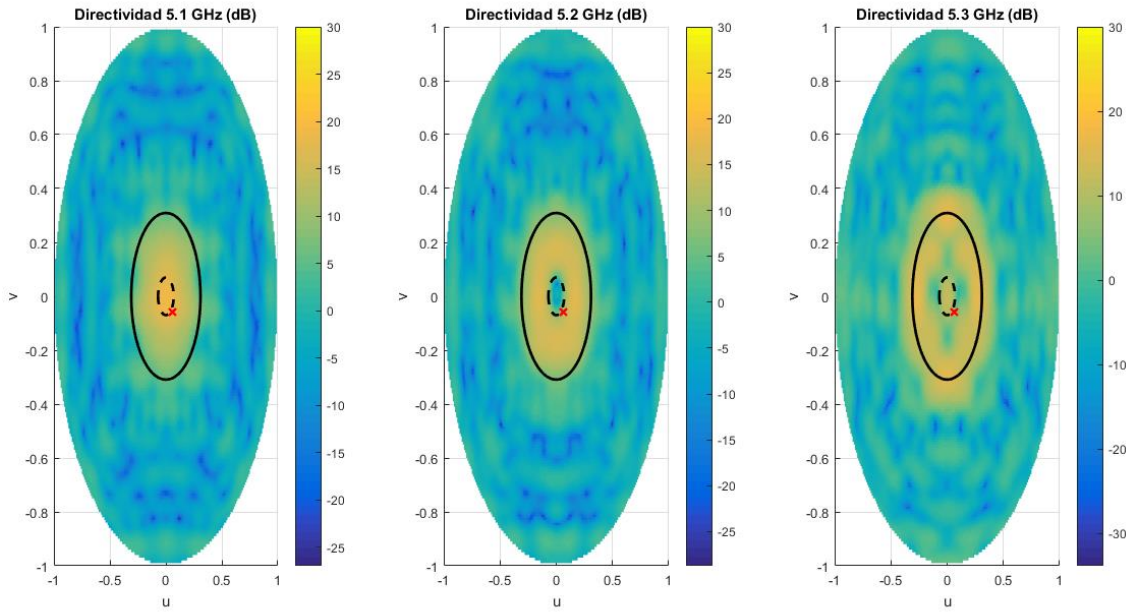


Ilustración 106 Diagramas u-v caso 3, alimentación real

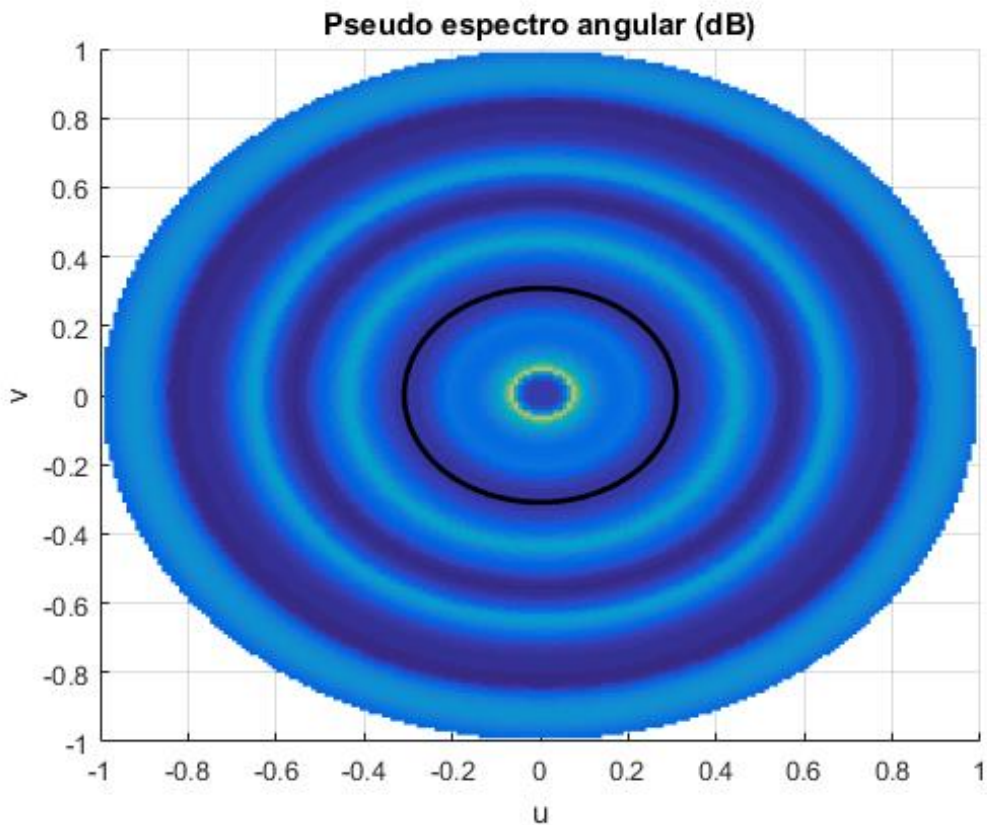


Ilustración 107 Pseudoespectro angular 3D caso 3, alimentación real

Con alimentación real y para este caso concreto, el error obtenido es 1° , ya que el resultado es $\theta=4^\circ$ mientras que el dron está situado en un ángulo $\theta=5^\circ$.

Si vemos ahora el caso de alimentación ideal, el error debe ser algo menor aún:

