

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO DE ANTENAS DE PARCHES CONFORMADAS PARA
SISTEMAS DE COMUNICACIONES DE BANDA ANCHA**

Paula Sánchez Dancausa

JULIO 2014

DISEÑO DE ANTENAS DE PARCHES CONFORMADAS PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES DE BANDA ANCHA

Autor: Paula Sánchez Dancausa

Tutor: José Luis Masa Campos

Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)

Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Julio 2014



Resumen

En este trabajo se propone realizar el diseño, la implementación y la medida de una antena de parches conformada que tenga un comportamiento omnidireccional en su plano horizontal con tecnología impresa.

Para ello, se ha llevado a cabo un diseño inicial del elemento unitario a 3.5 GHz escogiendo su forma de alimentación para posteriormente, sabiendo su comportamiento, poder escoger qué estructura será la idónea para cumplir los objetivos. Este diseño de parche rectangular alimentado por línea *microstrip* consigue adaptarse a 50Ω con una resonancia de -30 dB en la frecuencia de trabajo.

Con el ancho de haz de este elemento se escoge una estructura óptima, en este caso de seis caras, en la cual poder situar los parches de tal forma que se consiga una caída de a lo sumo 3 dB en el plano horizontal.

Teniendo esta estructura escogida, se diseña la red de alimentación adecuada para conseguir el carácter omnidireccional. Se diseña una red de seis salidas que distribuya la potencia de forma uniforme sin ningún desfase.

Con el elemento unitario y la red diseñados el siguiente paso es la construcción de cada una de las piezas para su posterior montaje y medida. Pese a que la red añade un ligero desfase no deseado y a que se tuvo que modificar el punto de alimentación del parche el resultado medido en la cámara anecoica es bastante cercano al esperado, obteniendo una máxima caída de 8 dB en la frecuencia deseada y un valor medio de 5 dB.

Palabras clave

Antena, parche, *microstrip*, adaptación, impedancia, array conformado, red de alimentación, parámetros S, diagrama de radiación.

Abstract

The aim of this work is to create the design, the implementation and measure of a conformed patch antenna which presents an omnidirectional behavior in its horizontal plane with printed-circuit technology.

For this purpose, an initial design of the unitarian element at 3.5GHz has been carried out choosing its way of supply in order to, subsequent to know its behavior, being able to choose which structure would be the ideal one to meet the objectives. This design of a rectangular patch fed by the microstrip line gets adapted to 50Ω with a resonance of -30dB in its work frequency.

With the beam width of this element an optimal structure is chosen; in this case, a six faced one, in which the patches can be placed in such a way that a fall up to 3dB is achieved in the horizontal level.

Taking into account the chosen structure the adequate feeding network is designed to get the omnidirectional pattern. A six-faced network which can distribute the power in a uniform way without any phase difference is created.

Once the unitarian element and the feeding network have been designed the next step would be the building of each one of the pieces for their later assembly and measure. In spite of the unwanted phase difference added by the network and the fact that the feeding point of the patch had to be modified, the final result measured in the anechoic chamber is quite close to the expected one, obtaining a maximum fall of 8dB in the desired frequency with a medium value of 5dB .

Keywords

Antenna, patch, microstrip, match, impedance, conformed array, feed network, S parameters, radiation pattern.

Agradecimientos

Gracias a José Luis, mi tutor, por su tiempo, su paciencia, su ayuda y su noche sin dormir para corregir esto. Gracias al resto de miembros del RFCAS y a los cafés matutinos y vespertinos. Gracias a Pablo por haber sido el primero en atreverse a leer esto y compartir mis dudas existenciales sobre la arquitectura de la Escuela.

Gracias a todos mis compañeros de clase por haber hecho que el madrugar no doliera tanto. Gracias a Cule, Manu, Jaime, Victor Hugo, Carlos, Gabriel, Raquel, Sandra, Laura y sobre todo a mis dos compañeros de batalla, Diego y Edu, por aguantar mis accidentes, mis errores humanos de Paula, mis innumerables fallos de CST y mi gusto musical, a veces cuestionado. Y por tirarme de la silla cada vez que tenían, y tienen, oportunidad.

Durante estos cuatro años creo haber tenido la suerte de conocer a cinco personas fuera de lo común que han estado conmigo en lo bueno y, por desgracia, en lo malo. A Ángel, Tomé y Erik, por sacarme una sonrisa y estar ahí siempre que hiciera falta cuando mi cabeza estaba en su mundo, a Marta, por haber sido capaz de aguantarme durante tres años de cabezonería, prácticas y absurdecos, y a Ana, porque este año ha demostrado ser el mejor apoyo que una persona pueda tener, llevándome los cafés y lo que hiciera falta cuando mi pulso me fallaba.

Gracias a los que estaban ahí de antes, mis filólogos Sara, Álvaro, Bárbara y Elisa, Roberto, por las risas, los cafés, los Ocho y Medio y por todas las veces que nos queda por bailar Toro. Algún día nos iremos a Berlín.

Para ti, que empecé contigo y acabo sin ti e indirectamente me has enseñado muchas cosas. Always look on the bright side of life.

Por último, queda agradecer a los que han estado allí desde mucho mucho antes que nadie. A mi madre y mi padre, porque sin ellos todo esto habría sido un camino muy aburrido, y a mi hermano, que aunque hayamos discutido mucho y más no podría estar más orgullosa de él por haber conseguido uno de sus sueños. Sin vosotros tres, los ataques de risa comiendo, nuestras reuniones esporádicas en las habitaciones más pequeñas de la casa y vuestro apoyo incondicional en todo lo que he hecho, pelo azul incluido, nada de esto habría sido posible.

Paula Sánchez

Julio 2014

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	1
1.3	ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	2
2	ESTADO DEL ARTE	3
2.1	CONCEPTOS BÁSICOS DE ANTENAS	3
2.1.1	<i>Tipos de antena</i>	4
2.1.2	<i>Parámetros de una antena</i>	4
2.1.2.1	Impedancia de entrada y adaptación	4
2.1.2.2	Parámetros de dispersión	6
2.1.2.3	Diagrama de radiación	7
2.1.2.4	Ganancia, directividad y eficiencia	9
2.1.2.5	Polarización	11
2.2	ELEMENTOS RADIANTES	12
2.2.1	<i>Antenas microstrip: Parches</i>	12
2.2.1.1	Alimentación	13
2.3	ARRAYS	15
2.3.1	<i>Array lineal</i>	16
2.3.2	<i>Array planar</i>	17
2.3.3	<i>Array conformado</i>	18
3	DISEÑO DEL ELEMENTO RADIANTE	19
3.1	DISEÑO DEL PARCHÉ	19
4	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL	27
4.1	SELECCIÓN DEL CUERPO GEOMÉTRICO DE SOPORTE	27
4.2	SIMULACIÓN DE LA ESTRUCTURA	29
4.3	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SUJECIÓN	31
5	DISEÑO DE LA RED DE ALIMENTACIÓN	33
5.1	DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA UNIFORME	33
5.2	DISEÑO DEL CONTORNO Y BASE DE SUJECIÓN	36
6	CONSTRUCCIÓN Y MEDIDA	37
6.1	CONSTRUCCIÓN Y MEDIDA DEL ELEMENTO RADIANTE	37
6.2	CONSTRUCCIÓN Y MEDIDA DE LA RED DE ALIMENTACIÓN	44

6.3	CONSTRUCCIÓN Y MEDIDA DE LA ESTRUCTURA	45
7	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	55
7.1	CONCLUSIONES	55
7.2	TRABAJO FUTURO	55
	REFERENCIAS.....	57
	ANEXO A: SOFTWARE	I
	CST MICROWAVE STUDIO.....	I
	ADVANCED DESIGN SYSTEM (ADS).....	II
	ANEXO B: FABRICACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS	III

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Esquema de sistema de antena transmisora y receptora	3
Figura 2-2: Parámetros circuitales de la antena	5
Figura 2-3: Ondas reflejadas e incidentes en una red de n puertas	6
Figura 2-4: Coordenadas polares	7
Figura 2-5: Características del diagrama de radiación	8
Figura 2-6: Polarización lineal, circular y elíptica	11
Figura 2-7: Parche rectangular y circular	13
Figura 2-8: Alimentación de un parche por línea, coaxial, acoplamiento por proximidad y acoplamiento por ranura	14
Figura 2-9: Array lineal	16
Figura 2-10: Arrayplanar	17
Figura 2-11: Array conformado circular	18
Figura 3-1: Dimensiones del parche	20
Figura 3-2: Adaptación del primer diseño del elemento unitario, normalizado a 50Ω	21
Figura 3-3: Adaptación según la altura del sustrato, el punto de alimentación y el ancho del parche, normalizado a 50Ω	22
Figura 3-4: Diseño del conector	23
Figura 3-5: Parámetros S del conector a la entrada	23
Figura 3-6: Diseño final y dimensiones del parche	24
Figura 3-7: Adaptación del parche final	24
Figura 3-8: Ganancia en campo lejano en el plano horizontal $\Phi=0$, componente copolar (arriba) y contrapolar (abajo)	25
Figura 3-9: Ganancia en campo lejano en el plano vertical $\Phi=90$, componente copolar (arriba) y contrapolar (abajo)	26
Figura 4-1: Selección del exponente para modelo de campo eléctrico	27
Figura 4-2: Campo radiado para un radio fijo de en función del número de caras n	28
Figura 4-3: Array conformado de seis parches	29
Figura 4-4: Primera simulación de directividad de la estructura	30
Figura 4-5: Simulación de directividad de la estructura con mayor mallado	30
Figura 4-6: Cara lateral de la estructura de sujeción	31
Figura 4-7: Vista superior de la estructura de sujeción	32
Figura 5-1: Adaptación de la bifurcación (rojo) y de la rama (azul), normalizado a 100Ω	34

Figura 5-2: Diseño de la red completa.....	34
Figura 5-3: Reflexión a la entrada de la red, normalizado a 50Ω	35
Figura 5-4: Desfase y amplitud de la red de alimentación en sus salidas	35
Figura 5-5: Pieza de sujeción de la red de alimentación	36
Figura 6-1: Primer plano de construcción del parche	37
Figura 6-2: Adaptación del parche con alimentación a 8 mm (rojo), con cinta de cobre (azul) y con cinta de cobre soldada (morado), normalizado a 50Ω	38
Figura 6-3: Adaptación con punto de alimentación en 6.29 mm (rojo) e incrementos, normalizado a 50Ω	38
Figura 6-4: Gerber y construcción del parche	39
Figura 6-5: Adaptación de los 6 elementos	39
Figura 6-6: Diagramas de radiación normalizados del parche en el plano vertical.....	41
Figura 6-7: Diagramas de radiación normalizados del parche en plano horizontal	42
Figura 6-8: Ganancia del parche	43
Figura 6-9: Gerber y construcción de la red	44
Figura 6-10: Amplitud y fase de la red (salidas numeradas en sentido horario desde la entrada).....	45
Figura 6-11: Primera construcción de la estructura de sujeción.....	46
Figura 6-12: Antena final	46
Figura 6-13: Adaptación de red con parches en ADS (rojo), red con parches medida (azul) y parche (verde).....	47
Figura 6-14: Colocación de la antena para el plano vertical (izquierda) y horizontal (derecha)	48
Figura 6-15:Diagramas de radiación normalizados de la estructura en el plano vertical, parches 1 y 4	49
Figura 6-16: Diagramas de radiación normalizados de la estructura en el plano vertical, parches 2 y 5	50
Figura 6-17: Diagramas de radiación normalizados de la estructura en el plano vertical, parches 3 y 6	51
Figura 6-18: Diagramas de radiación normalizados en el plano horizontal	52
Figura 6-19: Ganancia de la estructura frente a la de un único parche	53
Figura A-1: Interfaz de CST	i
Figura A-2: Interfaz de ADS circuital (izquierda) y layout (derecha)	ii
Figura B-1: Fresadora LPKF ProtoMat S100.....	iii

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Hoy en día la tecnología de circuitos impresos está tomando cada vez más importancia a la hora de fabricar antenas gracias a su bajo coste, su facilidad de reproducción, su tamaño reducido o su facilidad de adaptación al entorno, entre otros.

En algunos casos los requerimientos de ganancia o diagrama de radiación no pueden ser satisfechos con un solo elemento. Por ello, muchas veces se recurre a agrupar varias de estas antenas individuales en un array. Combinando las características de un elemento unitario en esta agrupación se pueden mejorar considerablemente los resultados obtenidos. En función de cómo se coloquen estos elementos unitarios el array puede ser lineal, en un eje, planar, sobre un plano, o conformado, sobre una superficie tridimensional.

Los arrays conformados ofrecen una gran versatilidad en los diagramas de radiación gracias a las múltiples formas que pueden tomar. Por primera vez en esta Escuela, se va a diseñar y construir un array conformado de parches que permita en función de su alimentación cambiar su diagrama de radiación.

1.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es diseñar, implementar y medir una antena de parches conformada mediante tecnología impresa. Dicha antena deberá tener un diagrama de radiación omnidireccional en su plano horizontal.

Otro de los objetivos es que en función de la red de alimentación, la antena sea capaz de cambiar su comportamiento en radiación, por ejemplo, de un carácter omnidireccional a otro sectorial.

Para poder cumplir dichos objetivos el trabajo será enfocado de forma progresiva. En primer lugar, se diseñará un elemento unitario lo mejor adaptado posible para posteriormente decidir, en base a este elemento, qué estructura es la más adecuada para el array y cuántos elementos lo formarán. Sabiendo esto, se pasará a diseñar una red de alimentación que permita comprobar el comportamiento

omnidireccional de la estructura y, con todos los elementos ya simulados, se procederá a su implementación y medida, contrastando los resultados obtenidos con los deseados.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción.** Motivación, objetivos y estructura de la memoria del trabajo.
- **Capítulo 2: Estado del arte.** Resumen de las principales características que definen a una antena. Análisis del tipo de elemento radiante a utilizar. Definición y tipos de agrupaciones de antenas.
- **Capítulo 3: Diseño del elemento radiante.** Diseño y simulaciones del parche.
- **Capítulo 4: Diseño de la estructura tridimensional.** Selección, diseño y simulación de la estructura radiante.
- **Capítulo 5: Diseño de la red de alimentación.** Diseño y simulación de la red de alimentación para la estructura seleccionada.
- **Capítulo 6: Construcción y medida.**
- **Capítulo 7: Conclusión y trabajo futuro.** Conclusiones extraídas de las medidas y las simulaciones. Posibles mejoras y líneas de trabajo futuro.
- **Referencias.**

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Conceptos básicos de antenas

Según el IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineering) una antena es “un dispositivo generalmente metálico creado con el objetivo de radiar o recibir ondas electromagnéticas “y que además “adapta la salida del transmisor o entrada del receptor al medio” [1].

Las antenas se caracterizan por su comportamiento en radiación, directividad, ganancia, polarización, impedancia y ancho de banda.

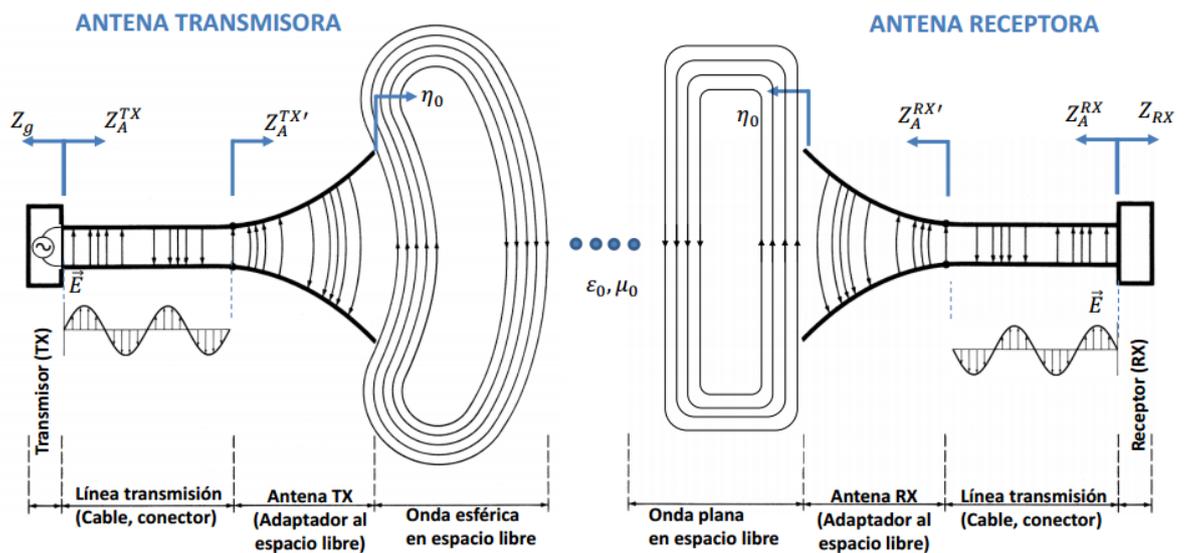


Figura 2-1: Esquema de sistema de antena transmisora y receptora

2.1.1 Tipos de antena

Teniendo en cuenta la cantidad de parámetros que pueden definir a una antena, existen múltiples variedades de las mismas:

- **Antenas lineales:** aquellas construidas con hilos conductores eléctricamente delgados, por ejemplo, dipolos.
- **Antenas microstrip:** aquellas fabricadas en circuito impreso con espesores menores a $0.2\lambda_0$, por ejemplo parches.
- **Antenas de apertura:** aquellas en las que la radiación sale a través de una embocadura, por ejemplo ranuras y bocinas.
- **Agrupaciones:** conjunto de cualquier tipo de antena simple.
- **Antenas inteligentes:** agrupaciones de antenas que permiten adaptar las características de radiación en función al entorno gracias a un algoritmo de procesamiento.