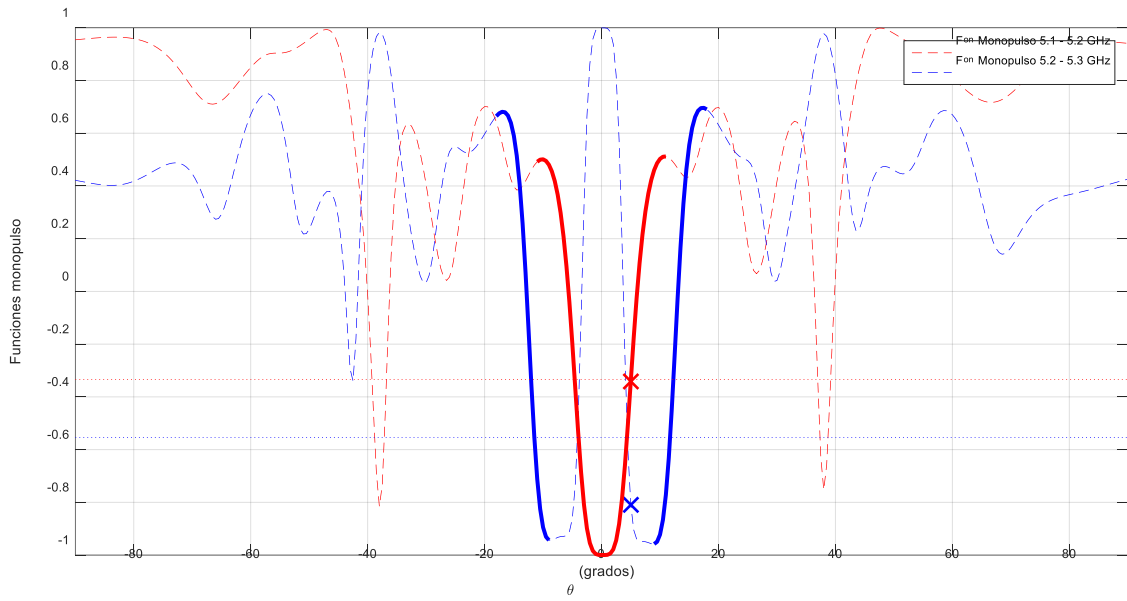


Ilustración 108 Funciones y valores monopulso caso 3, alimentación ideal

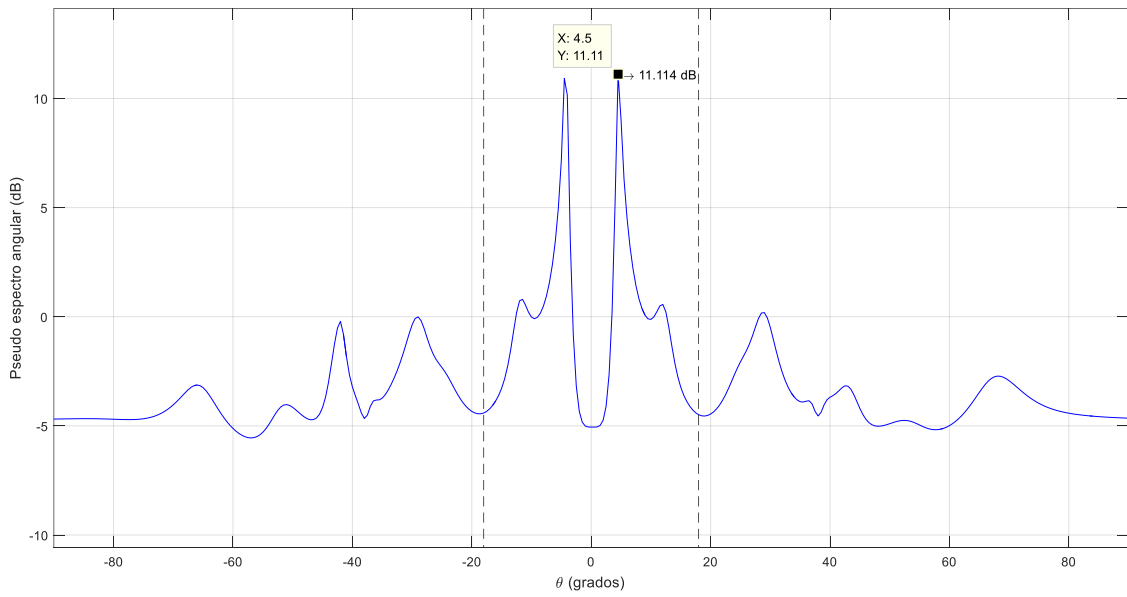


Ilustración 109 Pseudoespectro angular 2D caso 3, alimentación ideal

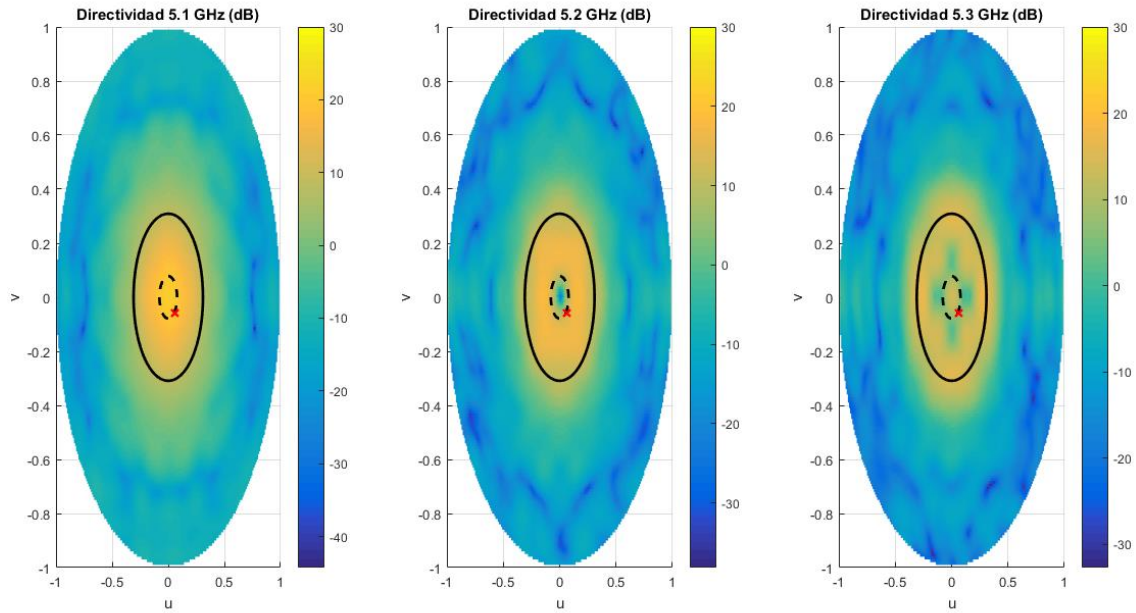


Ilustración 110 Diagramas u-v caso 3, alimentación ideal

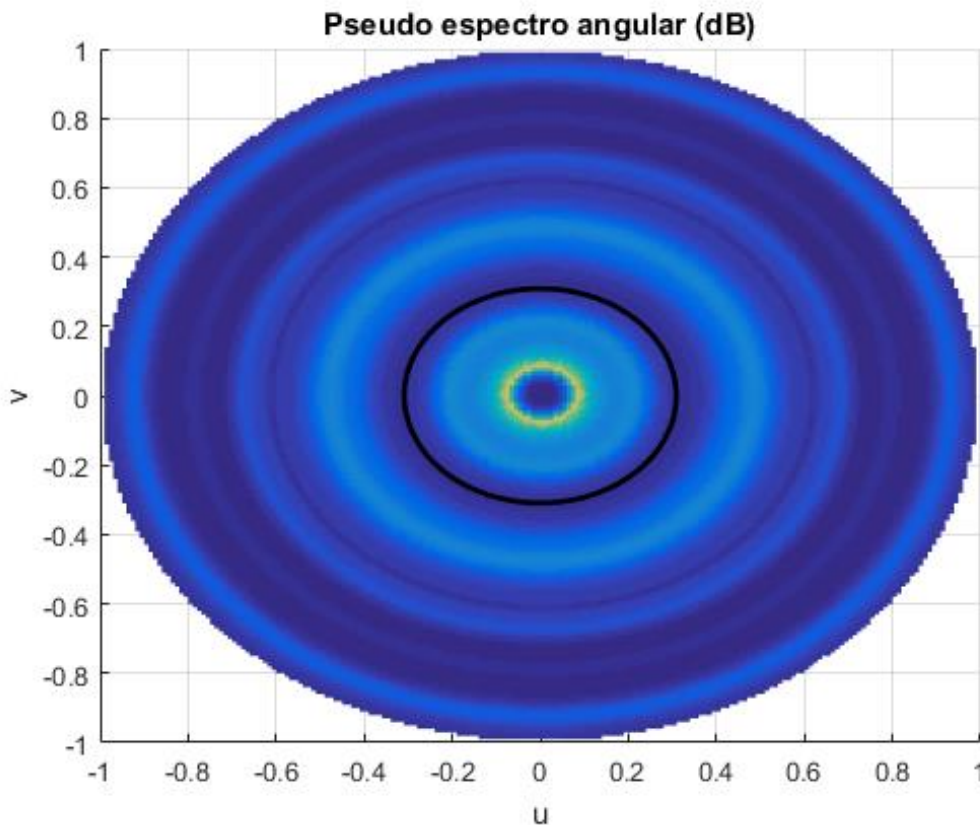


Ilustración 111 Pseudoespectro angular 3D caso 3, alimentación ideal

Con alimentación real podemos ver que el ángulo obtenido es $\theta=4.5^\circ$, por lo que tenemos un error de 0.5° ; un error algo menos que en el caso de alimentación real. Por tanto, lo que se había supuesto teóricamente se cumple también en este caso.

6.4. Caso 4.

En este último ejemplo vamos a situar el dron fuera del FOV y alejados de los planos XZ e YZ (donde se pierde la simetría). En este caso el error esperado ya puede ser de valor considerable, y vamos a hacer la prueba con $\theta=40^\circ$ y $\phi=315^\circ$.

Como en los apartados anteriores, vamos a ver primero el caso de alimentación real. Los resultados son los siguientes:

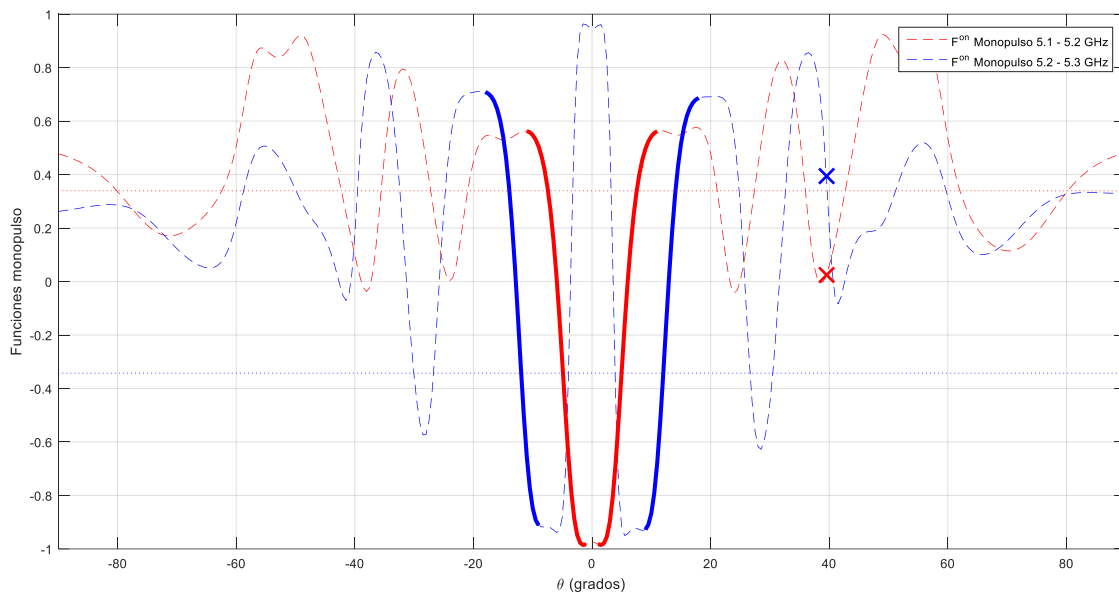


Ilustración 112 Funciones y valores monopulso caso 4, alimentación real

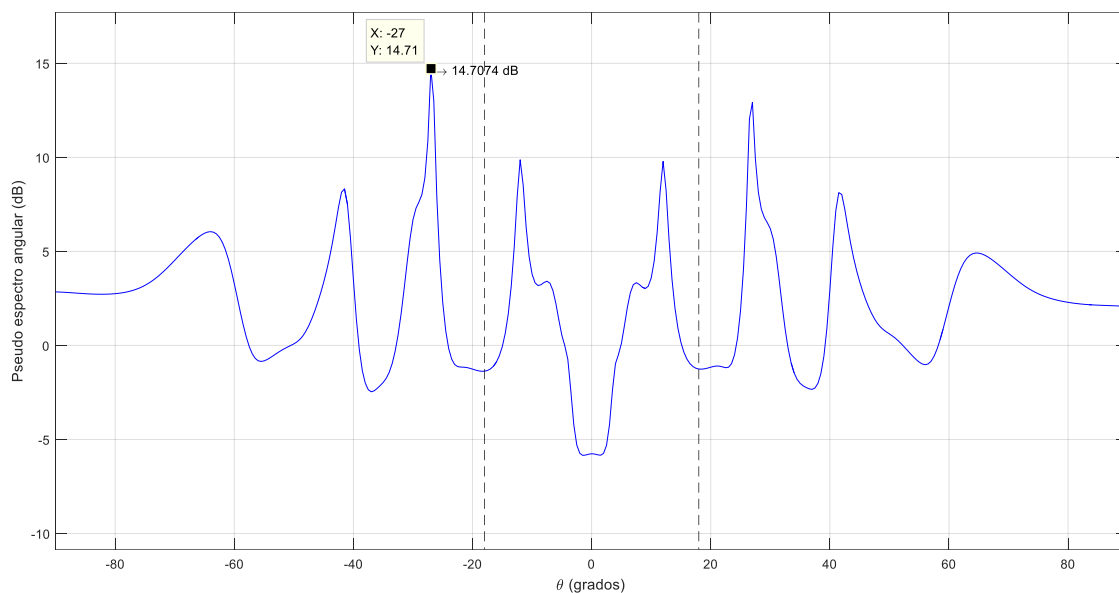


Ilustración 113 Pseudoespectro angular 2D caso 4, alimentación real

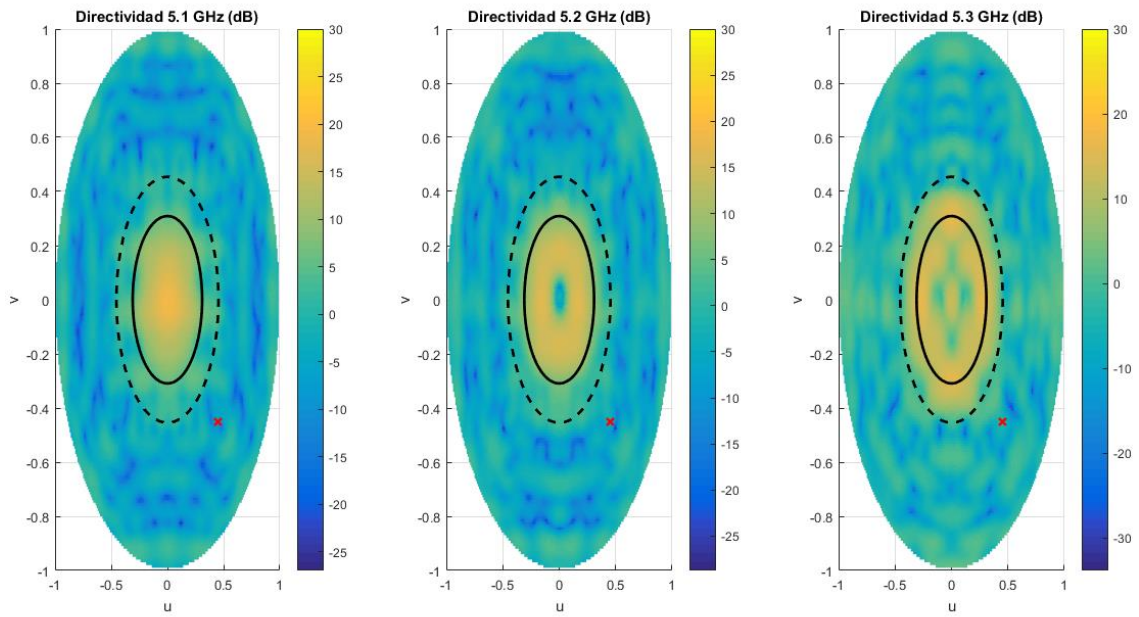


Ilustración 114 Diagramas u-v caso 4, alimentación real

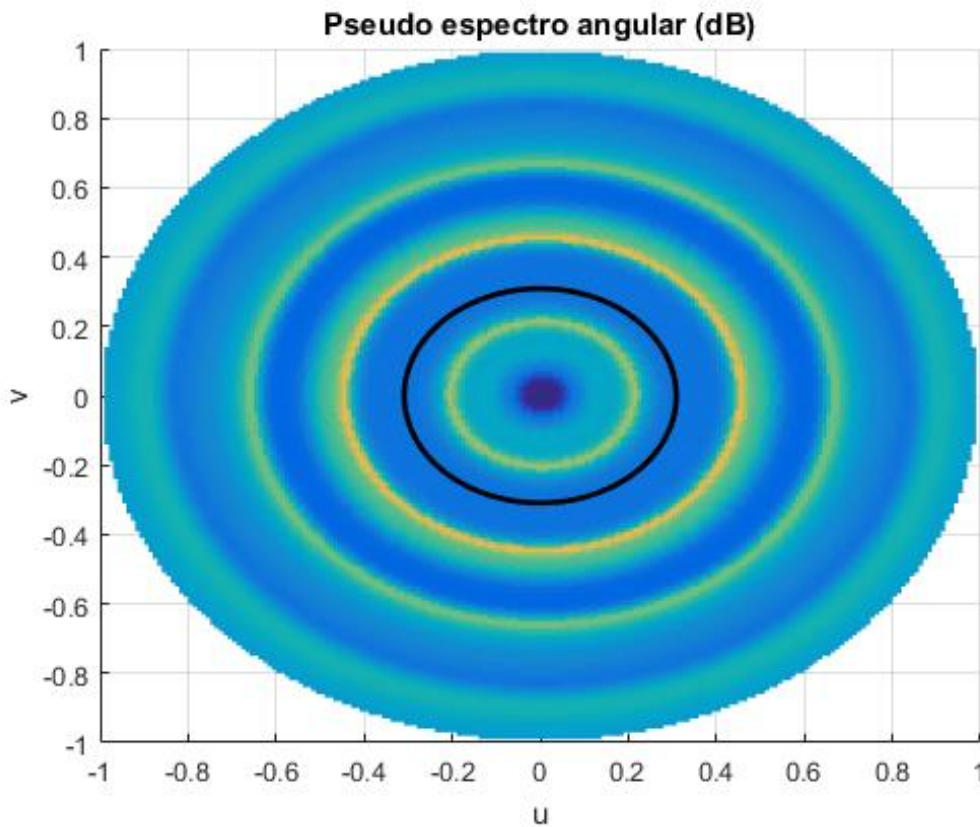


Ilustración 115 Pseudoespectro angular 3D caso 4, alimentación real

El ángulo obtenido es $\theta=27^\circ$, por lo que tenemos un error de 13° . Es un error considerable totalmente normal al estar fuera del FoV.

Si vemos ahora lo que pasa cuando tenemos una alimentación ideal:

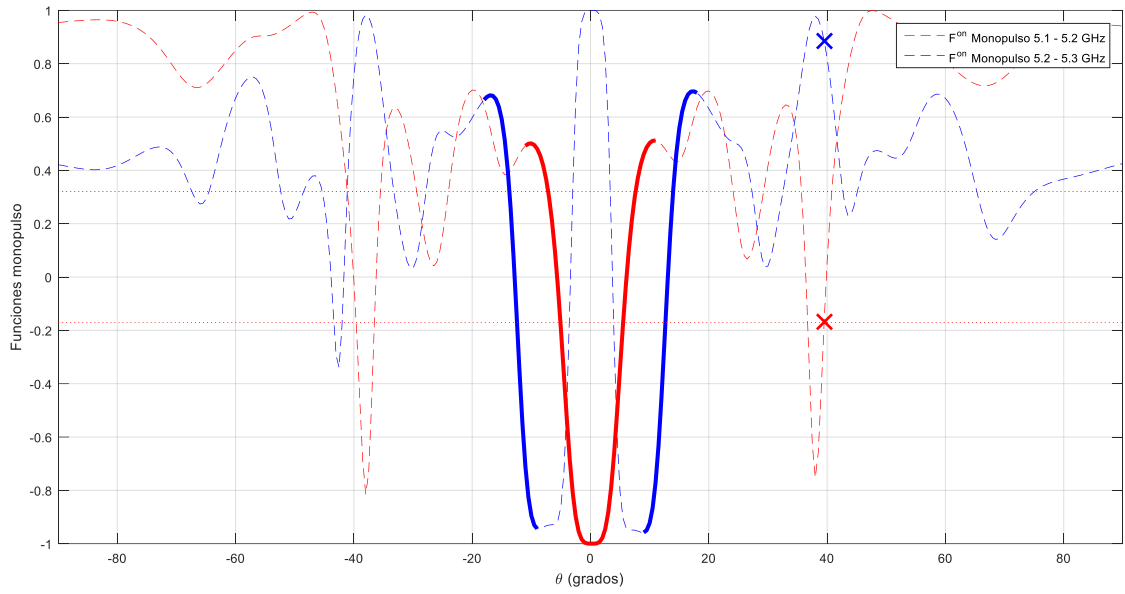


Ilustración 116 Funciones y valores monopulso caso 4, alimentación ideal

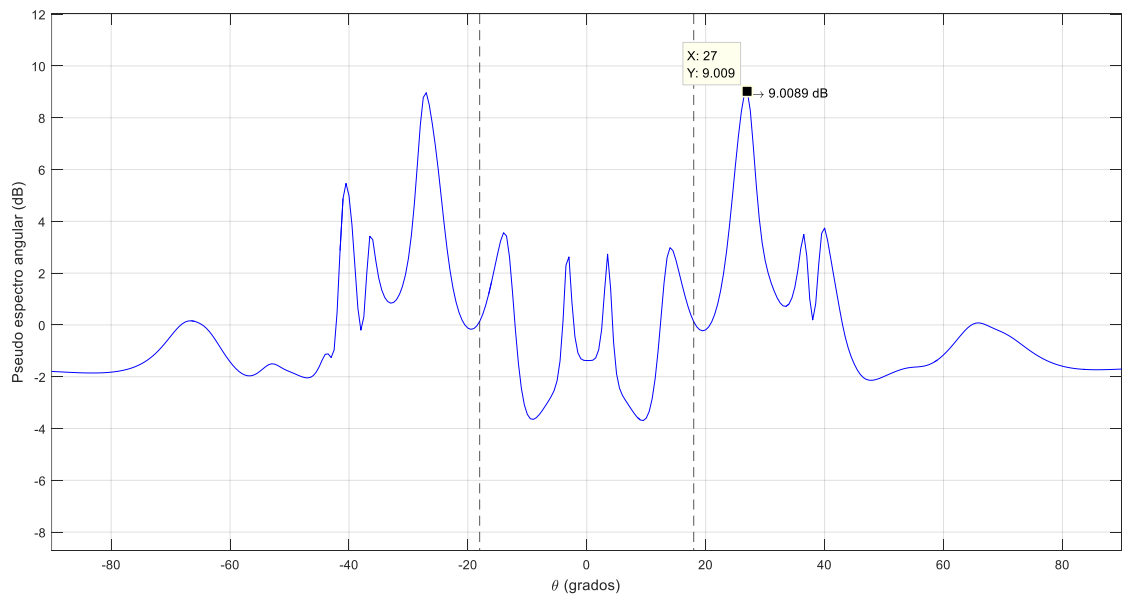


Ilustración 117 Pseudoespectro angular 2D caso 4, alimentación ideal

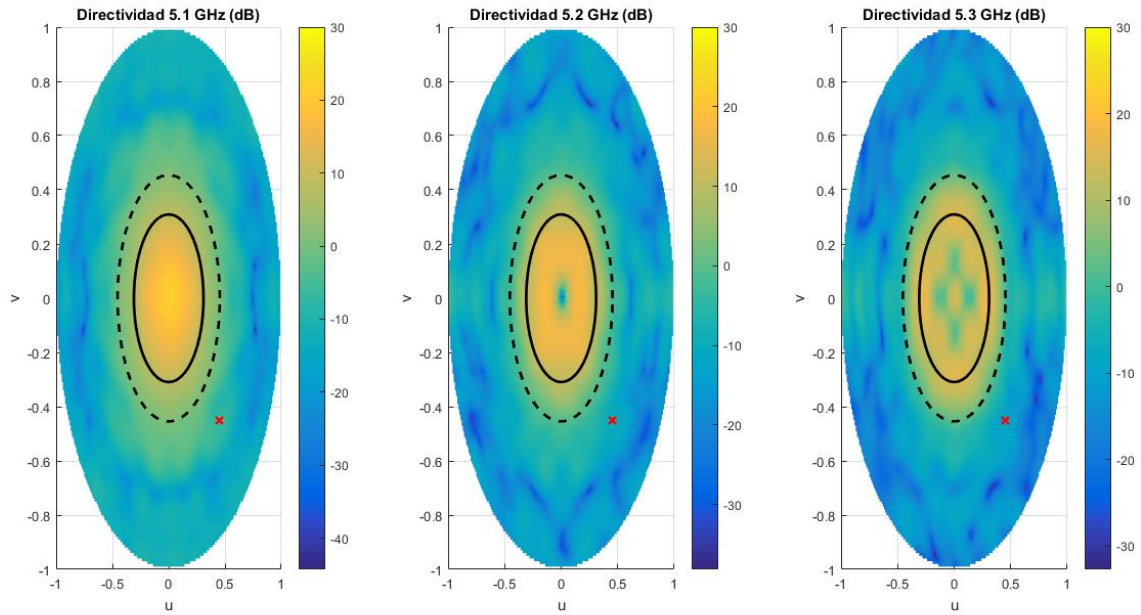


Ilustración 118 Diagramas u-v caso 4, alimentación ideal

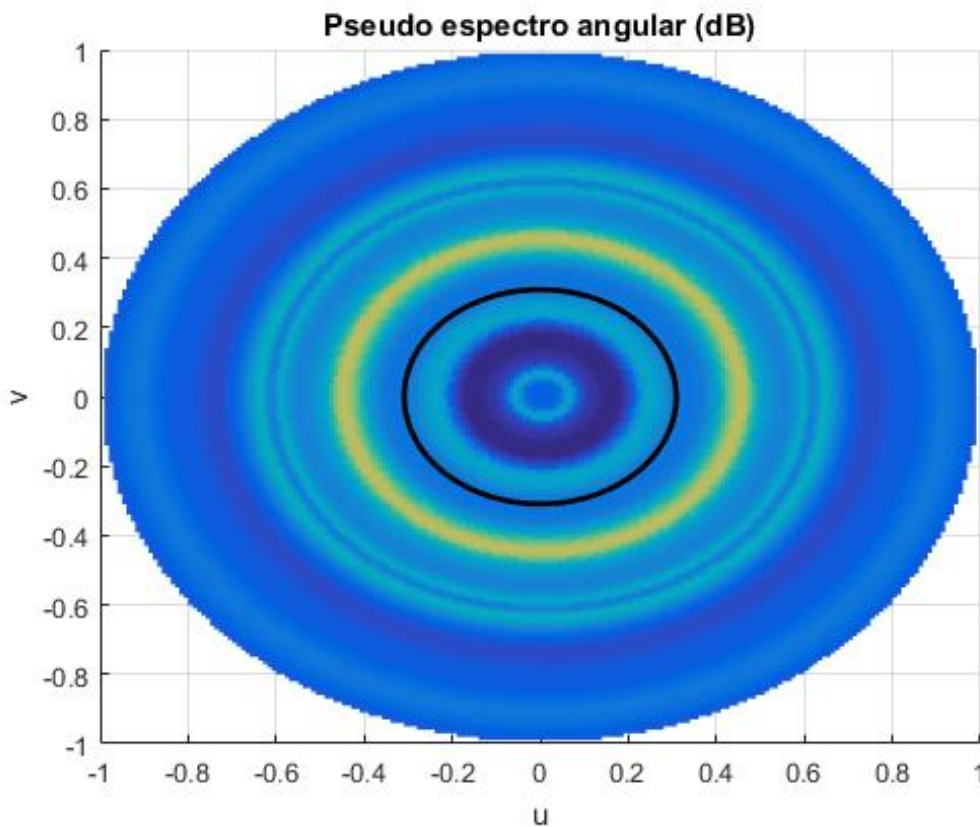


Ilustración 119 Pseudoespectro angular 3D caso 4, alimentación ideal

El ángulo obtenido es también $\theta=27^\circ$ con un error de 13° . Fuera del FoV no podemos fiarnos del resultado que se obtenga pues puede no ser correcto, como sucede en este ejemplo. De hecho, lo más normal es que no sea correcto excepto algún caso aislado que por casualidad el resultado se acerque a la posición real del dron.

6.5. Resumen de los 4 casos.

Para sintetizar los 4 casos estudiados de forma breve hay que recordar en qué consistían:

- Caso 1: dron situado en el plano XZ (plano con el que se han elaborado las funciones monopulso) y dentro del FoV.
- Caso 2: dron situado en el plano XZ y fuera del FoV.
- Caso 3: dron situado dentro del FoV pero fuera de los planos XZ e YZ.
- Caso 4: dron situado fuera del FoV y de los planos XZ e YZ.

	Error con alimentación ideal	Error con alimentación real
Caso 1	0.5°	0°
Caso 2	13°	13°
Caso 3	0.5°	1°
Caso 4	13°	13°

Ilustración 120 Comparativa de errores de predicción en función de la alimentación

Se puede ver claramente que el funcionamiento con alimentación ideal y real es muy similar, por lo que implementar esta alimentación de un monopolo conectado por coaxial ha sido un acierto. Se ha conseguido realizar un diseño real y fabricable sin deteriorar su funcionamiento.

7. Análisis final y conclusión.

Para finalizar con la memoria de este proyecto, voy a mostrar una interfaz gráfica programada en Matlab que usaré en la presentación de este. Esta interfaz ayudará a mostrar resultados de forma más rápida e intuitiva.

Además, añadiré una pequeña conclusión y propondré unas líneas futuras con las que poder continuar otros proyectos.

7.1. Interfaz gráfica.

Al abrir la interfaz, lo primero que vemos es la plantilla siguiente con la que vamos a trabajar:

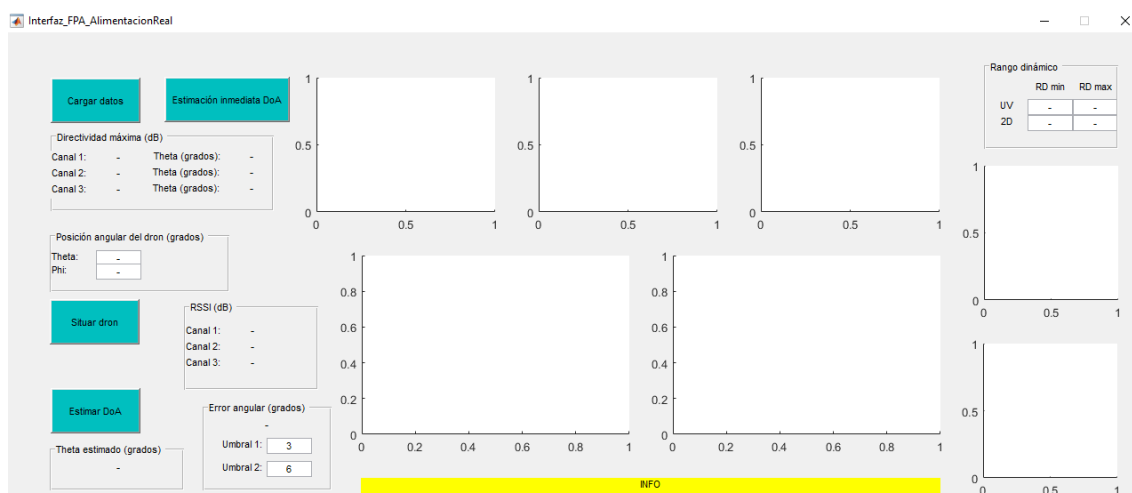


Ilustración 121 Interfaz gráfica

Podemos ver en ella 4 botones que se encargarán de cargar los datos de nuestra antena, colocar a dron en una posición determinada y estimar su dirección de llegada. Podremos situar al dron donde queramos mediante los recuadros que indican θ y ϕ , y también podremos modificar el rango dinámico de las gráficas mediante los recuadros correspondientes.

Una vez estimada la dirección de llegada, podremos tener o no cierto error que aparecerá reflejado en la ventana que indica *Error angular*. Tendremos 2 umbrales de error, modificables también por el usuario, y se pueden dar las siguientes situaciones:

- Error por debajo del primer umbral: podemos decir que la estimación ha sido correcta, y el recuadro se coloreará en verde.
- Error entre los umbrales 1 y 2: podemos decir que la estimación no es del todo errónea, pero tampoco es correcta. El recuadro pasará a estar de color naranja.
- Error por encima del segundo umbral: la estimación ha sido errónea y el recuadro se coloreará de rojo.