2.1.2 Parámetros de una antena

Los parámetros característicos de una antena son aquellos que nos permiten analizarla como una caja negra, ya sean de carácter circuital, como podrían ser la impedancia o la adaptación, o direccional, como la ganancia, el diagrama de radiación o la polarización.

2.1.2.1 Impedancia de entrada y adaptación

La impedancia de entrada de una antena es aquella que queda definida en su borde. Sin embargo, si se considera que la línea de transmisión con la cual se une al generador como parte de la misma, quedaría definida no a los bornes de la antena si no en los de la línea de transmisión.

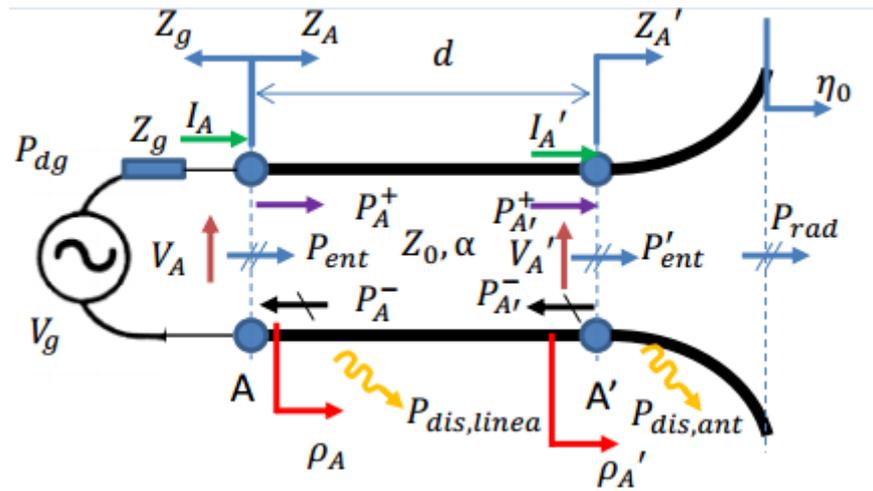


Figura 2-2: Parámetros circuitales de la antena

Si se considera el voltaje que cae a la entrada de la línea V_A y a la corriente que entrega el generador I_A la impedancia de entrada a la antena quedaría como

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = R_A + jX_A \quad (2-1)$$

Normalmente el objetivo del diseño es conseguir que la parte imaginaria X_A de la impedancia sea lo más próxima a 0 y con ello conseguir una mejor resonancia.

Por otro lado, la resistencia de entrada R_A puede separarse en dos diferentes resistencias, una de pérdidas y otra de radiación, mediante las cuales podemos sacar las potencias radiadas y disipadas.

$$R_A = R_{perd} + R_{rad} \rightarrow P_{ent} = \frac{1}{2} |I_A|^2 R_A \rightarrow P_{rad} = \frac{1}{2} |I_A|^2 R_{rad}; \quad P_{dis,tot} = \frac{1}{2} |I_A|^2 R_{perd} \quad (2-2)$$

Otros parámetros importantes a la hora de definir una antena son el coeficiente de reflexión ρ_A , el cual relaciona la onda reflejada con la onda incidente en una discontinuidad, y el coeficiente de adaptación Γ_A , el cual indica la transferencia de potencia entre discontinuidades.

$$\rho_A = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (2-3)$$

$$\Gamma_A = \frac{Z_A - Z_g^*}{Z_A + Z_g} \quad (2-4)$$

Que una de ellas sea nula no implica que la otra lo sea y viceversa, es decir, se puede conseguir máxima transmisión de potencia teniendo onda reflejada o no tener onda reflejada y que no haya máxima transmisión de potencia.

2.1.2.2 Parámetros de dispersión

Los parámetros de dispersión, también conocidos como parámetros S, se encargan de describir el comportamiento de cualquier dispositivo de microondas. Cada uno de los terminales tiene dos puertos donde quedan definidas la onda incidente (a_i), entrante a la red, y la reflejada (b_i), saliente.

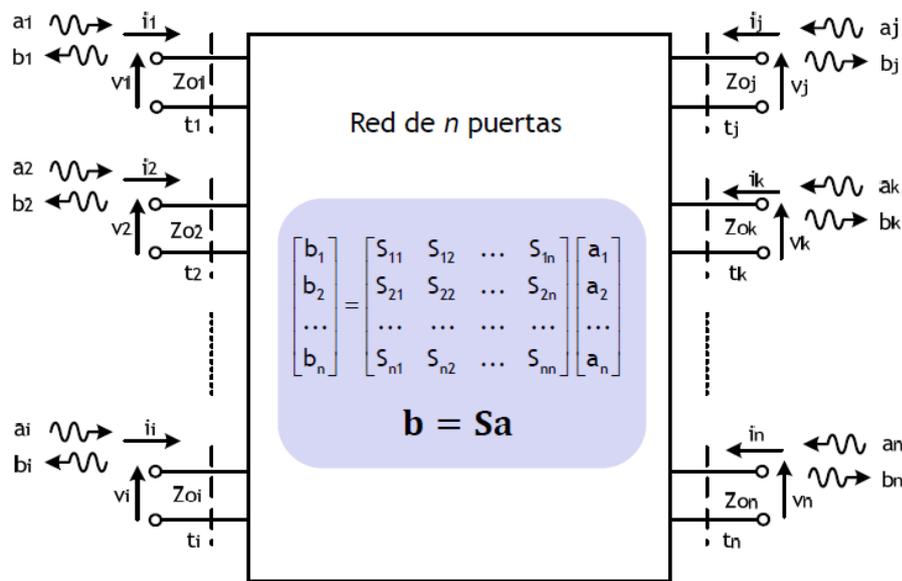


Figura 2-3: Ondas reflejadas e incidentes en una red de n puertos

La matriz de parámetros s es la encargada de relacionar estas ondas incidentes y reflejadas de la red. En el caso de un sistema de dos puertos quedaría definida como

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

Para poder calcular cada parámetro s_j hay que cargar cada uno de los terminales de la red con la impedancia característica del mismo, salvo el i -ésimo terminal al cual habrá que conectar un generador que produzca la onda incidente. Al tener todas las demás ondas incidentes a cero, queda definido como

$$s_{ji} = \left(\frac{b_j}{a_i} \right), a_k = 0 \quad \forall k \neq i \quad (2-6)$$

En el caso de un sistema de dos puertos, los parámetros S quedarían definidos de la siguiente forma:

- **S₁₁: Reflexión a la entrada.** Relación entre la onda de potencia que se refleja en el terminal 1 cuando se genera una onda incidente en el terminal 1.
- **S₁₂: Transmisión o ganancia inversa.** Relación entre la onda de potencia que llega al terminal 1 cuando se alimenta la red por el terminal 2.
- **S₂₁: Transmisión o ganancia directa.** Relación entre la onda de potencia que llega al terminal 2 cuando se alimenta la red por el terminal 1.
- **S₂₂: Reflexión a la salida.** Relación entre la onda de potencia que se refleja en el terminal 2 cuando se genera una onda incidente en el terminal 2.

2.1.2.3 Diagrama de radiación

Un diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena. Para ello, se utiliza un sistema de coordenadas esférico.

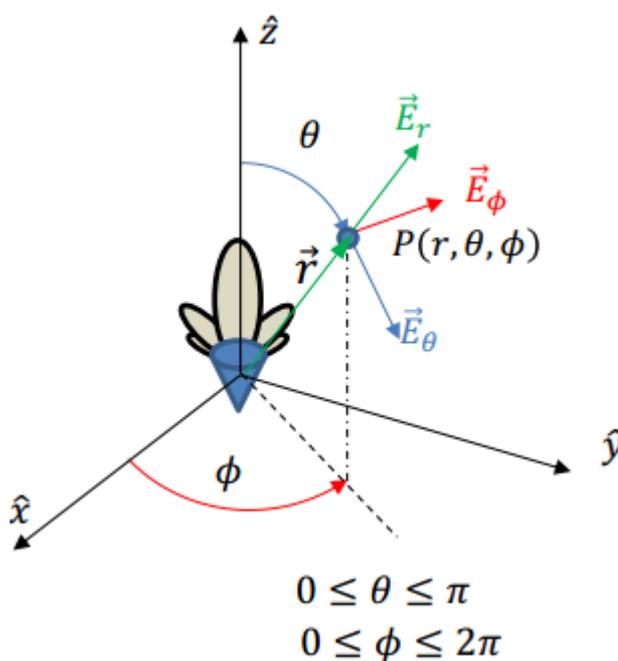


Figura 2-4: Coordenadas polares

De esta forma, el campo queda definido por tres componentes, una en función de cada nueva variable

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}(r, \theta, \phi) = \vec{E}_r(r, \theta, \phi) + \vec{E}_\theta(r, \theta, \phi) + \vec{E}_\phi(r, \theta, \phi) \quad (2-5)$$

La densidad de potencia que transporta la onda esférica radiada por la antena queda definida como

$$\langle \vec{S}(r, \theta, \phi) \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E}(r, \theta, \phi) \times \vec{H}^*(r, \theta, \phi)] \quad (2-6)$$

Para poder observar el diagrama de radiación en coordenadas cartesianas se realizan cortes del diagrama tridimensional para un θ o ϕ fijos. En antenas directivas y con polarización lineal es suficiente con conocer cómo se comporta la antena en los dos planos principales: el plano E, que contiene al vector E y la dirección de máxima radiación, y el plano H, que contiene el vector H e igualmente la dirección de máxima radiación.

Las principales características que se pueden extraer de un diagrama de radiación son:

- **Lóbulo principal:** lóbulo con el máximo de radiación.
- **Lóbulos secundarios:** resto de lóbulos.
- **Lóbulos laterales:** lóbulos colindantes al principal.
- **Nivel de lóbulos secundarios (SLL):** relación entre los niveles del lóbulo principal y los laterales.
- **Ancho de haz a -3 dB:** Ancho entre puntos del lóbulo principal con una caída de la mitad de la potencia.
- **Ancho de haz entre nulos:** Ancho entre dos nulos consecutivos

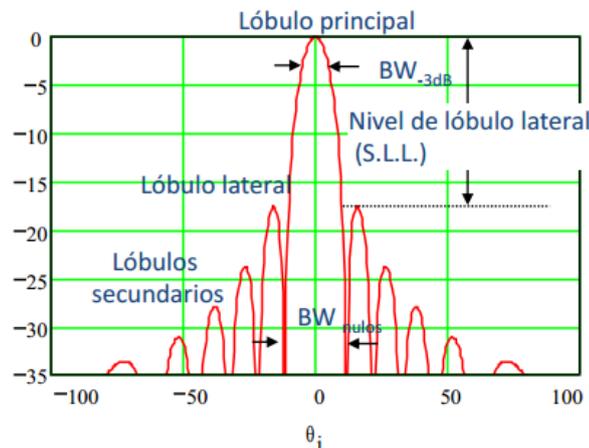


Figura 2-5: Características del diagrama de radiación

2.1.2.4 Ganancia, directividad y eficiencia

Para poder definir los parámetros de directividad, ganancia y eficiencia es necesario definir previamente el ángulo sólido y la intensidad de radiación.

El ángulo sólido es el equivalente tridimensional del radián: es la superficie que abarca un cono formado por radios desde el centro de una esfera. Su unidad son los estereorradianes.

$$d\Lambda = \frac{dS}{r^2} = \frac{r^2 \sin\theta d\theta d\phi}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi \quad (2-7)$$

La intensidad de radiación es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido, lo cual indica cuánta energía es capaz de emitir en una dirección concreta.

$$U(\theta, \phi) = \frac{P_{rad}}{d\Lambda} = \frac{|\langle \vec{S}(r, \theta, \phi) \rangle| dS}{d\Lambda} = r^2 |\langle \vec{S}(r, \theta, \phi) \rangle| \quad (2-8)$$

A partir de esta intensidad de radiación U también se puede obtener la potencia radiada por una antena

$$P_{rad} = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} U(\theta, \phi) d\Lambda = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} U(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (2-9)$$

La ganancia directiva $D(\theta, \phi)$ relaciona la intensidad de radiación de la antena en cada dirección del espacio con aquella de una antena isotrópica que radiara la misma potencia total.

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{isotr\acute{o}pico}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} = 4\pi \frac{r^2 |\langle \vec{S}(r, \theta, \phi) \rangle|}{P_{rad}} \quad (2-10)$$

La directividad D_0 es el valor que toma la ganancia directiva en la dirección de máxima radiación.

La ganancia de potencia $G(\theta, \phi)$ relaciona la intensidad de radiación de la antena con la de una antena isotrópica que, en este caso, aceptase la misma potencia entregada que aquella que se está estudiando.

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{ent}} = 4\pi \frac{r^2 |\langle \vec{S}(r, \theta, \phi) \rangle|}{P_{ent}} \quad (2-11)$$

Igual que con la directividad, la ganancia máxima G_0 es el valor que toma la ganancia de potencia en su dirección de máxima radiación.

El rendimiento o la eficiencia total de una antena mide las pérdidas totales en los terminales de entrada y en la estructura de la antena.

$$\zeta_{tot} = \frac{P_{rad}}{P_{dg}} \quad (2-12)$$

Esta eficiencia total, al igual que la resistencia de la antena, se puede subdividir en otras tres eficiencias las cuales contemplaran las tres principales causas de pérdidas en la antena:

- **Eficiencia de conductores $\zeta_{dis,c}$ y de dieléctricos $\zeta_{dis,d}$:** indican la pérdida de eficiencia en la antena por pérdidas en los conductores y dieléctricos que la componen.

Estas dos eficiencias se unen en la eficiencia de radiación

$$\zeta_{rad} = \zeta_{dis,c} \cdot \zeta_{dis,d} = \frac{P_{rad}}{P_{ent}} = \frac{D_0}{G_0} \quad (2-13)$$

Por lo tanto, con este valor se encuentra una relación directa entre ganancia y directividad

$$G(\theta, \phi) = \zeta_{rad} \cdot D(\theta, \phi) \quad (2-14)$$

- **Eficiencia de adaptación ζ_{adap} :** indica las pérdidas de eficiencia en la antena por desadaptación al transmisor o receptor.

$$\zeta_{adap} = \frac{P_{ent}}{P_{dg}} = 1 - \Gamma_A \quad (2-15)$$

La eficiencia total evalúa todas las razones por las que se producen pérdidas en la antena

$$\zeta_{tot} = \zeta_{adap} \cdot \zeta_{dis,c} \cdot \zeta_{dis,d} = \zeta_{adap} \cdot \zeta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{dg}} \quad (2-16)$$

2.1.2.5 Polarización

La polarización del campo radiado por una antena es la figura que traza a lo largo del tiempo en una misma dirección el vector del campo radiado junto con su sentido de giro. Esta forma es definida estando el observador en la antena.

En función de cómo sea esta forma que trace el campo radiado se clasifica el tipo de polarización:

- **Polarización lineal:** el campo que se proyecta sobre el plano del observador es sobre una línea recta.
- **Polarización circular:** el campo que se proyecta sobre el plano del observador se mueve sobre una circunferencia. En función del sentido de giro puede ser polarización circular a izquierdas o polarización circular a derechas.
- **Polarización elíptica:** el campo que se proyecta sobre el plano del observador se mueve sobre una elipse. En función del sentido de giro puede ser polarización circular a izquierdas o polarización circular a derechas.

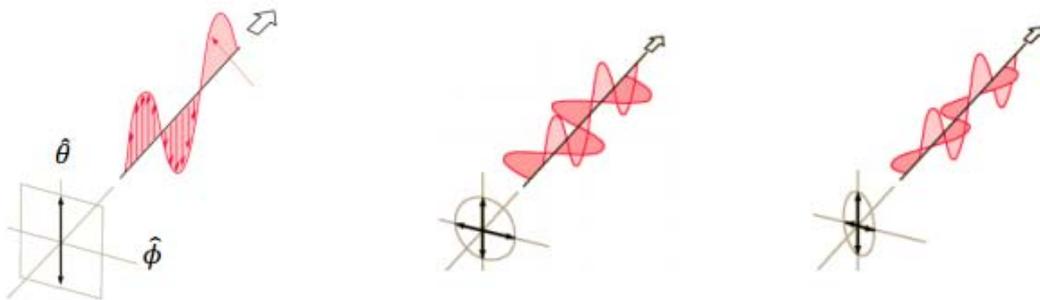


Figura 2-6: Polarización lineal, circular y elíptica

Este campo radiado puede ser representado como dos componentes ortogonales entre sí: una tiene la polarización deseada (copolar) y otra con una polarización contraria a la que ya se tiene (contrapolar).

$$\vec{E}(r, \theta, \phi) = E_{cp}(r, \theta, \phi)\hat{u}_{cp} + E_{xp}(r, \theta, \phi)\hat{u}_{xp} \quad (2-17)$$

En el caso de la polarización lineal se pueden transformar las componentes E_θ y E_ϕ en copolar y contrapolar.

$$\vec{E}_{cp}(r, \theta, \phi) = E_\theta(r, \theta, \phi)\sin\phi + E_\phi(r, \theta, \phi)\cos\phi \quad (2-18)$$

$$\vec{E}_{xp}(r, \theta, \phi) = E_\theta(r, \theta, \phi)\cos\phi - E_\phi(r, \theta, \phi)\sin\phi \quad (2-19)$$

Por otro lado, si se tratara de polarización circular estas componentes del campo se convierten en circular a derechas RHCP y a izquierdas LHCP, ya que en la polarización circular no se habla de copolar y contrapolar.

$$\vec{E}_{RHCP}(r, \theta, \phi) = \frac{1}{2}(E_\theta(r, \theta, \phi) - jE_\phi(r, \theta, \phi))e^{-j\phi} \quad (2-20)$$

$$\vec{E}_{LHCP}(r, \theta, \phi) = \frac{1}{2}(E_\theta(r, \theta, \phi) + jE_\phi(r, \theta, \phi))e^{j\phi} \quad (2-21)$$

2.2 Elementos radiantes

Los elementos radiantes que conforman una antena pueden ser de diversos tipos, como podrían ser las ranuras o los dipolos. En este apartado se tratarán aquellos con los cuales se ha trabajado: los parches.

2.2.1 Antenas microstrip: Parches.

En un circuito *microstrip* las líneas de transmisión están diseñadas de tal forma que la potencia disipada en forma de radiación sea la menor posible. Aun así, es imposible eliminar dichas pérdidas, de lo cual se aprovecha la tecnología de las antenas *microstrip*. Sabiendo que cuanto mayor sea el

ancho de la línea mayor será la potencia disipada en radiación se crea el elemento radiante que es el parche, que no es más que una línea de transmisión con unas dimensiones cercanas a la de la longitud de onda. Las formas que puede tener este elemento son muy variadas, aunque las más utilizadas son la rectangular y la circular.

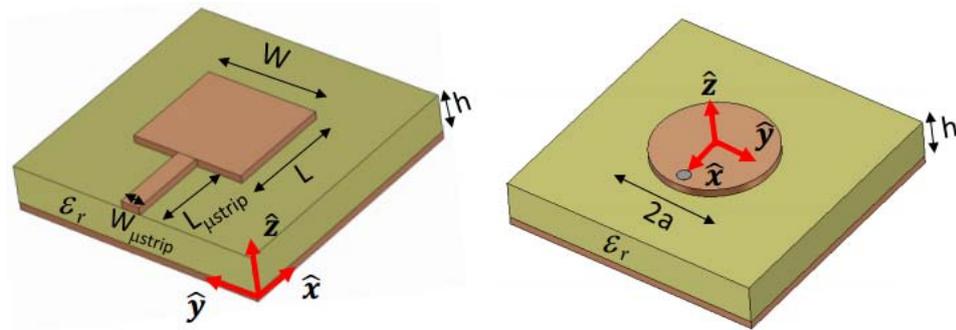


Figura 2-7: Parche rectangular y circular

Las principales ventajas de estos elementos son su sencillez y bajo precio a la hora de su fabricación, su robustez, su facilidad a la hora de incluirse en circuitos integrados y su versatilidad en lo relativo a la polarización o a la frecuencia de resonancia. Sin embargo, tienen una eficiencia y potencia limitada y una banda de trabajo muy estrecha.

2.2.1.1 Alimentación

Hay múltiples formas para alimentar las antenas de parche. Las cuatro más típicas son las siguientes:

- **Alimentación por línea *microstrip*:** se utiliza una línea *microstrip* con un ancho considerablemente menor que el del parche. Es una alimentación sencilla de construir, de adaptar y de modelar. Sin embargo, si el sustrato es demasiado grueso pueden aumentar las ondas de superficie y la radiación espúrea, reduciendo así el ancho de banda del parche que ya de por sí es limitado.
- **Alimentación por coaxial:** el alma del conector es soldada verticalmente al parche mientras que el conductor exterior es unido al plano de masa. Al igual que la línea *microstrip*, es muy sencilla de fabricar e implementar e incluso disminuye la radiación espúrea, pero el ancho de banda disminuye igualmente y es mucho más difícil de diseñar.

- **Alimentación por acoplamiento por proximidad:** tiene el mayor ancho de banda de las cuatro, pudiendo alcanzar el 13%, es fácil de diseñar y tiene poca radiación espúrea pero su construcción es más difícil que las anteriores.
- **Alimentación por acoplamiento por ranura:** es la más difícil de fabricar de las cuatro y tiene un ancho de banda muy estrecho. Sin embargo, es algo más sencillo de modelar y tiene poca radiación espúrea. La ranura de acoplamiento está formada por dos sustratos separados por un plano de masa. En el sustrato inferior hay una línea *microstrip* de alimentación la cual acopla al parche a través de la ranura que hay entre ambos sustratos.

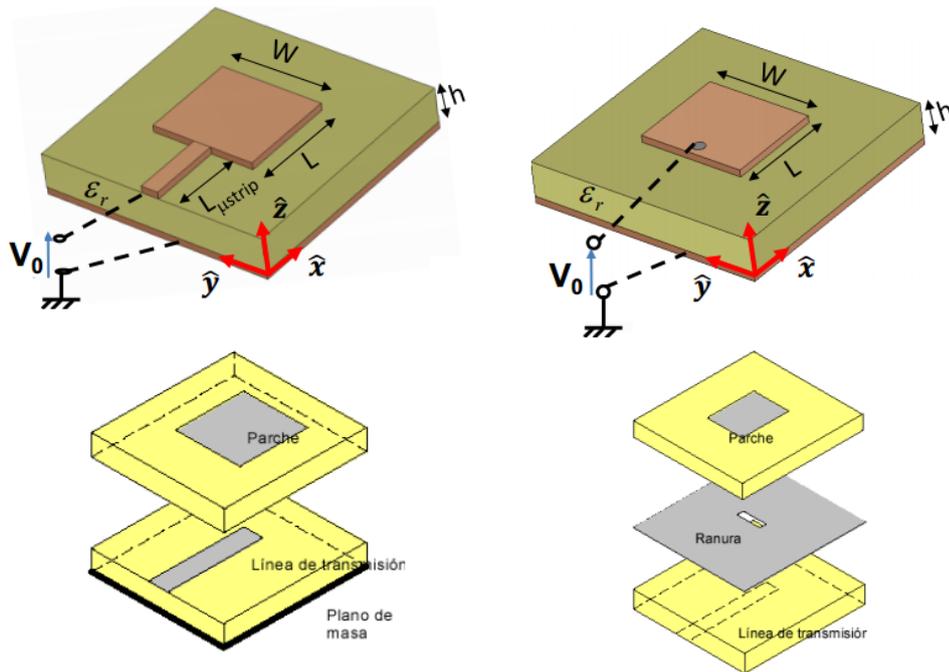


Figura 2-8: Alimentación de un parche por línea, coaxial, acoplamiento por proximidad y acoplamiento por ranura

Hay que tener en cuenta que la impedancia del parche se puede ver modificada si la alimentación que se utiliza es por *microstrip* o por coaxial, por lo que habrá que ver cómo afecta al diseño el uso de estas alimentaciones.

2.3 Arrays

Para algunas aplicaciones, con una antena formada por un solo elemento no se pueden alcanzar los requerimientos necesarios, como puede ser la ganancia o una mayor directividad, sin tener que aumentar sus dimensiones de forma considerable. Es por ello que surgen los arrays: un conjunto de antenas, normalmente las mismas, ordenadas en el espacio que se comportan como una sola.

Los factores que definen a un array son:

- La colocación geométrica del array.
- El espaciado entre los elementos.
- La amplitud con la que se alimenta cada elemento.
- La fase con la que se alimenta cada elemento.
- El diagrama de radiación de cada elemento.

El campo radiado por el n-ésimo elemento del array queda definido como el campo radiado por el mismo elemento si estuviera situado en el origen de coordenadas, $\vec{E}_{n,0}(r, \theta, \phi)$, evaluado en su nueva posición definida por el vector \vec{r}_n con el coeficiente I_n de alimentación que le corresponde.

$$\vec{E}_n(r, \theta, \phi) = \vec{E}_{n,0}(r, \theta, \phi) \cdot \frac{I_n}{I_0} \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_n} \quad (2-22)$$

El campo total radiado por el array es el sumatorio de todos aquellos radiados por cada elemento.

$$\vec{E}_A(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \vec{E}_n(r, \theta, \phi) = \vec{E}_0(r, \theta, \phi) \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_n} \quad (2-23)$$

siendo el vector unitario

$$\hat{r} = \sin\theta \cdot \cos\phi \cdot \hat{x} + \sin\theta \cdot \sin\phi \cdot \hat{y} + \cos\theta \cdot \hat{z} \quad (2-24)$$

Si todos los elementos son iguales se puede sacar del sumatorio el campo radiado en el origen, quedando un único sumatorio que contiene la alimentación y la fase de cada elemento denominado Factor de Array.

$$F_A(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_n} \quad (2-25)$$

En función de cómo estén distribuidos los elementos que compongan un array estos pueden ser arrays lineales, arrays planos o arrays conformados

2.3.1 Array lineal

Un array lineal se define como un conjunto de N elementos situados sobre un mismo eje.

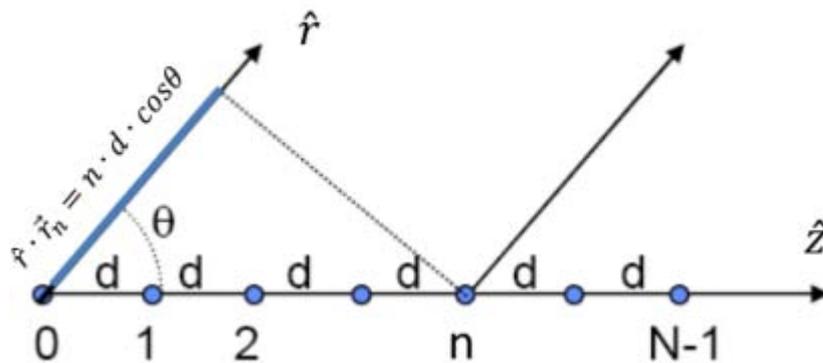


Figura 2-9: Array lineal

Suponiendo que los elementos que lo forman son iguales y que equidistan entre sí, su vector de posición quedaría definido como $\vec{r}_n = n \cdot d \cdot \hat{z}$ y su alimentación como $A_n = a_n \cdot e^{j\alpha_n}$, con lo que el factor de array quedaría como

$$F_A(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N a_n \cdot e^{j(n \cdot k_0 \cdot d \cdot \cos\theta + \alpha_n)} \quad (2-26)$$

En función de cómo se alimente el array, se obtendrá un comportamiento distinto. Los más comunes son:

- Fase progresiva. $A_n = a_n \cdot e^{jn\alpha}$
- Uniforme en amplitud y en fase. $A_n = 1, \forall n$
- Uniforme en amplitud y fase progresiva. $A_n = e^{jn\alpha}$
- Taper: amplitud simétrica y decreciente del centro al borde.

2.3.2 Array planar

Si en vez de colocar los elementos sobre un eje se colocan sobre un plano se obtiene un array planar.

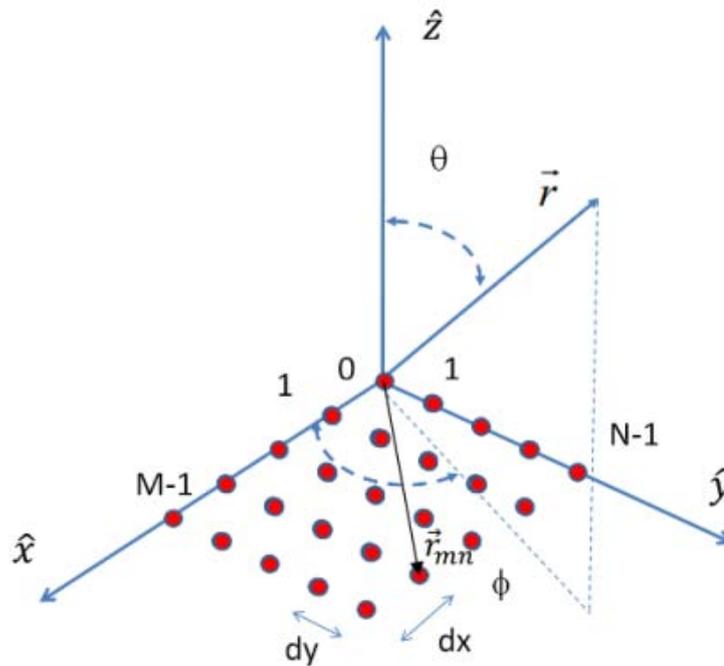


Figura 2-10: Array planar

La forma de obtener el factor de array de esta distribución es muy similar a la lineal, pero teniendo en cuenta que al ser bidimensional el vector de posición quedaría definido como $\vec{r}_{mn} = md_x \hat{x} + md_y \hat{y}$, por lo que el factor de array queda como

$$F_A(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_{mn}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} \cdot e^{j(m \cdot k_0 \cdot d_x \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi)} \cdot e^{j(n \cdot k_0 \cdot d_y \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi)} \quad (2-27)$$

2.3.3 Array conformado

El último tipo de array, que será el que se utilice en este trabajo, es el conformado. En este caso, los elementos radiantes se disponen sobre una forma específica como podría ser un cilindro, una pirámide o un prisma.

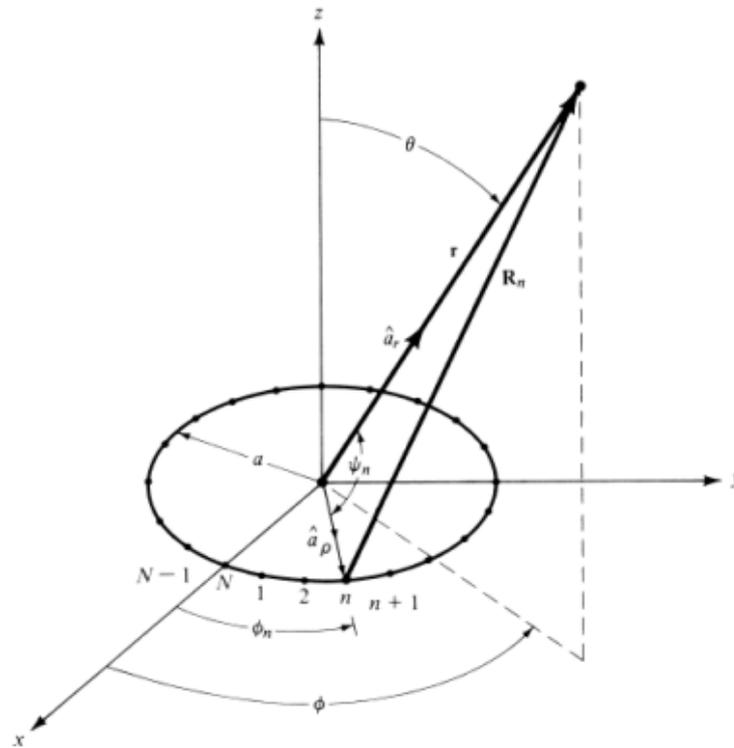


Figura 2-11: Array conformado circular

La mayor variación que se observa en el factor de array frente a los otros dos tipos es que en este caso no podemos separarlo del campo E_0 ya que, aunque los elementos sean los mismos, al estar sobre una superficie tridimensional la dirección de máximo apuntamiento de cada uno no es igual por lo que no es suficiente con replicar este campo sino que también hay que orientarlo en función de la posición. Es por esto que en este caso se da la fórmula del campo total radiado:

$$\vec{E}_A(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \vec{E}_n(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \vec{E}_{0,n}(r, \theta, \phi) \cdot A_n \cdot e^{jk_0 \hat{r} \cdot \vec{r}_n} \quad (2-27)$$

3 DISEÑO DEL ELEMENTO RADIANTE

El objetivo de este trabajo es conseguir una antena de parches conformada que, en función de su alimentación, varíe su comportamiento en radiación. Para ello el primer paso debe ser el diseño de un elemento unitario en el cual se consiga la mejor adaptación posible en la frecuencia de trabajo. La frecuencia a la que se ha decidido trabajar es de 3.5 GHz.

3.1 Diseño del parche

De las dos formas básicas de un parche se escoge la rectangular frente a la circular ya que tendrá dos dimensiones que podrán variar para conseguir la adaptación a 50Ω : la longitud (L) y el ancho (W).

Para diseñar el parche rectangular existen una serie de expresiones descritas en [4], de las cuales se extraen los valores de W y L para tener una buena eficiencia de radiación.

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3-1)$$

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} = \frac{c_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (3-2)$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\varepsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (3-3)$$

Como se puede observar, estos valores no sólo dependen de la frecuencia y la calidad del material sino del espesor h del mismo. Si se aumenta el valor de esta variable se obtiene mayor ancho de banda. Si por el contrario es menor, las pérdidas por ondas de superficie disminuyen.