Aparece también en la interfaz un cuadro amarillo que indicará información de los pasos que se están realizando, tanto al pulsar un botón como al modificar cualquier parámetro. Siempre y cuando intentes introducir un valor no posible, saltará en ese mismo recuadro un mensaje de error y no se producirá el cambio, sino que seguirá el valor anterior.

En la siguiente gráfica podemos ver lo que aparece al pulsar el botón de *Cargar datos*:

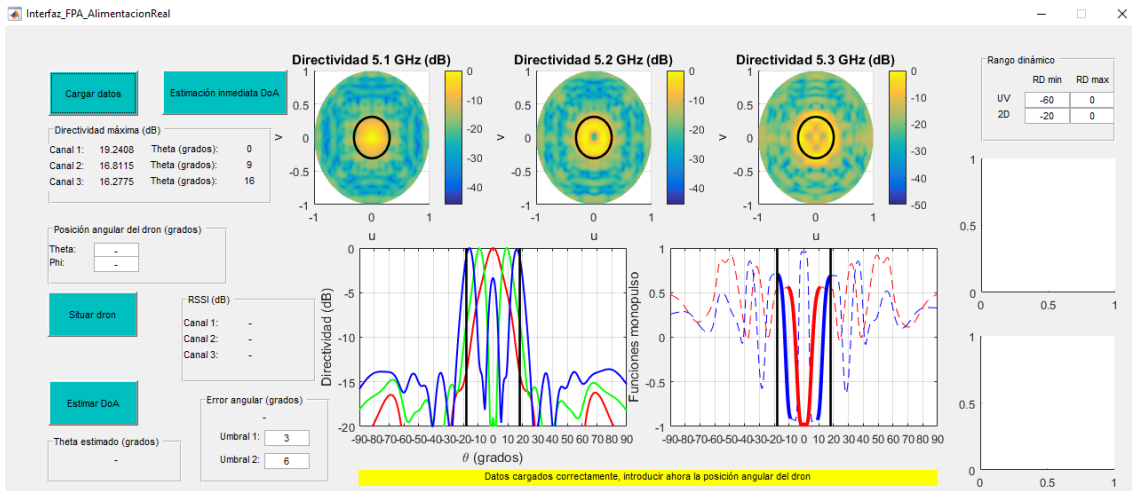


Ilustración 122 Interfaz gráfica, datos cargados

Si ahora modificamos el rango dinámico, se verán las gráficas de la siguiente forma:

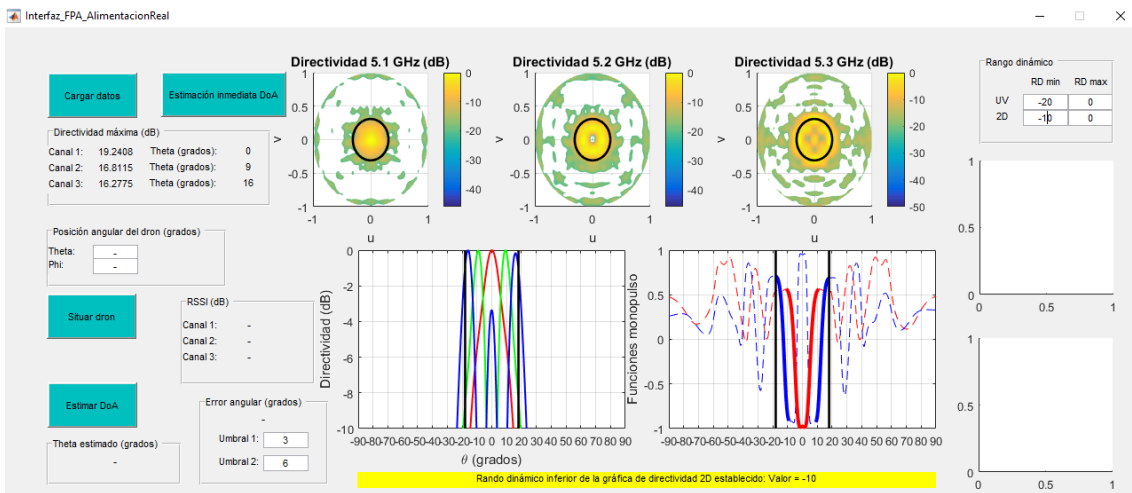


Ilustración 123 Interfaz gráfica, rango dinámico modificado

Una vez hayamos elegido unos ángulos donde posicionar el dron, podemos pulsar el botón de *Situar dron* y se modificarán los gráficos de la forma que se muestra a continuación:

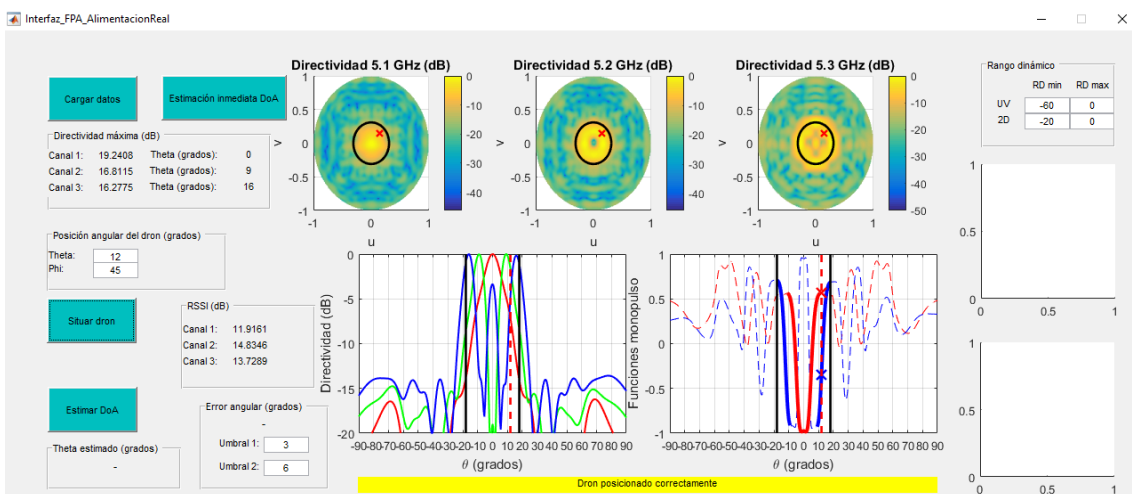


Ilustración 124 Interfaz gráfica, dron posicionado

Finalmente, podemos pulsar sobre el botón Estimar DoA y veremos el resultado final:

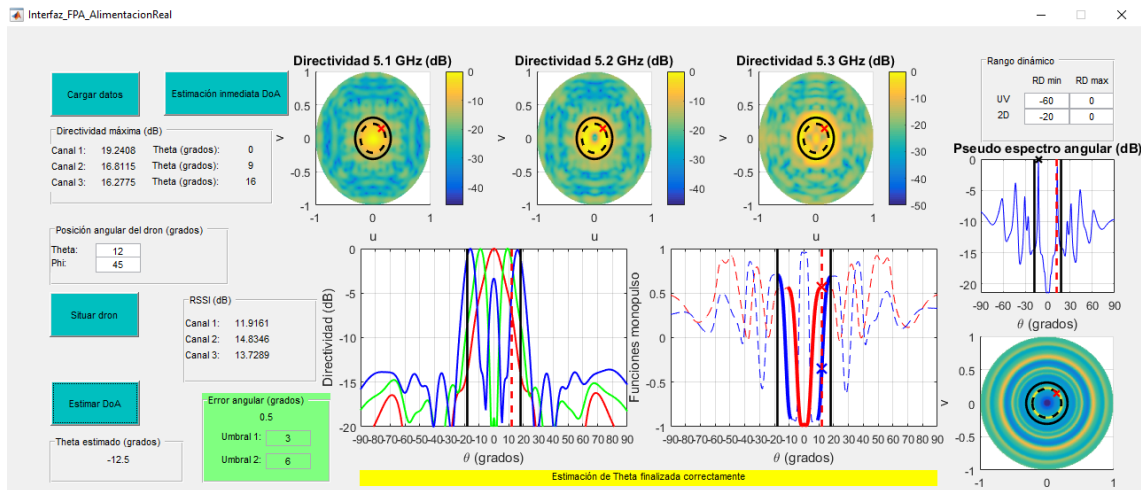


Ilustración 125 Interfaz gráfica, estimación hecha

Otra opción más directa es, una vez establecidos los ángulos en los que queremos situar al dron, pulsar *Estimación inmediata DoA* y este botón realizará tanto la colocación del dron como la estimación de la dirección de llegada de forma inmediata, sin necesidad de pulsar los otros 2 botones.

Podemos ver también como a medida que hemos ido avanzando en los pasos, iban también mostrándose datos numéricos respecto a la directividad máxima y el nivel de señal obtenido.

Gracias a esta interfaz gráfica, podemos ver el funcionamiento de la antena de forma rápida y sencilla, pudiendo hacer numerosas pruebas.