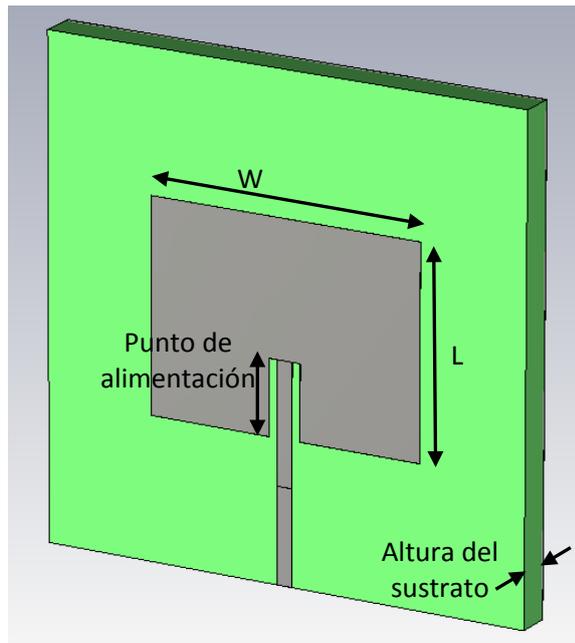


Figura 3-1: Dimensiones del parche

Partiendo del sustrato RF35 de 0.508 mm de grosor con constante dieléctrica ϵ_r se obtendría un parche de las siguientes dimensiones:

$$W=28.55 \text{ mm}$$

$$L=22.79 \text{ mm}$$

Otro punto a tener en cuenta es la forma de alimentar el parche. Se escogió la línea *microstrip* ya que es la técnica que mejor permite controlar la impedancia de entrada del parche. Sabiendo que el objetivo a conseguir es una impedancia lo más cercana a $Z=50 \Omega$ y utilizando las fórmulas de [5]

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) \right] \quad (3-4)$$

siendo

$$B = \frac{60\pi^2}{Z\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3-5)$$

se obtendría una línea de 1.15mm de ancho.

Tras implementar este diseño en CST se extraen los datos de parámetros S para poder analizarlos en ADS. Para poder observar correctamente la impedancia del parche hay que tener en cuenta que en CST hay una línea *microstrip* que alimenta al parche. Para ver sólo el elemento radiante se sitúa a la entrada una línea de las características de la implementada pero con su longitud en negativo, lo cual permitirá desplazarse hacia el punto donde comienza la antena.

Se puede observar en la figura 3-2 cómo el objetivo de tener la mejor adaptación posible en la frecuencia de trabajo no se cumple.

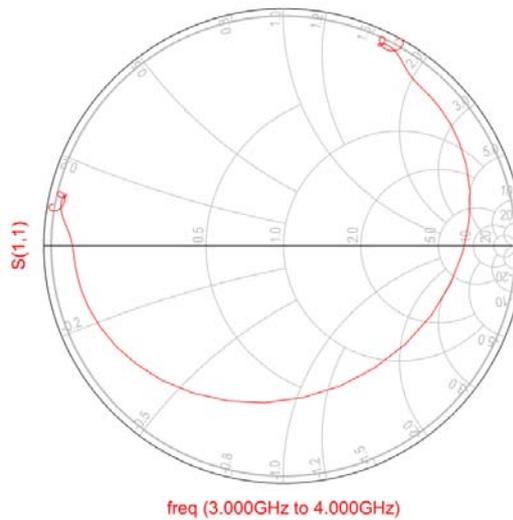


Figura 3-2: Adaptación del primer diseño del elemento unitario, normalizado a 50 Ω

Por ello, se realizan varias pruebas para optimizar el elemento unitario teniendo en cuenta que las variables que se podrían modificar son el ancho del parche, el espesor del sustrato y el punto de alimentación dentro del parche, indicados en la figura 3-1.

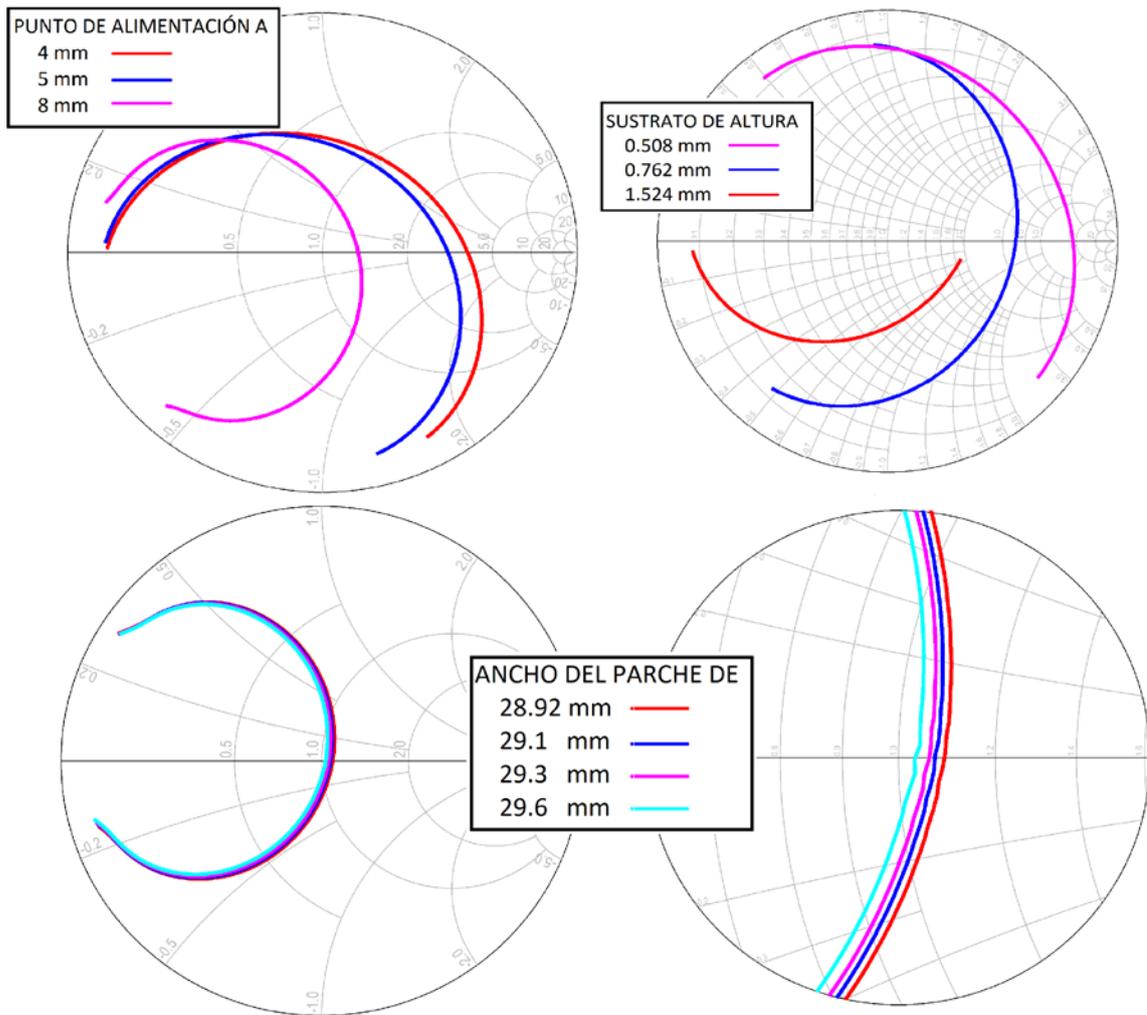


Figura 3-3: Adaptación según la altura del sustrato, el punto de alimentación y el ancho del parche, normalizado a 50 Ω

Tras varias pruebas con el sustrato inicial RF35 de 0.508 mm se puede observar que la adaptación requeriría nuevos elementos en el parche, como podría ser un *stub*. Para poder seguir con un diseño lo más sencillo posible se mantiene el material pero cambiando su espesor al inmediatamente superior de 0.762 mm. Las medidas finales del parche son:

$$W=29.6 \text{ mm}$$

$$L=22.46 \text{ mm}$$

$$\text{Punto de alimentación}=8\text{mm}$$

Tras tener el parche ya diseñado se pasa a añadirle el conector que posteriormente llevará soldado para así ver cómo afectaría a la impedancia de entrada del parche.

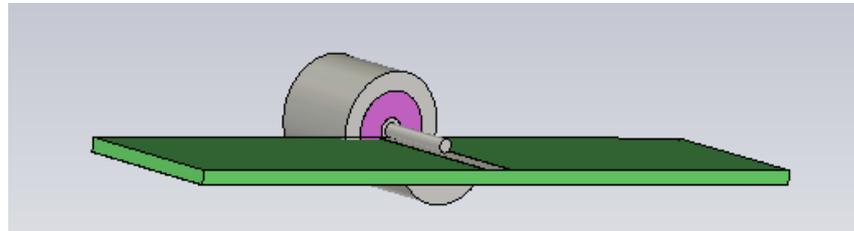


Figura 3-4: Diseño del conector

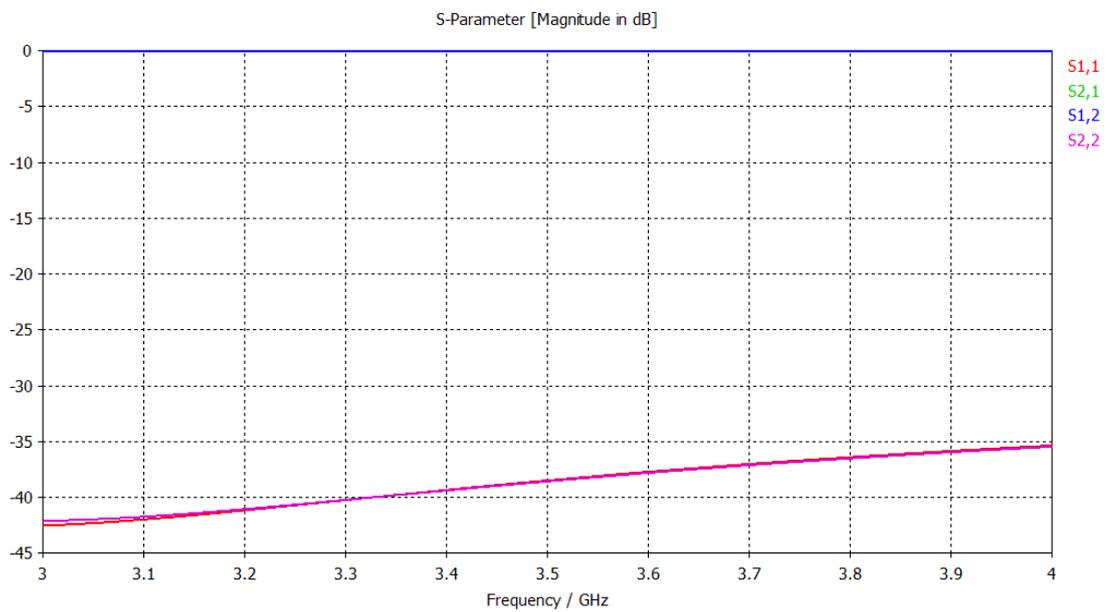


Figura 3-5: Parámetros S del conector a la entrada

Por último, para poder contrastar los resultados con las medidas, añadimos los taladros y tornillos que posteriormente se utilizarán en la cámara anecoica para realizar las medidas de radiación. Puesto que las cabezas de los mismos sobresaldrían del sustrato se aumenta su tamaño 6 mm por lado.

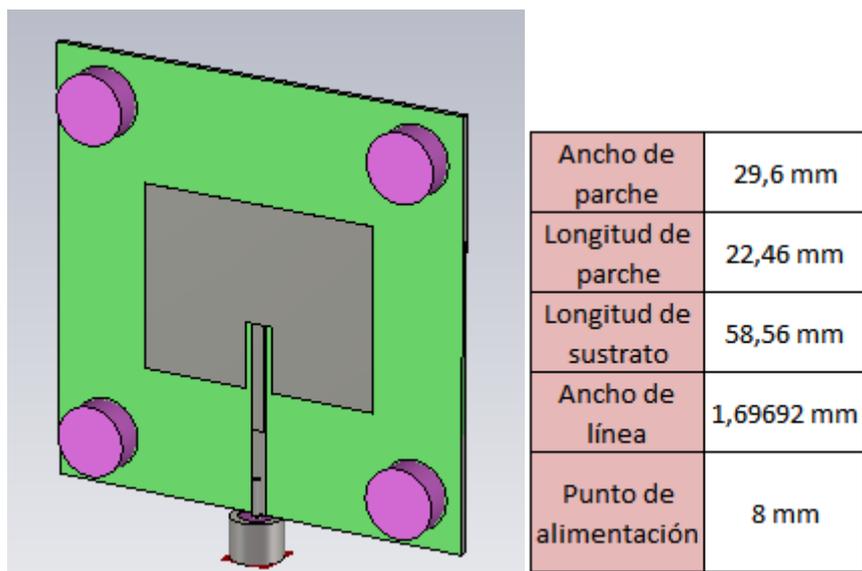


Figura 3-6: Diseño final y dimensiones del parche

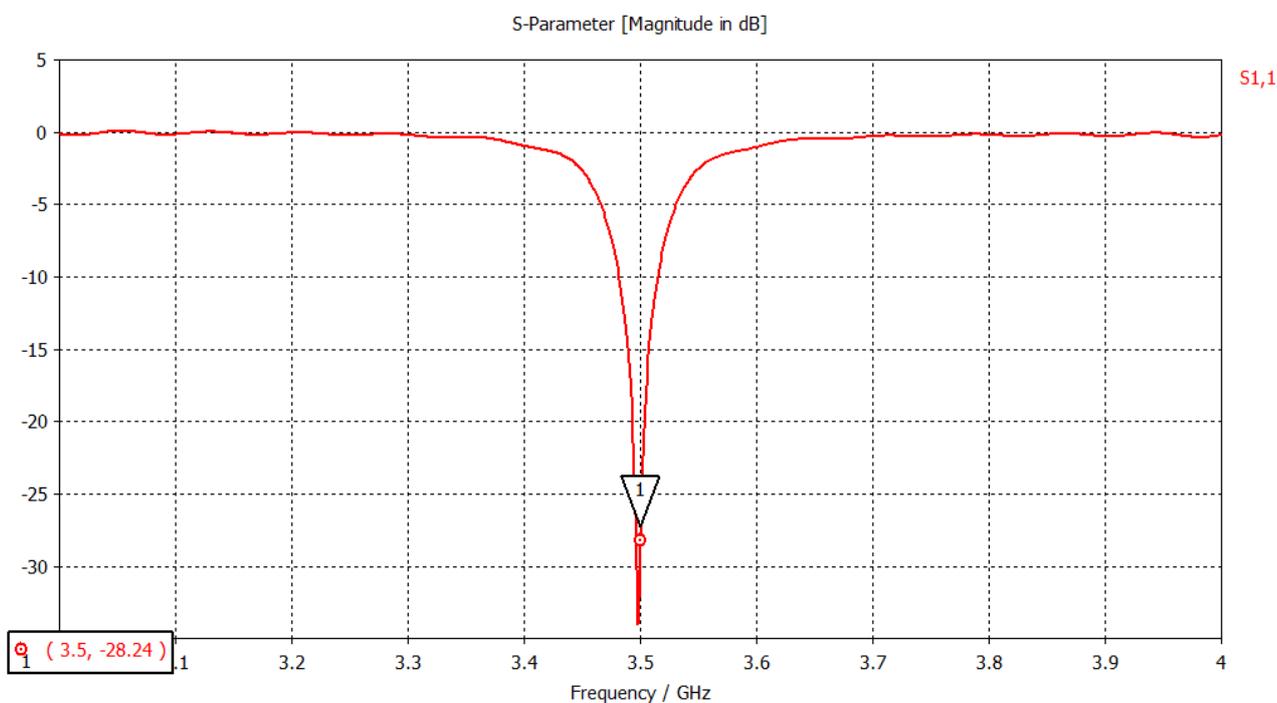


Figura 3-7: Adaptación del parche final

Tras haber decidido definitivamente las dimensiones del parche para que quede lo mejor adaptado posible se procede a analizar su diagrama de radiación para obtener su ancho de haz en el plano horizontal, el cual será determinante en el siguiente paso del diseño puesto que se ha decidido que la conformación del array se hará en torno a dicho plano.

Se observa un ancho de haz a -3 dB de 85.6°.