7.2. Conclusión.

Partiendo de una antena Fabry-Pérot en la que teníamos una alimentación ideal (sin diseñar) hemos conseguido implementar una alimentación real conectada por coaxial sin degradar el funcionamiento de esta, consiguiendo la misma apertura cónica a medida que aumentamos la frecuencia en ambos casos. Esto se puede ver con las siguientes gráficas comparativas de los diagramas de radiación de los planos perpendiculares XZ e YZ:

Alimentación ideal	Frecuencia	Ganancia plano XZ	Ganancia plano YZ	Ángulo de máxima radiación (plano XZ-YZ)
Canal 1	5.1 GHz	21.58 dB	21.58 dB	0.5° - 0°
Canal 2	5.2 GHz	18.39 dB	17.33 dB	9° - 9.5°
Canal 3	5.3 GHz	17.34 dB	15.78 dB	16.5° - 16.5°
Alimentación real	-	-	-	-
Canal 1	5.1 GHz	19.24 dB	19.24 dB	0° - 1°
Canal 2	5.2 GHz	16.81 dB	15.89 dB	9° - 9.5°
Canal 3	5.3 GHz	16.27 dB	16.26 dB	16° - 17.5°

Ilustración 126 Tabla comparativa de la antena con alimentación ideal y real

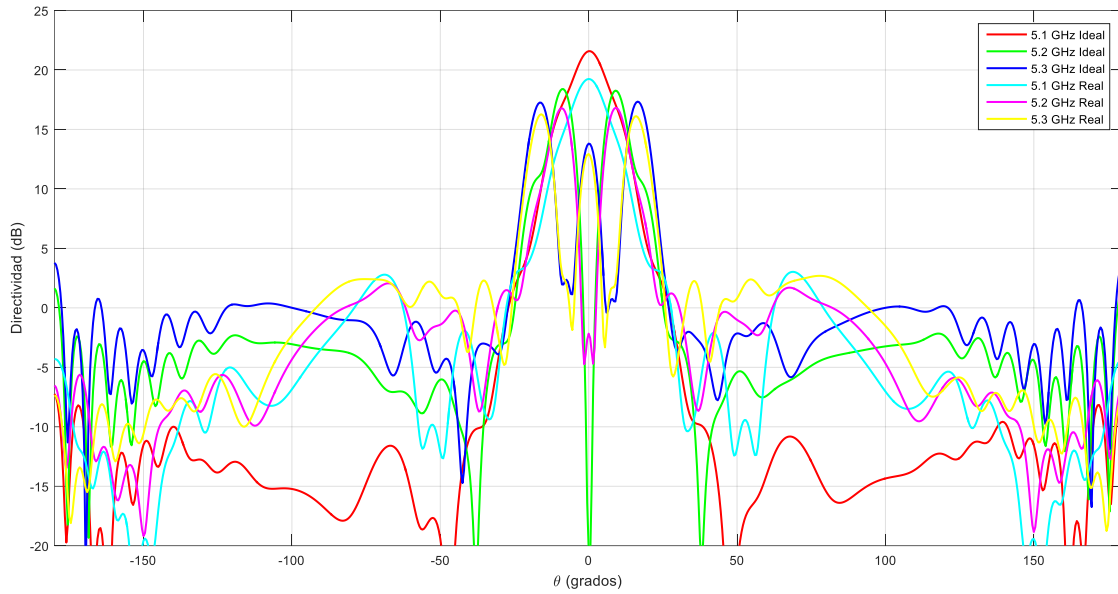


Ilustración 127 Directividad plano XZ alimentación ideal y real

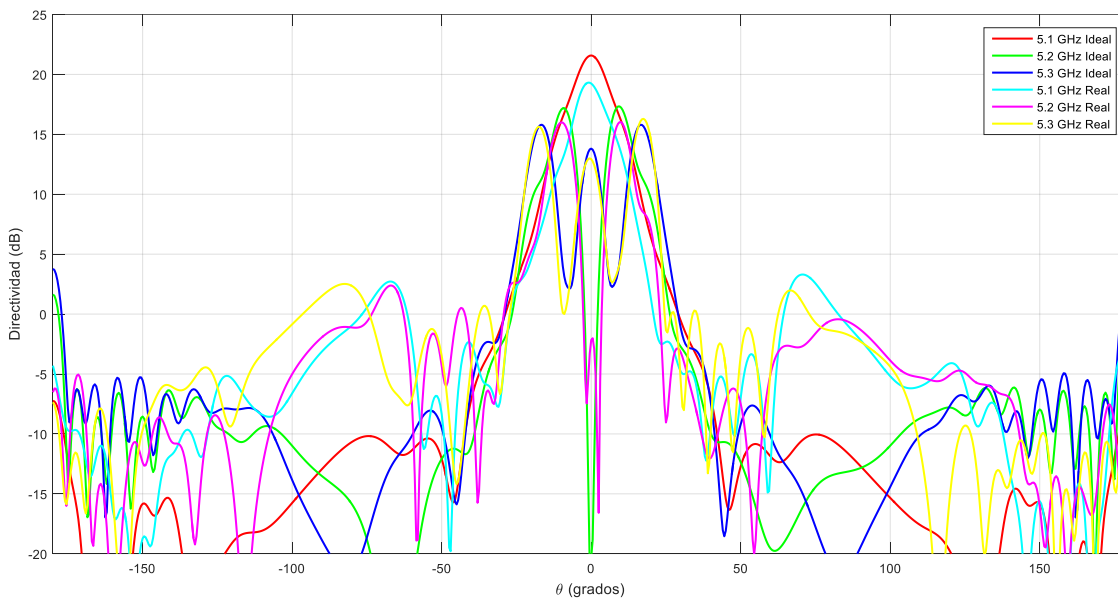


Ilustración 128 Directividad plano YZ alimentación ideal y real

Conforme pasamos a un canal superior (frecuencia más alta), el ángulo de máxima radiación aumenta y el valor de ganancia máximo disminuye. Esto último no importa demasiado, ya que trabajamos con valores normalizados.

Finalmente, tenemos una antena Fabry-Pérot con su alimentación diseñada para asistir en el aterrizaje autónomo de drones sobre una plataforma que será la propia antena, optimizada para las frecuencias de 5.1 GHz, 5.2 GHz y 5.3 GHz. Este tipo de antenas generan diagramas de radiación muy directivos en su dirección perpendicular (broadside) con una estructura resonante sencilla formada por dos placas bidimensionales. Se trata de una antena cuadrada de 460x460 milímetros, con parches también cuadrados de 16x16 milímetros repartidos de forma

uniforme sobre el sustrato FR4 de 3 milímetros de grosor, el cual tiene una permitividad relativa 4.48 y una tangente de pérdidas de 0.01. El sustrato está situado 28 milímetros por encima del plano de masa, y para unirlos tenemos un material esponjoso con propiedades similares al aire. En la parte inferior central de la antena tenemos una conexión coaxial para poder alimentar la antena. Esta alimentación, polarizada en el eje \hat{y} , consiste en un monopolo de 18.25 milímetros de largo situado a una altura de 19.5 milímetros.

Aprovechamos la propiedad "conical-beam frequency-scanning" para realizar un escaneo en frecuencia y encontrar la dirección de llegada del dron, que será capaz de estimarla con precisión siempre y cuando esté situado dentro del campo de visión de 36°.

Conseguimos una antena que cumple correctamente su función y tiene un coste muy inferior a un GPS diferencial, el cual también serviría para lo que queremos conseguir.

7.3. Líneas futuras.

Como líneas futuras 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.

También sería interesante añadir una superficie de alta impedancia (HIS) sobre el plano de masa para conseguir aumentar el campo de visión de la antena. Para hacer esto, se podría empezar con una alimentación ideal y pasar después al diseño de la alimentación que puede o no ser el mismo que en este trabajo. En este proyecto se ha intentado llevar a cabo sin éxito, así que sería interesante profundizar más en un futuro.

Una línea futura adicional sería diseñar una antena Fabry-Pérot conformada que sirva para superficies curvas. Modulando convenientemente los parches de la PRS y la HIS habría que conseguir que se adapte la forma de la FPA a superficies curvas, siguiendo la teoría y la metodología descrita en varios artículos de la bibliografía [34] [35] [36].

Otro aspecto que hay que desarrollar es la proposición de un algoritmo 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.

8. Bibliografía.

- [1] [Adrián Enrique Capristán Díaz, 2018]: TFG Adrián Enrique Capristán Díaz “Antenas Fabry-Pérot”, 2018, Universidad Carlos III.
- [2] [A. J. Martínez-Ros, J. L. Gómez-Tornero y G. Goussetis, 2011]: A. J. Martínez-Ros, J. L. Gómez-Tornero, y G. Goussetis, “Frequency scanning leaky wave antenna for positioning and identification of RFID tags,” en Proc. IEEE Int. Conf. RFID-Technol. Appl. (RFID-TA), Septiembre 2011, pp. 451–456.
- [3] [M. Poveda-García, D. Cañete-Rebenaque y J.L. Gómez-Tornero, 2019]: M. Poveda-García, D. Cañete-Rebenaque, y J.L. Gómez-Tornero, “Frequency-Scanned Monopulse Pattern Synthesis Using Leaky-Wave Antennas for Enhanced Power-Based Direction-of-Arrival Estimation”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 11, pp. 7071-7086, Noviembre 2019.
- [4] [M. Poveda-García, E. Andreu-García, J. García-Fernández, D. Cañete-Rebenaque y J.L. Gómez-Tornero, 2020]: M. Poveda-García, E. Andreu-García, J. García-Fernández, D. Cañete-Rebenaque, J.L. Gómez-Tornero, “Frequency-scanned leaky-wave antenna topologies for two-dimensional direction of arrival estimation in IoT wireless networks,” en Proc. 15th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP 2021), Marzo, 2021, pp. 1–4.
- [5] [A. Gil-Martínez, M. Poveda-García y J. L. Gómez-Tornero, 2020]: A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, y J. L. Gómez-Tornero, “Direct synthesis of frequency-scanned monopulse half-width microstrip leaky-wave antennas,” en Proc. Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP 2020), pp. 1–4, 2020.
- [6] [R. Guzmán-Quirós, A.J. Martínez-Salas, J. L. Gómez-Tornero y J. García-Haro, 2015]: R. Guzmán-Quirós, A.J. Martínez-Salas, J. L. Gómez-Tornero y J. García-Haro, "Integration of Directional Antennas in an RSS Fingerprinting-Based Indoor Localization System," en Sensors, Special Issue Sensors for Indoor Mapping and Navigation, vol. 16, no. 4, pp. 1-23, Diciembre 2015.
- [7] [J.A. López-Pastor, P. Arqués-Lara, J.J Franco-Peñaranda, A.J. García-Sánchez y J.L. Gómez-Tornero, 2021]: J.A. López-Pastor, P. Arqués-Lara, J.J Franco-Peñaranda, A.J. García-Sánchez y J.L. Gómez-Tornero, “Wi-Fi RTT-based active monopulse RADAR for single access point localization”, IEEE Access, vol. 9, pp. 34755-34766, Febrero 2021.
- [8] [A. Gil-Martínez, M. Poveda-García y J.L. Gómez-Tornero, 2021]: A. Gil-Martínez, M. Poveda-García y J.L. Gómez-Tornero, “Wi-Fi Direction Finding with Frequency-Scanned Antenna and Channel-Hopping Scheme”, IEEE Sensor Journal, 2021.
- [9] [M. Poveda-García y J.L. Gómez-Tornero, 2021]: M. Poveda-García y J.L. Gómez-Tornero, “Ambiguity Resolution in Amplitude-Monopulse Systems using Broad-Beam Patterns”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 20, no. 4, pp. 503-507, Abril 2021.
- [10] [J. L. Gómez Tornero, A.R. Weily, and Y. Jay Guo, 2011]: J. L. Gómez Tornero, A.R. Weily, and Y. Jay Guo, “Rectilinear Leaky-Wave Antennas with Broad Beam Patterns Using Hybrid Printed-Circuit Waveguide Designs,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.59, no.11, pp. 3999 - 4007, Noviembre 2011.
- [11] [J. L. Gómez-Tornero, D. Cañete y A. Álvarez-Melcón, 2005]: J. L. Gómez-Tornero, D. Cañete y A. Álvarez-Melcón, "Printed-Circuit Leaky-Wave Antenna with Pointing and Illumination Flexibility", IEEE Microwave and Wireless Components Lett., Vol.15, No.8, pp.536-538, Agosto 2005.
- [12] [M. García-Vigueras, J. L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, J.S. Gómez-Díaz y A. Álvarez-Melcón, 2010]: M. García-Vigueras, J. L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, J.S. Álvarez-Melcón, 2010]: M. García-Vigueras, J. L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, J.S.

- Gómez-Díaz y A. Álvarez-Melcón, “A Modified Pole-Zero Technique for the Synthesis of Waveguide Leaky-Wave Antennas Loaded with Dipole-Based FSS”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.58, No.6, pp. 1971–1979, Junio 2010.
- [13] [M. García-Vigueras, J. L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, Andrew R. Wiley y Y. Jay Guo, 2011]: M. García-Vigueras, J. L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, Andrew R. Wiley y Y. Jay Guo, “1D-Leaky Wave Antenna Employing Parallel-Plate Waveguide Loaded with PRS and HIS,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.59, No.10, pp. 3687 - 3694, Octubre 2011.
 - [14] [M. García-Vigueras, J. L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, A. R. Wiley y Y. Jay Guo, 2012]: M. García-Vigueras, J. L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, A. R. Wiley y Y. Jay Guo, “Efficient Synthesis of 1D Fabry-Perot Antennas with Low Sidelobe Levels,” *IEEE Antennas and Wireless Propagat. Lett.*, vol.11, pp. 869 - 872, Agosto 2012.
 - [15] [J.L. Gómez-Tornero, D. Cañete-Rebenaque, J.A. López-Pastor y A. Martínez-Salas, 2018]: J.L. Gómez-Tornero, D. Cañete-Rebenaque, J.A. López-Pastor y A. Martínez-Salas “Hybrid Analog-Digital Processing System for Amplitude-Monopulse RSSI-based MiMo WiFi Direction-of-Arrival Estimation”, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. Special Issue on Hybrid Analog - Digital Signal Processing for Hardware-Efficient Large Scale Antenna Arrays*, vol.12, no.3, pp. 529-540, Junio 2018.
 - [16] [J.A. López-Pastor, A. Gómez-Alcaraz, D. Cañete-Rebenaque, A.S. Martínez-Sala y J.L. Gómez-Tornero, 2019]: J.A. López-Pastor, A. Gómez-Alcaraz, D. Cañete-Rebenaque, A.S. Martínez-Sala y J.L. Gómez-Tornero, “Near-Field Monopulse DoA Estimation for Angle-Sensitive Proximity WiFi Readers”, *IEEE Access Journal Special Section on Emerging Trends, Issues and Challenges for Array Signal Processing and Its Applications in Smart City*, vol. 7, no. 1, pp. 88450- 88460, Junio 2019.
 - [17] [Luis Miguel Martínez Tamargo, 2017] TFG Luis Miguel Martínez Tamargo “Diseño de una antena monopulso leaky-wave en tecnología planar para aplicación en sistemas de localización”, 2017, UPCT.
 - [18] [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.
 - [19] [José Daniel Martínez Guillén, 2020]: TFG José Daniel Martínez Guillén “Diseño de antena Fabry-Pérot para estimación cónica del ángulo de llegada en la banda de 5 GHz de Wi-Fi.”, 2020, UPCT.
 - [20] [UDLAP, 2009]: “Antenas tipo parche o de microstrip”, Capítulo 3, pp. 47, biblioteca UDLAP, 2009 (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-09-2021).
 - [21] [Si-Ping Gao, 2015]: Si-Ping Gao, Binfang Wang, Huapeng Zhao, Wei-Jiang Zhao y Ching Eng Png, Artículo “radiación de las antenas de parche”, web *semantic scholar*, 2015 (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-09-2021).
 - [22] [José Manuel Nieto Escribano, 2018]: TFG José Manuel Nieto Escribano “Diseño de un array de antenas parche con alimentación en serie a 60GHz”, pp. 12, 2018, Universidad Pública de Navarra (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-09-2021).
 - [23] [sneikder, 2018]: sneikder, Artículo “interferometría de Michelson-Morley y Fabry-Pérot: La teoría detrás del descubrimiento de las ondas gravitacionales.”, web *steemit*, 2018 (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-09-2021).
 - [24] [Giampiero Lovat, 2014]: Giampiero Lovat, Documento “papel de las leaky waves en las antenas Fabry-Pérot”, 2014 (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-03-2020).

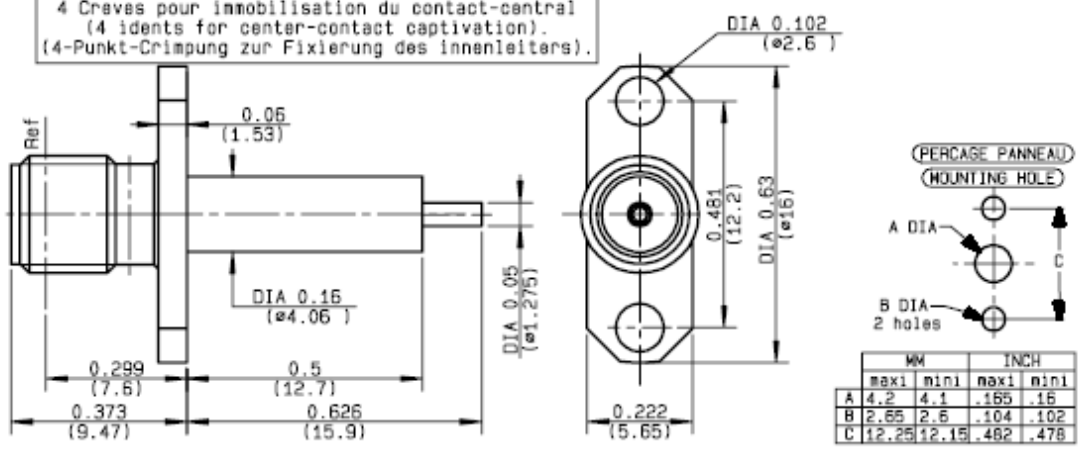
- [25] [Filippo Costa, 2017]: Filippo Costa, Davide Bianchi, Agostino Monorchio y Giuliano Manara, Artículo “diseño de las antenas Fabry-Pérot”, Figure 1, web *semantic*, 2017 (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-09-2021).
- [26] [Daniel Marín, 2014]: Daniel Marín, Artículo “satélite GPS IIF-8”, 2014 (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-09-2021).
- [27] [GPS.GOV]: Artículo “sistema GPS”, web *GPS.GOV*, Información oficial del Gobierno de los Estados Unidos relativa al Sistema de Posicionamiento Global y temas afines (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-09-2021).
- [28] [Ignacio Álvarez Olmos, 2018]: TFG Ignacio Álvarez Olmos “Implementación de la técnica monopolso para un sistema de array digital en la recepción de ocho canales en banda X”, pp. 3, Universidad Politécnica de Madrid, 2018 (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-09-2021).
- [29] [Charly Whisky, 2014]: Charly Whisky, “Principios del sistema monopolso”, web *Wikipedia*, 2014 (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-09-2021).
- [30] [José Montero, 2005]: José Montero, “Coordenadas esféricas”, web *Wikipedia* (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-09-2021).
- [31] [Frahaan Hussain, 2014]: Frahaan Hussain, Tutorial “Basic Texture Mapping”, 2014 (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-09-2021).
- [32] [Chetvorno, 2005]: Chetvorno, “Monopole Antenna”, web *Wikipedia*, 2005 (disponible online en: [enlace](#), consultado el 01-09-2021).
- [33] [M. García-Vigueras, J.L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, Andrew R. Wiley y Y. Jay Guo, 2011]: M. García-Vigueras, J.L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, Andrew R. Wiley y Y. Jay Guo, “Enhancing Frequency-Scanning Response of Leaky-Wave Antennas Using High Impedance Surfaces,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol.10, pp. 7–10, Marzo 2011.
- [34] [J.L. Gómez-Tornero, 2011]: J.L. Gómez-Tornero, “Unusual Tapering of Leaky-Wave Radiators and their Applications Proc. 5th Eur. Conf. Antennas Propag.” (EuCAP 2011), pp. 1–4, Abril 2011.
- [35] [J. L. Gómez Tornero, 2011]: J. L. Gómez Tornero, “Analysis and Design of Conformal Tapered Leaky Wave Antennas,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.10, pp. 1068 - 1071, Octubre 2011.
- [36] [A. J. Martínez-Ros, J. L. Gómez-Tornero y G. Goussetis, 2014]: A. J. Martínez-Ros, J. L. Gómez-Tornero y G. Goussetis, “Conformal Tapered Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.62, no.12, pp. 5983-5991, Diciembre 2014.
- [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”, 3º curso GIST, Celia Gómez, 2018, UPCT.
- [Alejandro Álvarez Melcón y David Agapito Sánchez Hernández, 2020]: Apuntes de la asignatura “Sistemas de radionavegación, posicionamiento y radar”, MIT, Alejandro Álvarez Melcón y David Agapito Sánchez Hernández, 2020, UPCT.