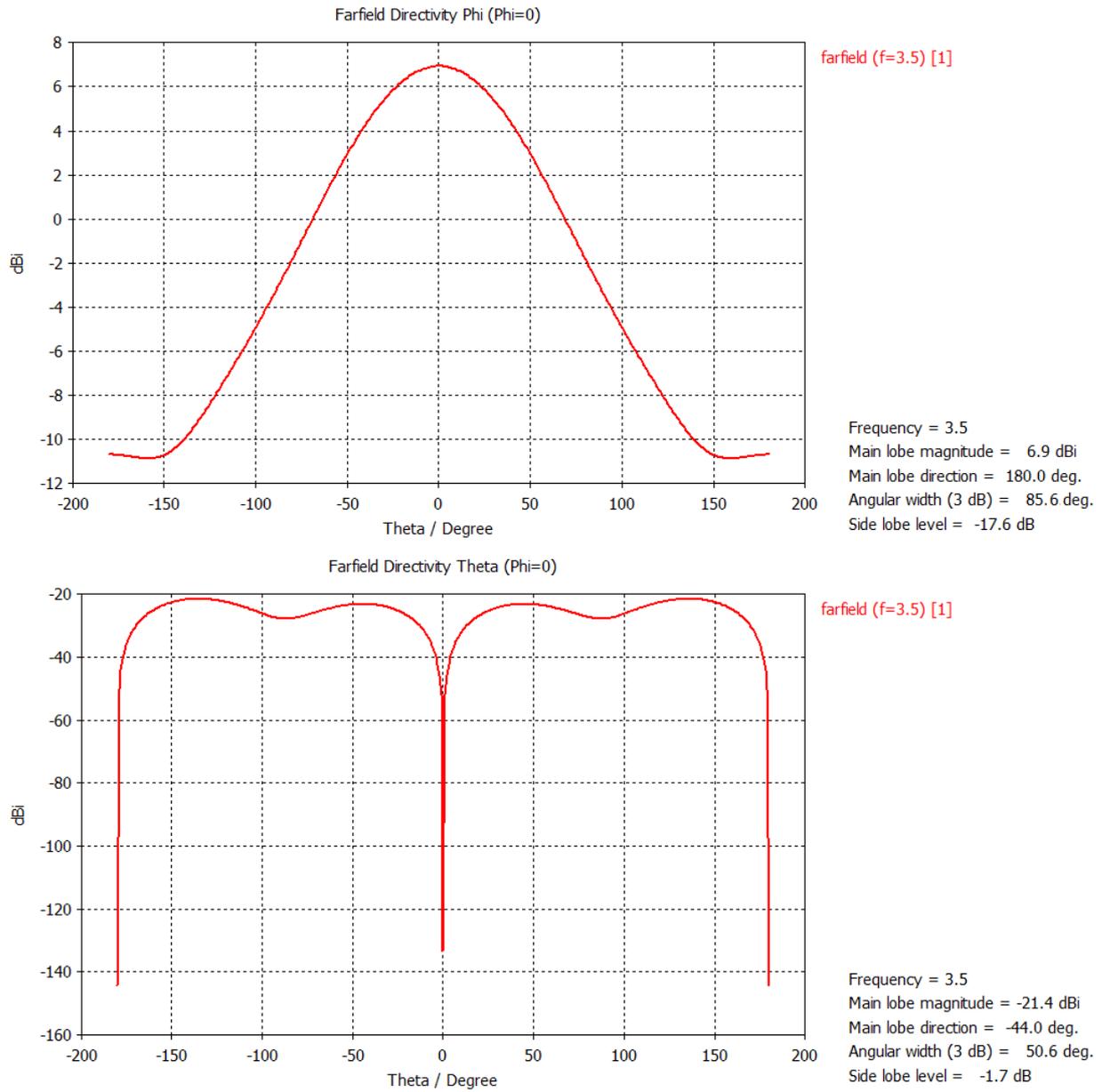


Figura 3-8: Ganancia en campo lejano en el plano horizontal $\Phi=0$, componente copolar (arriba) y contrapolar (abajo)

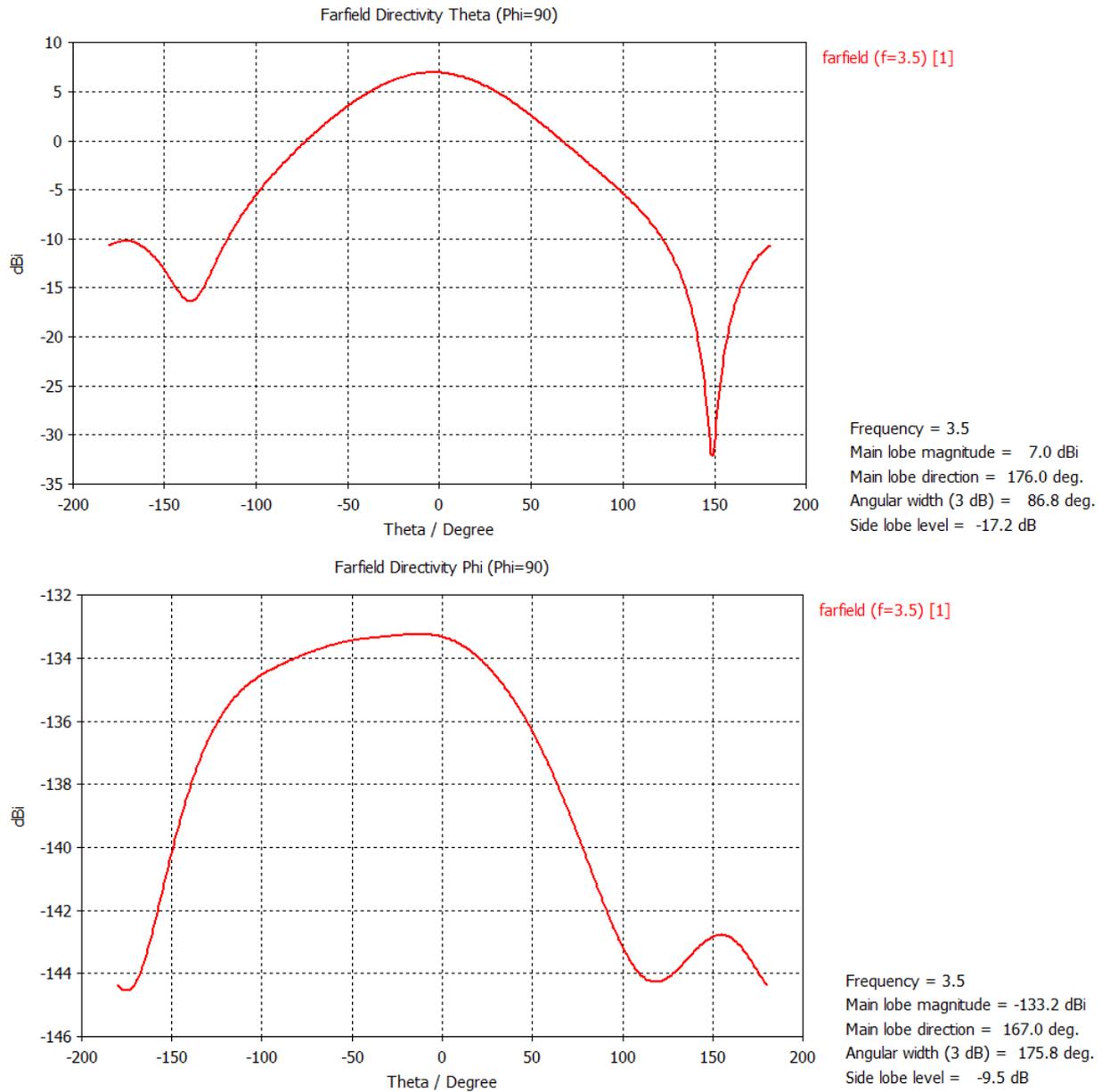


Figura 3-9: Ganancia en campo lejano en el plano vertical $\Phi=90$, componente copolar (arriba) y contrapolar (abajo)

En este plano desaparece la simetría que aparecía en el plano horizontal. Esto se debe a que en este corte está incluida la línea *microstrip*, la cual aporta a la radiación en campo lejano.

4 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL

Para el siguiente paso en el diseño se debe tener en cuenta el carácter omnidireccional de la antena en el plano horizontal a la hora de decidir qué cuerpo geométrico utilizar como soporte de los parches.

4.1 Selección del cuerpo geométrico de soporte

Por tener mayor facilidad en la construcción, se escoge un prisma uniforme con n caras laterales en las cuales se situarán los elementos radiantes.

Antes de pasar a escoger qué polígono conformará la base del prisma, hay que encontrar una forma de modelar el campo eléctrico del parche. La aproximación escogida es la más sencilla posible: $\cos^n(\Phi)$, siendo Φ el arco que debe cubrir cada parche, en este caso, de -90° a 90° . El exponente x se escogerá de tal forma que en el modelo se consiga el ancho de haz a -3dB de 85.6° de la simulación, suponiendo el máximo del coseno como el máximo de radiación en 0° y buscando el corte en $\pm 42.8^\circ$ con 0.707 , es decir, la caída de 3dB en unidades naturales.

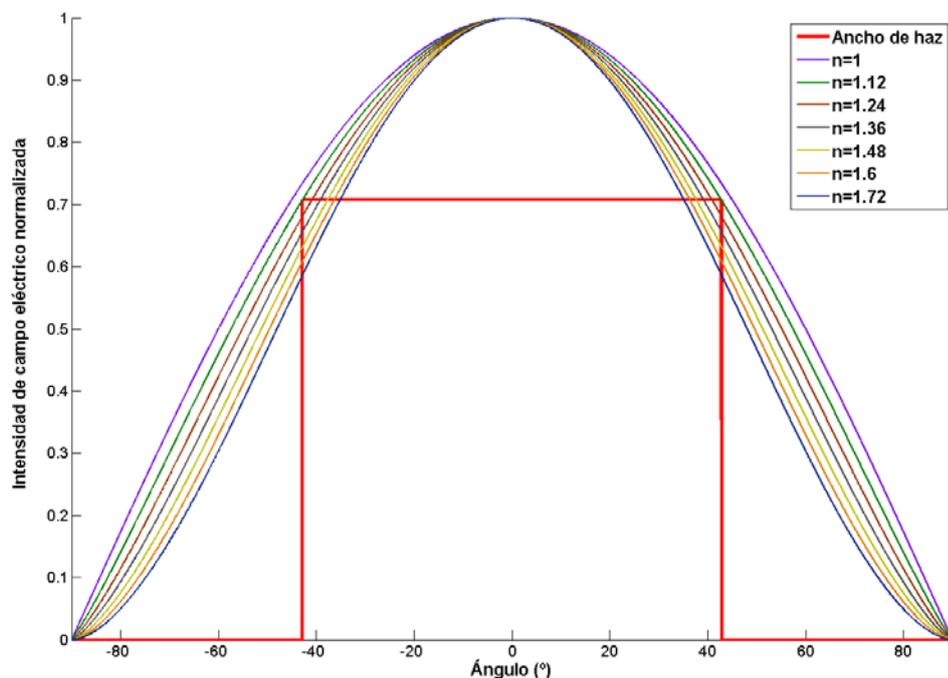


Figura 4-1: Selección del exponente para modelo de campo eléctrico

Como podemos observar, el exponente que mejor aproxima el ancho de haz deseado es $n=1.12$.

Para decidir cuál será la base del prisma y, por tanto, cuántas caras laterales tendrá se utilizará ese exponente y sabiendo que el objetivo es que el plano horizontal sea omnidireccional, se realizan una serie de simulaciones para seleccionar n utilizando como criterio que la caída en el plano a tratar no supere nunca los 3 dB.

Se toman como base de partida las siguientes fórmulas extraídas de [5]

$$F_A(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n \cdot e^{jka [\sin\theta \cos(\phi-\phi_n) - \sin\theta_0 \cos(\phi_0-\phi_n)]} \quad (4-1)$$

siendo la amplitud del n -ésimo elemento I_n y α_n su fase, ϕ_n la posición del parche en el plano y a la distancia del centro del prisma a dicha posición. En este caso utilizaremos I_n y α_n con valores 1 y 0 respectivamente ya que nuestro diseño partirá de una alimentación con amplitud constante y sin ningún desfase. Posteriormente, cada uno de los elementos del sumatorio deberá ser multiplicado por su respectivo campo eléctrico, es decir, $\cos^{1.12}(\phi_n)$.

Desarrollando un código en Matlab que permita calcular el diagrama de radiación en función del número de caras se obtiene el siguiente resultado:

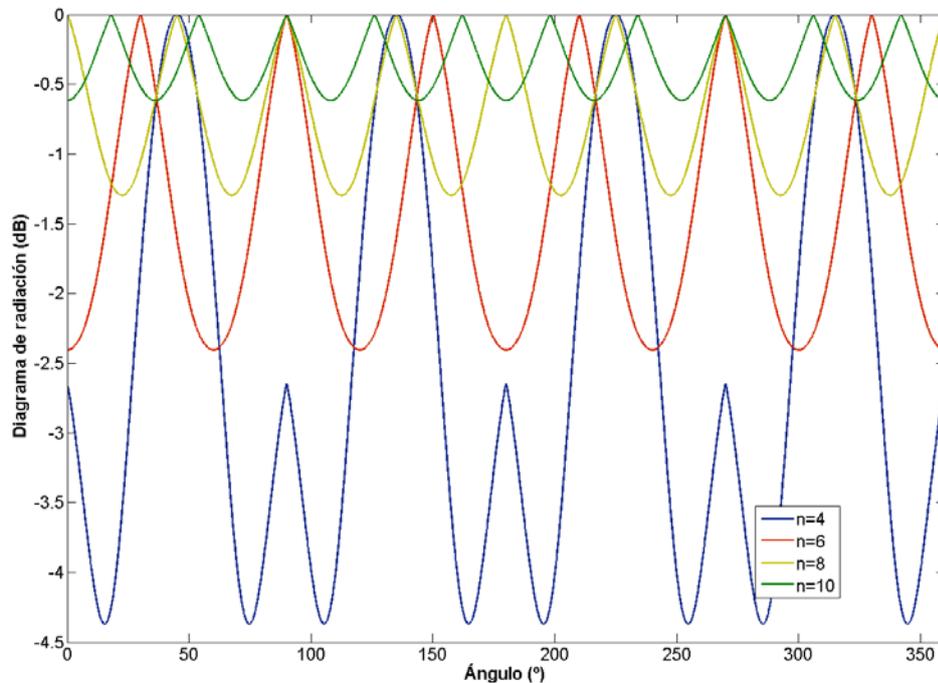


Figura 4-2: Campo radiado para un radio fijo de en función del número de caras n

El primer valor en cumplir el criterio de que no caiga más de 3 dB es $n=6$. Por lo tanto, la estructura a utilizar como sujeción de la antena conformada será un prisma hexagonal.

4.2 Simulación de la estructura

Tras decidir cómo debe ser la colocación de los parches se pasa a simularlos con la colocación escogida.

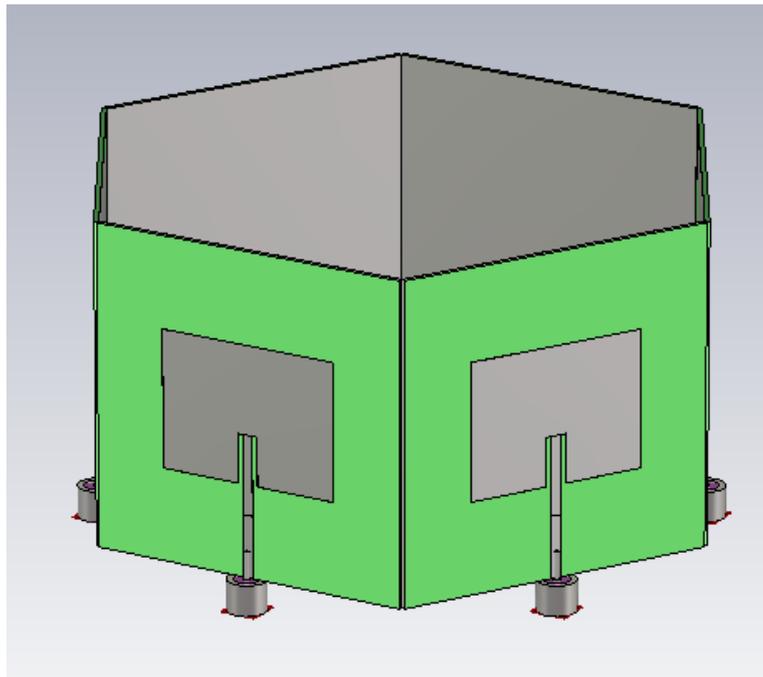


Figura 4-3: Array conformado de seis parches

En la simulación inicial aparecen una serie de nulos en partes de la estructura donde no debería haberlos. Por ello se cambia el mallado necesario en la simulación del programa para comprobar si el fallo es de diseño o de simulación.

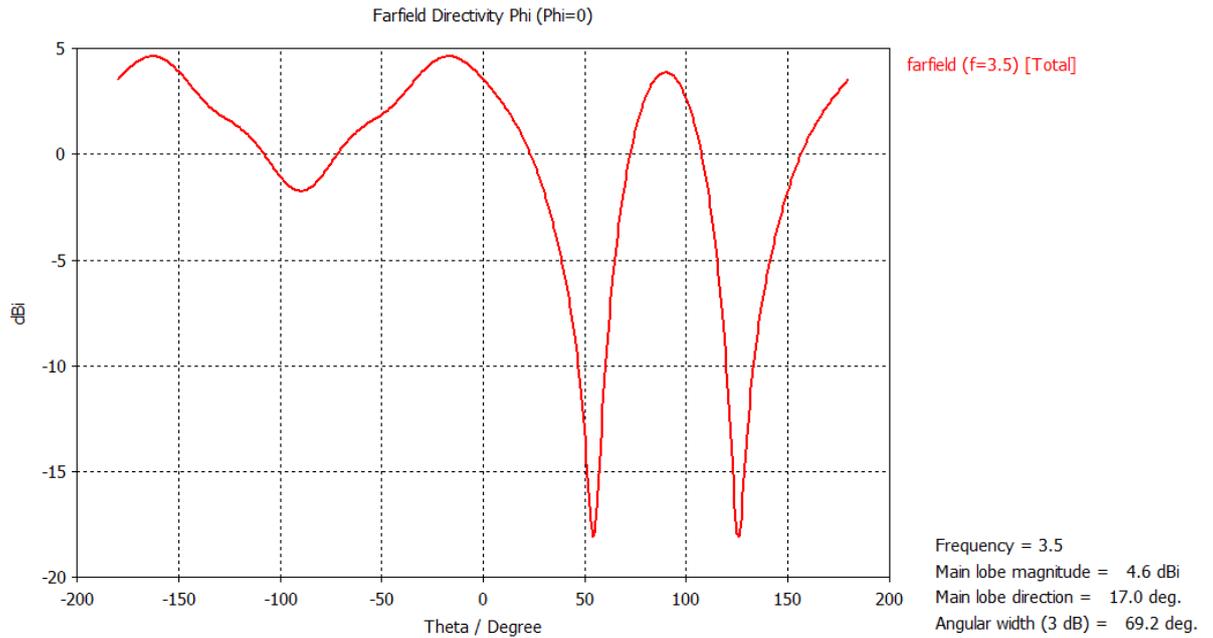


Figura 4-4: Primera simulación de directividad de la estructura

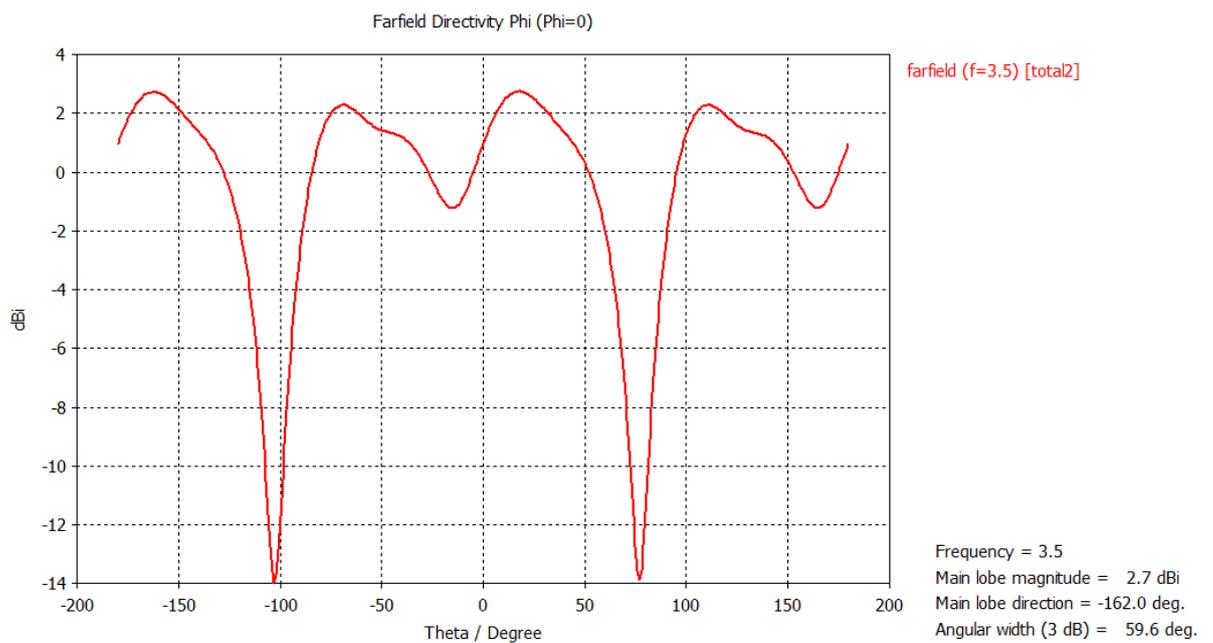


Figura 4-5: Simulación de directividad de la estructura con mayor mallado

Pese a que se puede apreciar un cambio considerable, al analizar los resultados con mayor detenimiento aparece un desplazamiento vertical en la fase de cada una de las caras en función de en qué posición estuvieran colocadas, por lo que estos resultados tampoco son concluyentes. Convendría simularlo con un mallado aún mayor, pero el coste computacional sería demasiado alto, por lo cual se detienen aquí las simulaciones.

4.3 Diseño de la estructura de sujeción

El último paso en esta parte del trabajo es diseñar la estructura de sujeción de los parches.

En un principio el diseño se iba a implementar en aluminio, lo cual hizo que la estructura se diseñara por partes por comodidad a la hora de la construcción. Al surgir la posibilidad de realizarlo en una impresora 3D se unieron dichas piezas en una sola para conseguir mayor estabilidad.

La estructura consta de dos partes principales: las caras laterales, donde irán los parches, y una base, donde se unen estas piezas y se sujetará a la cámara anecoica y a la red de alimentación.

Las caras laterales son cuadrados de la dimensión del parche y con un grosor de 3 mm. Se incluye una hendidura en la parte inferior del cuadrado para el conector permitiendo así que el parche se apoye en su totalidad sobre la pieza. A su vez, añadimos dos taladros de 2 mm de diámetro para conseguir mayor fijación en la zona ya que la fuerza que hagan los cables en el conector podría hacer que se debilitara la soldadura. Mantenemos los cuatro taladros de 5 mm de la cámara anecoica para utilizarlos como sujeción a la estructura.

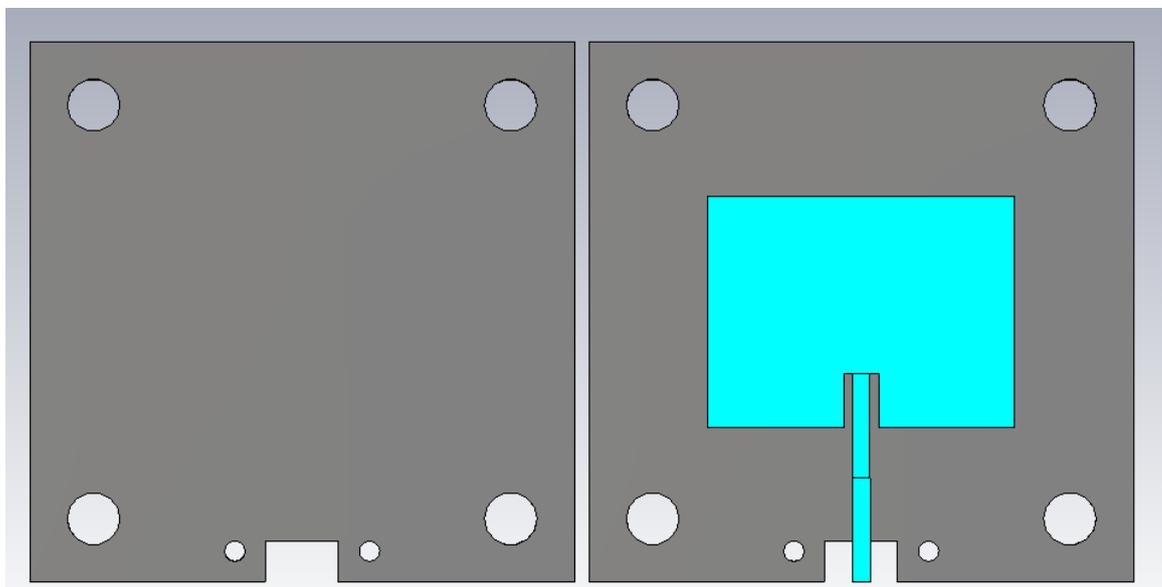


Figura 4-6: Cara lateral de la estructura de sujeción

La pieza de la base tiene forma hexagonal y el mismo grosor que las laterales. Consta de cuatro taladros para sujetarla a la red de alimentación y tres soportes rectangulares que permitan sujetar la

antena a la cámara anecoica para medir su plano horizontal. Estos soportes tendrán un taladro cada uno al final de los mismos de 5 mm de diámetro. Se puede observar que también tiene hendiduras en sus laterales para los conectores.

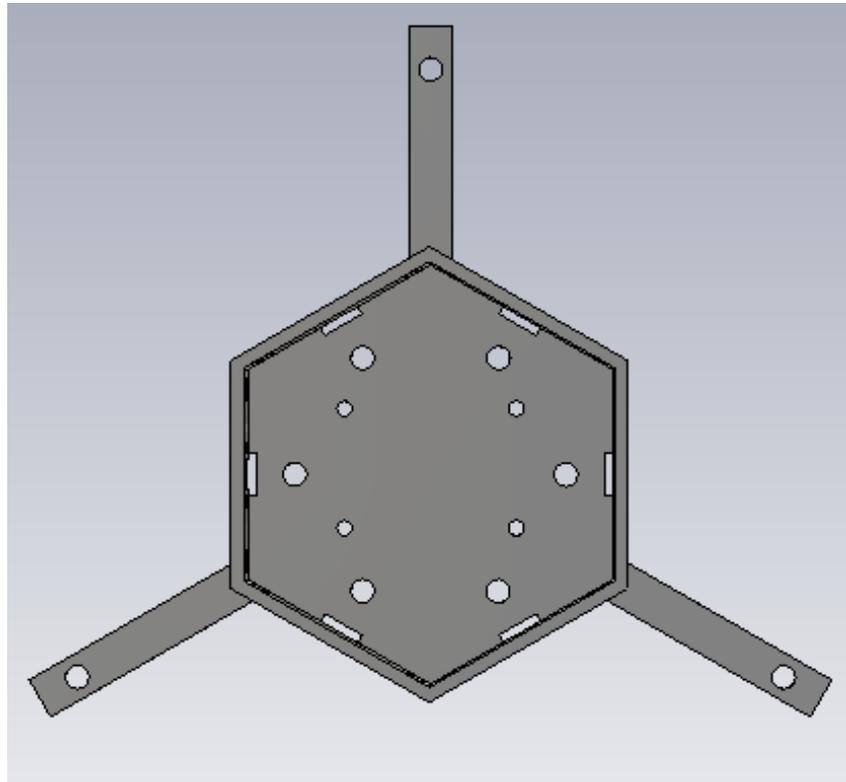


Figura 4-7: Vista superior de la estructura de sujeción

5 DISEÑO DE LA RED DE ALIMENTACIÓN

Para el diseño de esta antena se realiza una red de alimentación con amplitud y fase constante en sus seis salidas. Esto hará que el plano horizontal se acerque más a un carácter omnidireccional, ya que implica que todos los parches recibirán la misma potencia sin ningún tipo de desfase.

Pese a que la idea original de este Trabajo Fin de Grado era poder manipular el comportamiento en radiación de la antena mediante la red de alimentación, al final se escogió una red simple que distribuyera la potencia de forma uniforme para poder así comprobar el carácter omnidireccional de la misma.

5.1 Diseño de la red de distribución de potencia uniforme

El primer paso a la hora de diseñar la red de alimentación es saber qué forma y qué límites de dimensión tendrá. Para ello, si se observa la estructura previamente diseñada, se puede apreciar que la forma más lógica para la red sería la de un hexágono cuyas dimensiones no sobrepasaran las de la base del prisma, teniendo sus salidas en los lados del polígono. Para ello, se decide realizar un divisor de potencia con tres ramas que a su vez se bifurquen en sus salidas.

Tras diseñar en CST una primera aproximación de la red de alimentación aparece el problema de que dicho programa no permite realizar simulaciones si sus puertos no eran paralelos a los planos XY, XZ o YZ, por lo cual se pasa a hacer todo el diseño en ADS.

El problema principal que se encuentra en este programa es la realización del divisor central ya que no es posible añadir un cruce para cuatro líneas (las tres ramas y la línea de entrada) con un ángulo diferente a 90° . La única posible solución era poner a las salidas de esta cruz codos que permitieran doblar las ramas laterales de tal forma que ambas lleguen a los lados del hexágono.

Teniendo en cuenta que el triple cruce en el centro hará que la impedancia a adaptar a la entrada sea un tercio de la vista a la entrada de cada rama, decidimos adaptarla de tal forma que en la bifurcación de cada una de estas se vieran 50Ω para posteriormente adaptarla al centro a 100Ω .

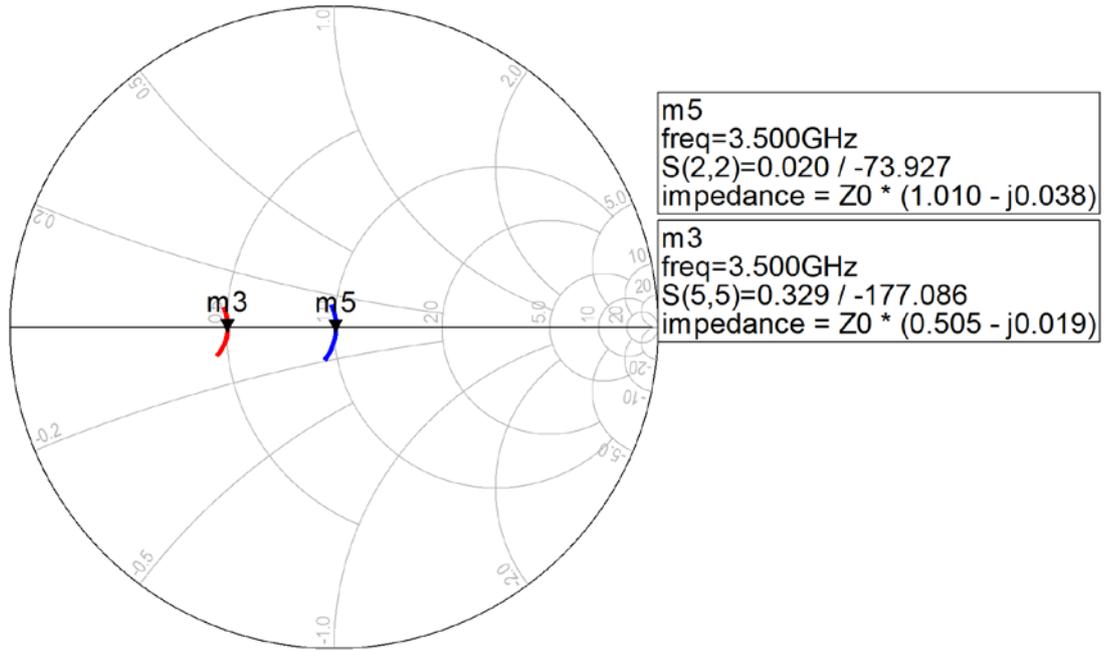


Figura 5-1: Adaptación de la bifurcación (rojo) y de la rama (azul), normalizado a 100Ω

Teniendo ya la rama adaptada, se pasa a la red completa. Como no se ha podido simular en CST, se extraen los parámetros S del conector (figura 3-4) para conectarlos a las 7 entradas del diseño y así aproximarse más a la realidad.