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 (L-PMN)	Canada (C-PMN)	Europe (E-PMN)	Balticland (B-PMN)	Russia (R-PMN)	Japan (J-PMN)	India (I-PMN)	Singapore (S-PMN)	China (C-PMN)	Israel (I-PMN)	Korea (K-PMN)	Turkey (T-PMN)	Australia (A-PMN)	South Africa (S-PMN)	Brazil (B-PMN)	Taiwan (T-PMN)	New Zealand (N-PMN)	Bahrain (B-PMN)	
7	5035	5030-5040	10		X	X	X	N/A	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	
16	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 P-HA 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	No	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or P-HA 11	No	Indoors	Yes	No	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	
36	5180	5170-5190	20					U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or P-HA 11	Indoors	Indoors	Yes	Yes	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	
38	5190	5170-5210	40					U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or P-HA 11	Indoors	Indoors	Yes	No	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	
40	5200	5190-5210	20					U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or P-HA 11	Indoors	Indoors	Yes	Yes	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	
42	5210	5170-5230	80					U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or P-HA 11	Indoors	Indoors	Yes	No	No	No	Indoors	Indoors	No	No	Yes	Indoors	Indoors	
44	5220	5210-5230	20					U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or P-HA 11	Indoors	Indoors	Yes	Yes	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	
46	5230	5210-5250	40					U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or P-HA 11	Indoors	Indoors	Yes	No	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	
48	5240	5230-5250	20					U-NI-1	Yes	Indoors	Indoors	Indoors	Indoors/TPC or P-HA 11	Indoors	Indoors	Yes	Yes	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	Indoors/DFS/TPC	Indoors	Yes	Indoors	Indoors	
50	5250	5170-5330	160					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 P-HA 11	No	No	DFS	Indoors	Indoors/DFS/TPC	
52	5260	5250-5270	20					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 or P-HA 11	Yes	Indoors	Indoors/DFS/TPC or P-HA 11	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	
54	5270	5250-5290	40					U-NI-2A	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS/TPC	No	Indoors	No	Indoors	Indoors/DFS/TPC or P-HA 11	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	
56	5280	5270-5290	20					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 or P-HA 11	Yes	Indoors	Indoors/DFS/TPC or P-HA 11	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	
58	5290	5250-5330	80					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 or P-HA 11	No	No	DFS	Yes	Indoors/DFS/TPC	
60	5300	5290-5310	20					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 or P-HA 11	Yes	Indoors	Indoors/DFS/TPC or P-HA 11	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	
62	5310	5290-5330	40					U-NI-2A	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS/TPC	No	Indoors	No	Indoors	Indoors/DFS/TPC or P-HA 11	Indoors/DFS/TPC	Indoors	DFS	DFS/TPC	Indoors/DFS/TPC	
64	5320	5310-5330	20					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 or P-HA 11	Yes	Indoors	Indoors/DFS/TPC or P-HA 11	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/TPC or P-HA 11	Unknown	Yes	DFS/TPC	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Indoors/DFS/TPC	
69	5400	5470-5490	20		X	X	X	U-NI-2C	Unknown	No	DFS/TPC	DFS/TPC	No	Unknown	Yes	DFS/TPC	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown	Unknown
100	5510	5490-5510	20					U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	No	
102	5510	5490-5530	40					U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	No	
104	5520	5510-5530	20					U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	No	
106	5530	5490-5570	80					U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	Yes	Indoors/TPC or P-HA 11	No	No	DFS	DFS/TPC	No	
108	5640	5550-5570	20					U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	No	No	No	No	No	DFS	DFS/TPC	No
110	5650	5550-5570	40					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 P-HA 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	No
112	5660	5550-5570	20					U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	No	
114	5670	5630-5650	160					U-NI-2C	DFS	No	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	No	No	No	No	No	DFS	DFS/TPC	No
116	5680	5570-5590	20					U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	Yes	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	No	
118	5690	5570-5610	40					U-NI-2C	DFS	No	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	DFS/TPC	No	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	No	
120	5690	5590-5610	20					U-NI-2C	DFS	No	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	No	No	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	No	
122	5610	5570-5650	80					U-NI-2C	DFS	No	DFS/TPC	DFS/TPC	No	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	No	No	No	No	No	DFS	DFS/TPC	No
124	5620	5610-5630	20					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	No	
126	5630	5610-5630	40					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	DFS/TPC	No
128	5640	5630-5650	20					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	No	
132	5660	5650-5670	40					U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	No	
134	5670	5650-5690	80					U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	No	
136	5680	5670-5690	20					U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	Yes	DFS	DFS	DFS/TPC	No	
138	5690	5680-5730	80					U-NI-2C and U-NI-3	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	No	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	No	DFS/TPC or P-HA 21	Yes	No	No	DFS/TPC	No	
140	5700	5680-5730	20					U-NI-2C	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	DFS/TPC	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 21	Yes	No	No	DFS/TPC	No	
142	5710	5680-5730	40					U-NI-2C and U-NI-3	DFS	DFS/TPC	DFS/TPC	DFS/TPC	Indoors/TPC or P-HA 11	No	Unknown	DFS/TPC	No	No	No	No	DFS/TPC or P-HA 21	No	No	No	DFS/TPC	DFS/TPC	
144	5720	5710-5730	20					U-NI-2C and U-NI-3	DFS	DFS/TPC	DFS + SRD (25 mW)	DFS + SRD (25 mW)	Indoors/TPC or P-HA 11	DFS/TPC	Indoors	DFS/TPC	No	No	No	No	DFS/TPC or P-HA 21	No	No	No	DFS/TPC	DFS/TPC	
149	5745	5735-5755	20					U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	Indoors/TPC or P-HA 11	No	Indoors	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	DFS/TPC	
151	5755	5735-5755	40					U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	Indoors/TPC or P-HA 11	No	Indoors	Yes	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	DFS/TPC	
153	5765	5735-5755	20					U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	Indoors/TPC or P-HA 11	No	Indoors	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	DFS/TPC	
155	5775	5735-5815	80					U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	Indoors/TPC or P-HA 11	No	Indoors	Yes	No	No	No	No	Yes	No	No	Yes	Yes	DFS/TPC	
157	5785	5735-5795	20					U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	Indoors/TPC or P-HA 11	No	Indoors	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	DFS/TPC	
159	5795	5775-5815	40					U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	Indoors/TPC or P-HA 11	No	Indoors	Yes	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	DFS/TPC	
161	5805	5775-5815	20					U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	Indoors/TPC or P-HA 11	No	Indoors	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	DFS/TPC	
165	5825	5815-5835	20		X	X	X	U-NI-3	Yes	Yes	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	Indoors/TPC or P-HA 11	No	Indoors	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	DFS/TPC	
169	5845	5835-5855	20		X	X	X	N/A	No	No	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	No	No	No	Yes	Yes	No	No	No	No	No	No	No	No	No	DFS/TPC	
173	5865	5855-5875	20		X	X	X	N/A	No	No	SRD (25 mW) ⁽¹⁾	No	No	No	Yes	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
183	4915	4910-4920	10		X	X	X	N/A	No	No	No	No	No	registration needed	Unknown	No	No	No	No	No							

ADJUST. 2 HOLES FLANGE JACK RECEPTACLE WITH CYLINDRICAL CONTACT **R124.464.000**
SERIES SMA-COM

4 Craves pour immobilisation du contact-central
 (4 idents for center-contact captivation).
 (4-Punkt-Crimpung zur Fixierung des innenleiters).



NOMINAL IMPEDANCE	50	Ω
FREQUENCY RANGE	0-18	GHz
TEMPERATURE RATING	-65/+165	°C
V.S.M.R	1.04 + .0045 x F(GHz)	Maxi
RF INSERTION LOSS	0.05 √F(GHz)	dB Maxi
VOLTAGE RATING	500	Veff Maxi
DIELECTRIC WITHSTANDING VOLTAGE	1000	Veff Mini
INSULATION RESISTANCE	5000	M ΩMini
HERMETIC SEAL	NA	Atm.cm ³ /s
LEAKAGE (pressurized only)	NA	
MECHANICAL DURABILITY	100	Cycles
WEIGHT	2.15	gr
SPECIFICATION		

CABLES :

OTHERS CHARACTERISTICS

cc15.9-is12.7-tro12.7-cr	
CABLE RETENTION	NA N Mini
CENTER CONTACT RETENTION	
Axial force - mating end	27 N Mini
Axial force - opposite end	27 N Mini
Torque	2.8 cm.N Mini
RECOMMENDED TORQUES	
Mating	NA cm.N
Panel nut	NA cm.N
Clamp nut	NA cm.N

CONNECTOR PARTS	MATERIALS	FINISH	(all values are given in micrometers)
BODY	BRASS	BBR 2	
OUTER CONTACT			
CENTER CONTACT	BERYLLIUM COPPER	GOLD 1.3 OVER COPPER 2.5	
INSULATOR	PTFE	-	
GASKET		-	
OTHERS PIECES			

TRIGUES	ISSUE	CREATION DATE	FILE PART-NUMBER	
	9901A00	10/07/1996	96-1200-018	

The information given here is subject to change without notice.
 Design changes may be in order to improve the product .

Connect to the future