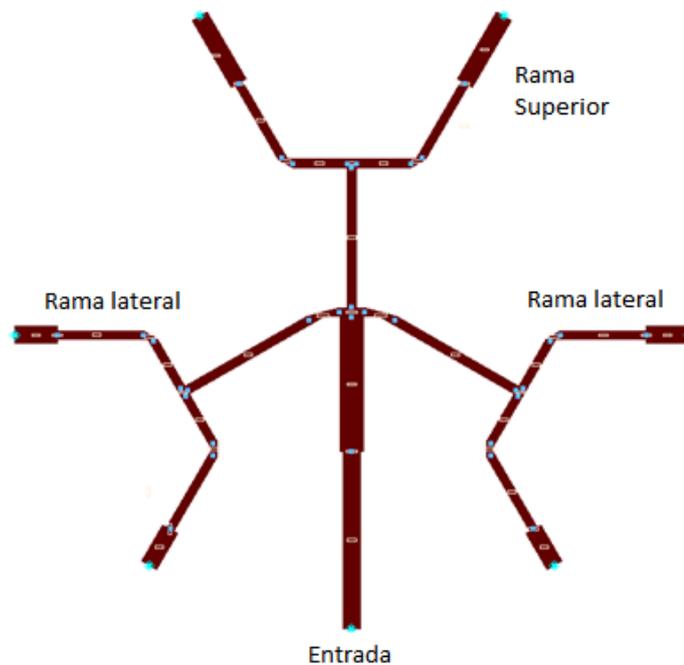


Figura 5-2: Diseño de la red completa

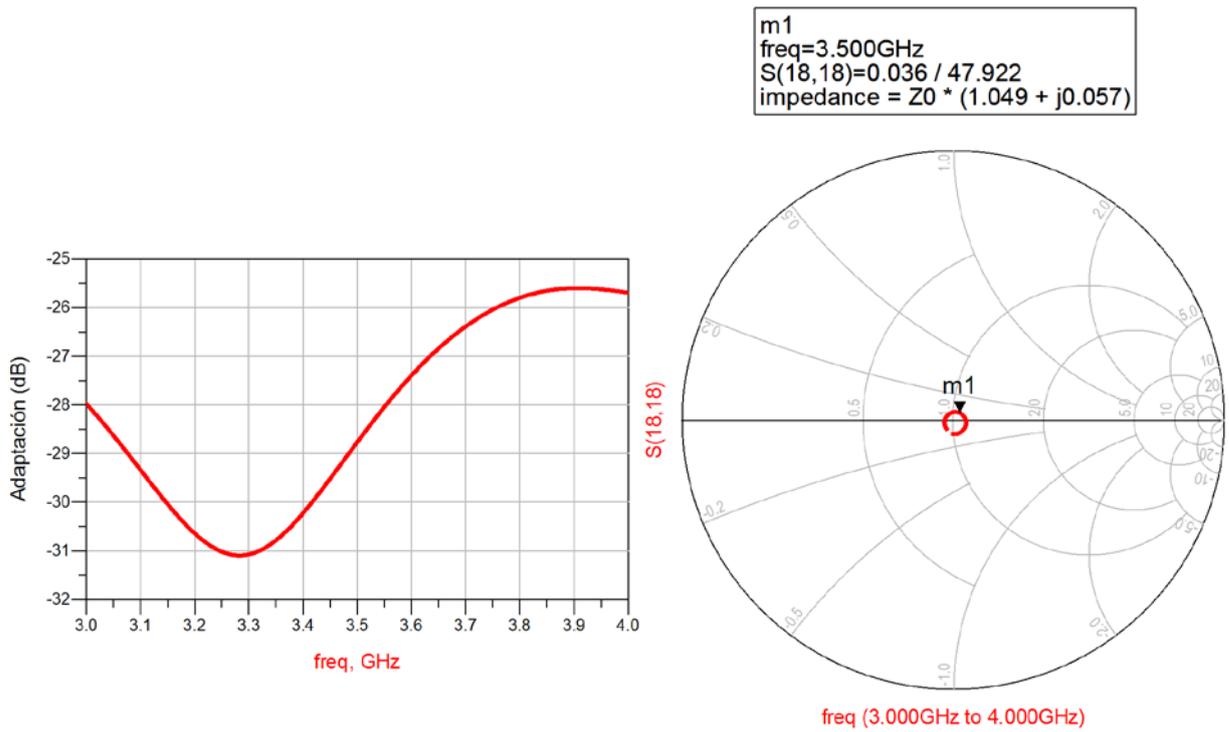


Figura 5-3: Reflexión a la entrada de la red, normalizado a 50Ω

La amplitud y el desfase son mostrados con únicamente dos salidas ya que las laterales son idénticas entre ellas. Por ello, sólo se compara una salida superior, en rojo en la figura, con una lateral.

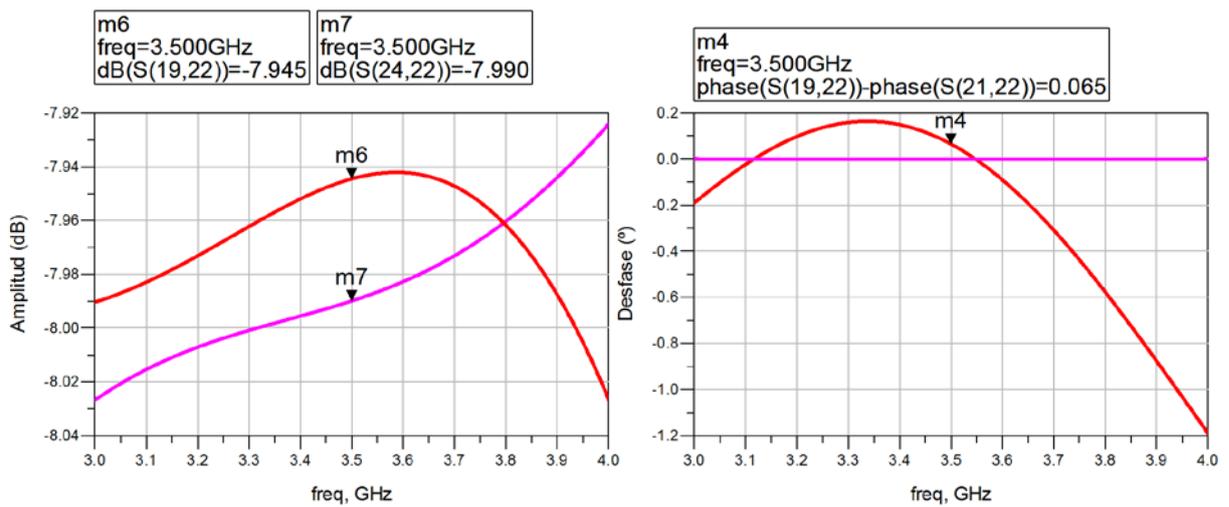


Figura 5-4: Desfase y amplitud de la red de alimentación en sus salidas

Finalmente, se extrae el *layout* de la red para exportarlo a CST y allí crear su contorno y base para la sujeción a la estructura.

5.2 Diseño del contorno y base de sujeción

Para diseñar la base de sujeción se importa dicho *layout* a CST. Como se han tenido que añadir codos a la salida de la cruz central el hexágono resultante no es exactamente regular. Además, teniendo en cuenta que no son seis si no siete las líneas que hay que conectar, la forma resultante será un heptágono irregular. Este heptágono servirá como contorno de la red y se utilizará como base para la pieza de sujeción de la red.

Igual que se hizo con la cara lateral de la estructura para sujetar el parche, se genera una pieza de 3 mm de grosor, añadiendo una hendidura en cada salida para cada uno de los conectores que se soldarán y dos taladros de 2 mm de diámetro para aumentar la fijación en este punto. A su vez, se añaden 4 taladros para poder unir esta red a la estructura radiante.

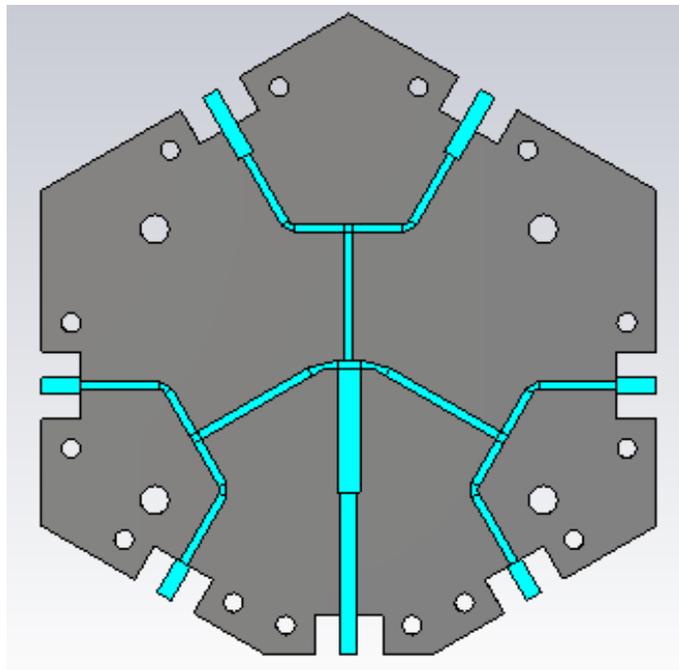


Figura 5-5: Pieza de sujeción de la red de alimentación

6 CONSTRUCCIÓN Y MEDIDA

La última parte del desarrollo de este trabajo consistirá en la construcción y medida de los tres elementos previamente descritos, es decir, del elemento unitario, de la estructura de seis parches y de la red de alimentación, y por último, la unión de todos ellos.

6.1 Construcción y medida del elemento radiante

Con las medidas indicadas en el apartado 3.1 se genera un *gerber* para construir el parche. Se puede observar cómo este parche no tiene aún los taladros de 2 mm ya que en el primer diseño no estaban incluidos.

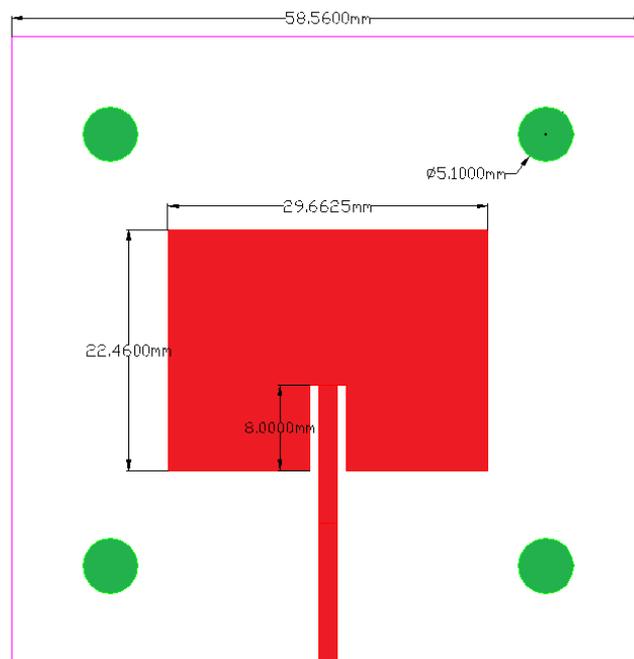


Figura 6-1: Primer plano de construcción del parche

Tras soldar el conector SMA se pasa a medir el parche. La adaptación resultante no es la deseada, es decir, 50Ω , por lo cual se decide cambiar el punto de alimentación de tal forma que se mejore la impedancia de entrada. Para ello se comprueba que si se alimenta desde un punto más cercano al lado inferior del parche el comportamiento del mismo se acerca al buscado, por lo que se suelda un pequeño trozo de cinta de cobre que consiga fijar el nuevo punto de alimentación.

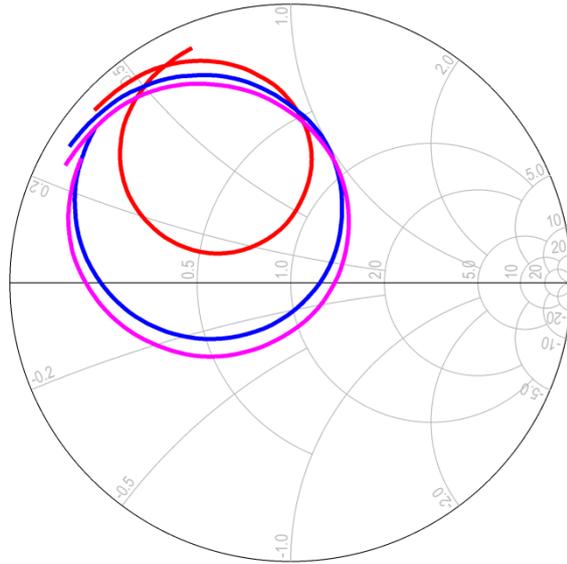


Figura 6-2: Adaptación del parche con alimentación a 8 mm (rojo), con cinta de cobre (azul) y con cinta de cobre soldada (morado), normalizado a 50Ω

El nuevo punto de alimentación se toma a 6.29 mm del borde inferior del parche frente a los 8 mm anteriores.

La siguiente prueba consiste en la construcción de este nuevo parche y, exactamente igual que en el caso anterior, comprobar su adaptación. El resultado es opuesto al anterior, es decir, hay que subir el punto de alimentación. En este caso se quita cobre manualmente del parche de tal forma que la línea de alimentación se introduzca manteniendo sus dimensiones.

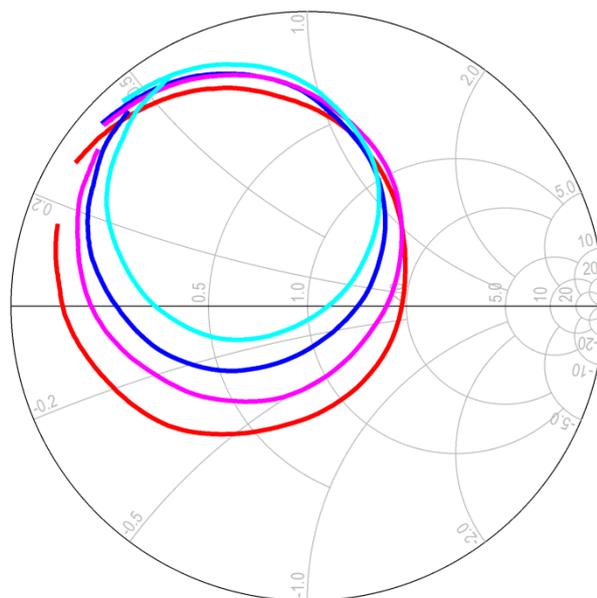


Figura 6-3: Adaptación con punto de alimentación en 6.29 mm (rojo) e incrementos, normalizado a 50Ω

En la gráfica se puede observar que para la curva cyan se obtiene un cruce por el origen de la carta de Smith y, por lo tanto, una adaptación a 50Ω . Esta adaptación se produce en una frecuencia ligeramente distinta a la de trabajo, 3.53 GHz. De aquí en adelante se tomará dicho valor como nueva frecuencia de trabajo.

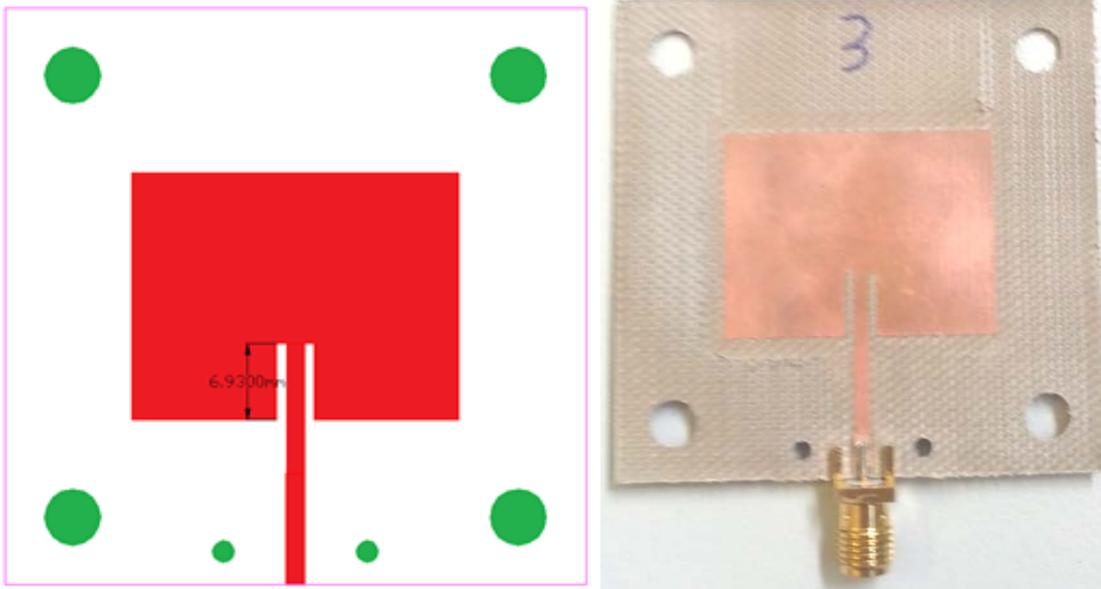


Figura 6-4: Gerber y construcción del parche

Tras comprobar que el parche con el punto de alimentación a 6,93 mm es el que mejor se adapta a las especificaciones deseadas, se procede a la construcción de los cinco elementos restantes.

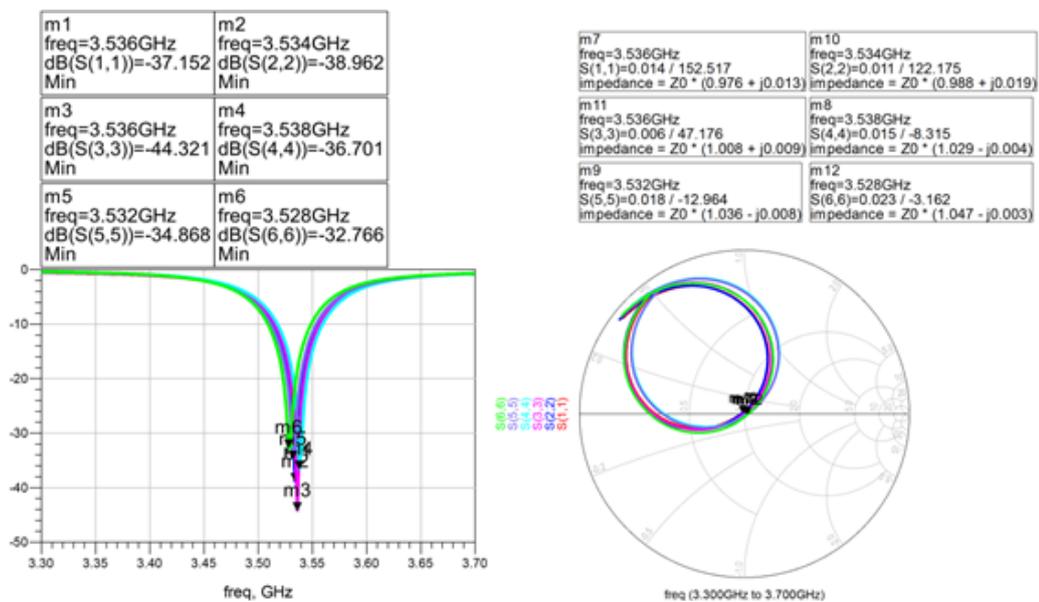


Figura 6-5: Adaptación de los 6 elementos

Por último, pasamos a medir el diagrama de radiación en la cámara anecoica. Como para estas medidas ya estaba completamente montada la antena, esta es realizada teniendo todos los parches conectados con cargas de $50\ \Omega$ excepto aquel que vamos a medir, al cual se le conecta directamente la alimentación de la cámara.

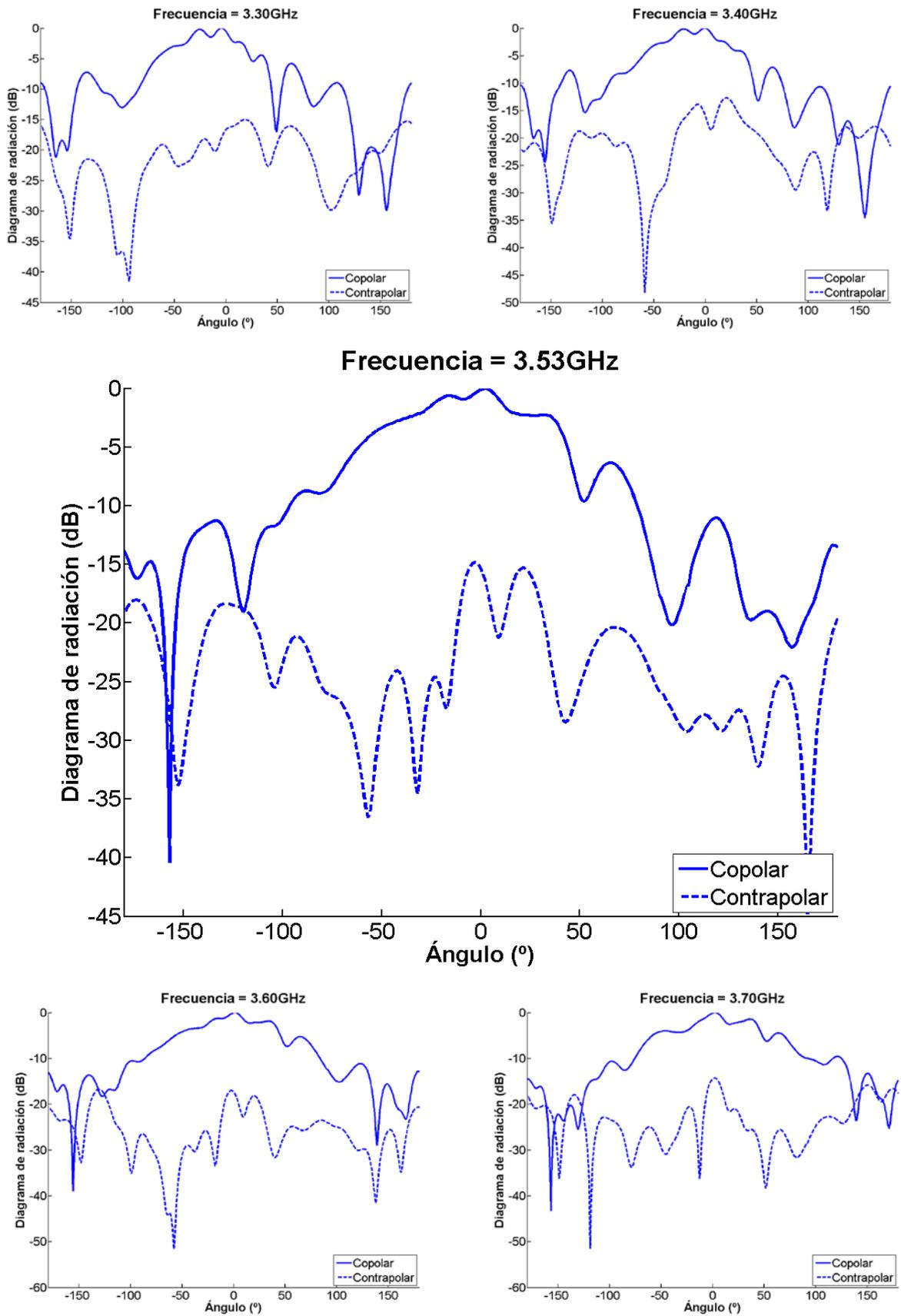


Figura 6-6: Diagramas de radiación normalizados del parche en el plano vertical

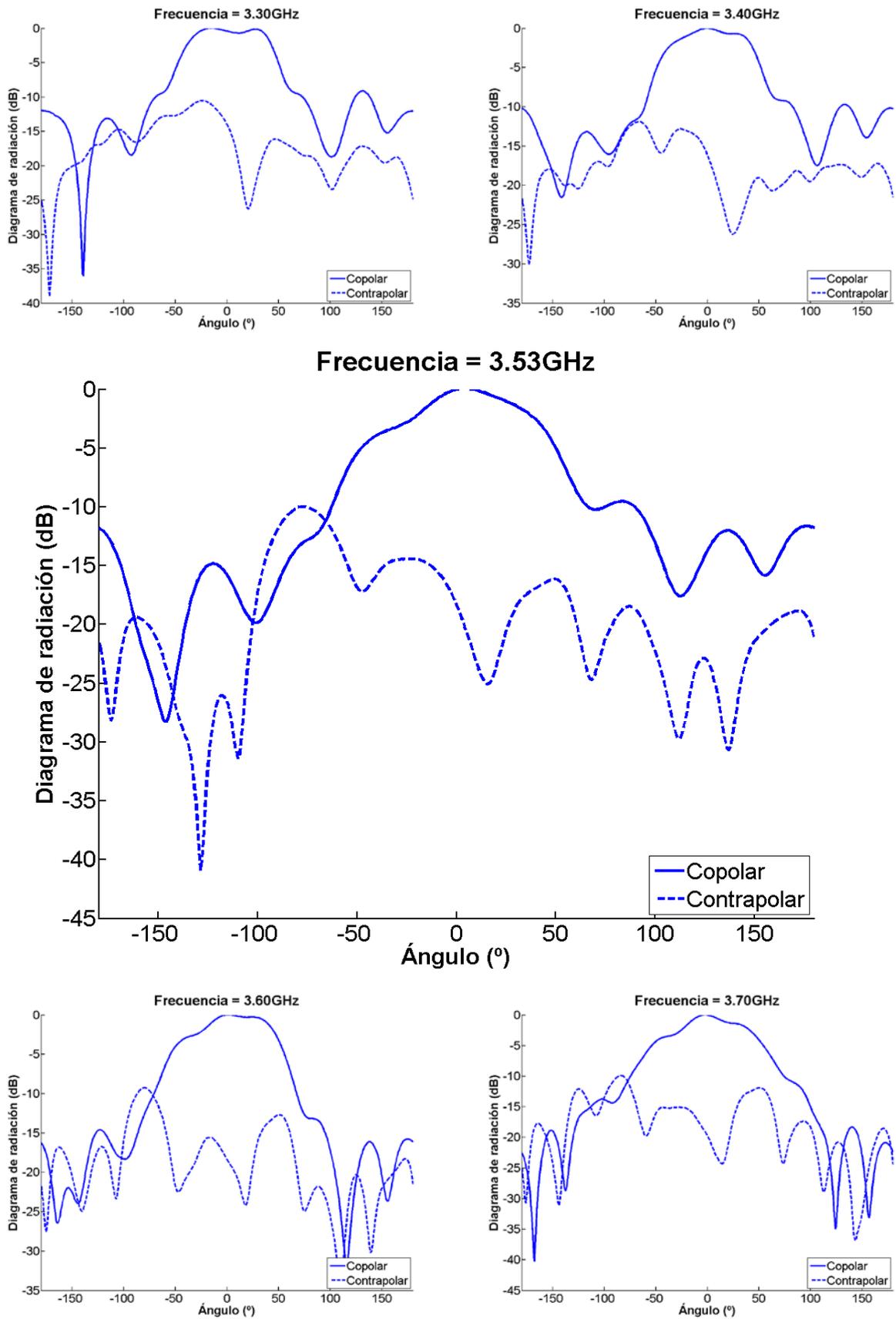


Figura 6-7: Diagramas de radiación normalizados del parche en plano horizontal

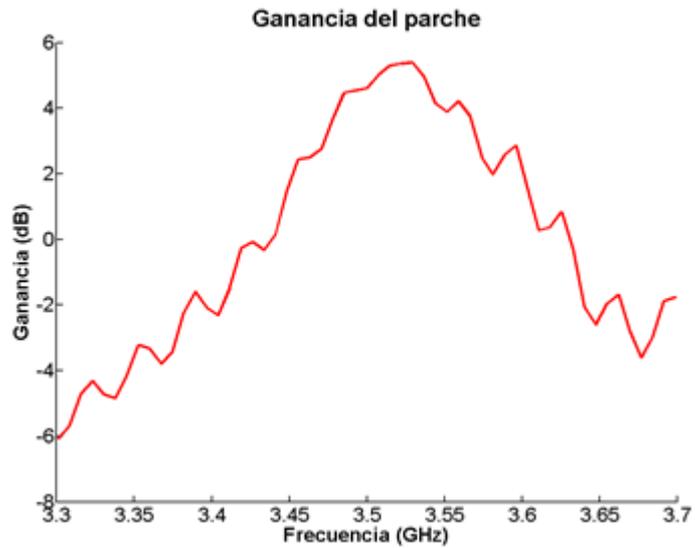


Figura 6-8: Ganancia del parche

Si se analizan las gráficas del diagrama de radiación se puede apreciar cómo la máxima dirección de apuntamiento se encuentra en 0° , es decir, la posición del parche, manteniendo el ancho de haz de la simulación. La contrapolar obtenida en la frecuencia de trabajo es menor a -15 dB.

En el caso de la ganancia existe un máximo de 5.4 dB en la frecuencia de trabajo, 3.53 GHz.

6.2 Construcción y medida de la red de alimentación

Con el *layout* indicado en la figura 5-2 se genera el *gerber* de la red añadiéndole los taladros requeridos para la sujeción a la estructura.

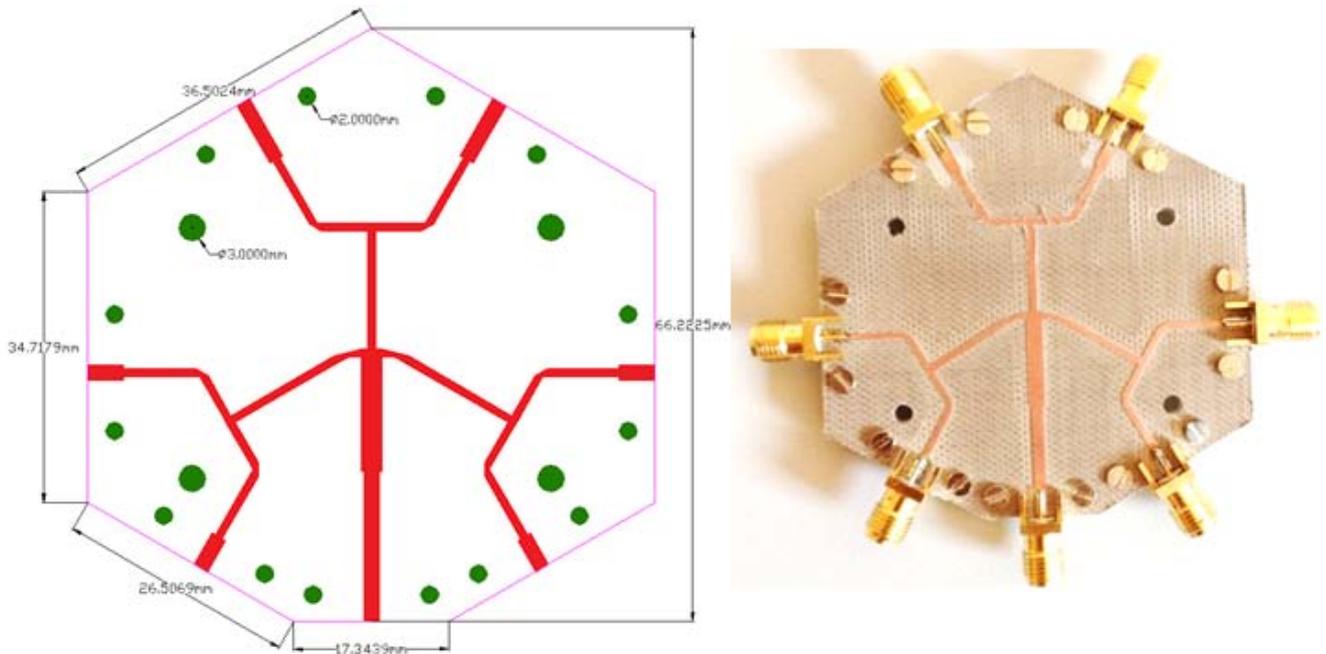


Figura 6-9: Gerber y construcción de la red

Tras construir la placa y soldar los conectores a la misma, se procede a medir los resultados en el analizador de redes. Como éste no permite medir la entrada y las seis salidas a la vez se realizan las medidas a pares, es decir, la entrada con cada una de las salidas y el resto con cargas de 50Ω , la primera salida con cada una de las siguientes de la misma forma y así sucesivamente. Con esto se consiguen extraer los suficientes datos como para poder realizar la matriz de parámetros S que caracteriza a la red.

Utilizando un script de Matlab combinamos estos valores para conseguir la matriz de 7×7 que permita analizar los resultados correctamente.

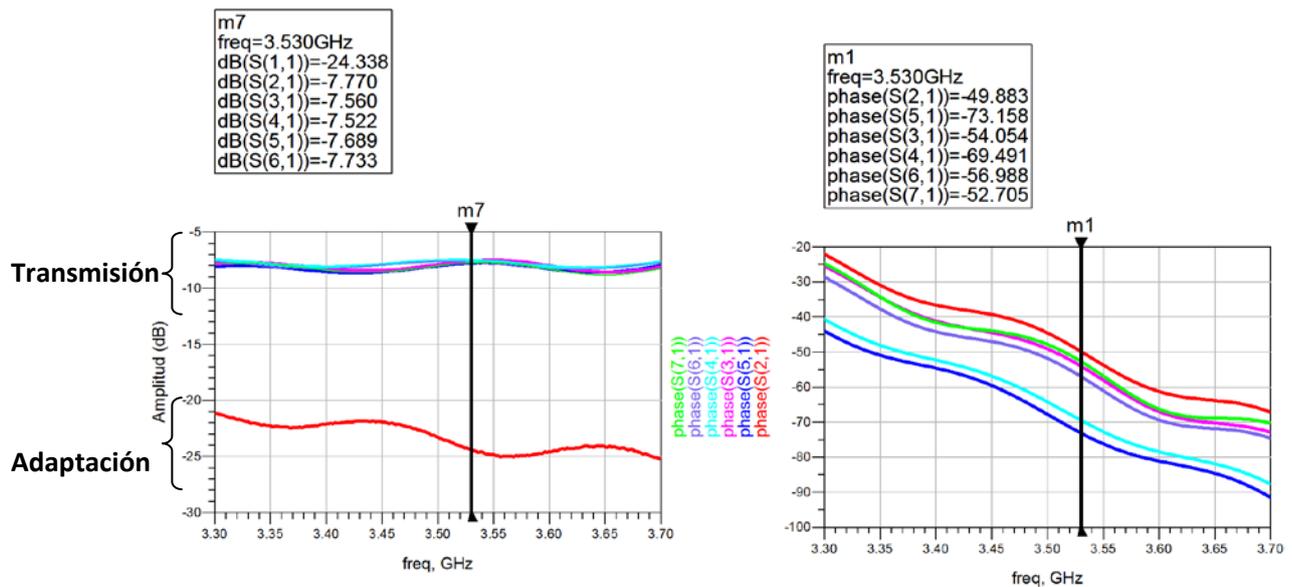


Figura 6-10: Amplitud y fase de la red (salidas numeradas en sentido horario desde la entrada)

En las gráficas se puede observar que en amplitud se obtiene el reparto de potencia deseado, es decir, que en cada una de las salidas haya un sexto de la potencia (aproximadamente -7.8 dB). Sin embargo, se produce un desfase no deseado entre ellas que alcanza valores de hasta 23.5°.

6.3 Construcción y medida de la estructura

Teniendo la red de alimentación y los seis elementos radiantes construidos y medidos el siguiente paso es la construcción de la estructura de sujeción.

En una primera instancia, como se comentó en el apartado 4.3, la estructura iba a ser construida en aluminio, pero tras obtener acceso a una impresora 3D el diseño sufrió ligeras modificaciones.

La primera prueba de construcción se realizó con piezas independientes, es decir, una base hexagonal y seis piezas en forma de escuadra. Tras comprobar que las partes encajaban se procedió a construir la estructura final previamente descrita.

La impresora 3D construyó dichas piezas utilizando Poliláctico (PLA), un material que tiene más dureza que el ABS y se funde en temperaturas comprendidas entre los 160 y 220 grados[7].

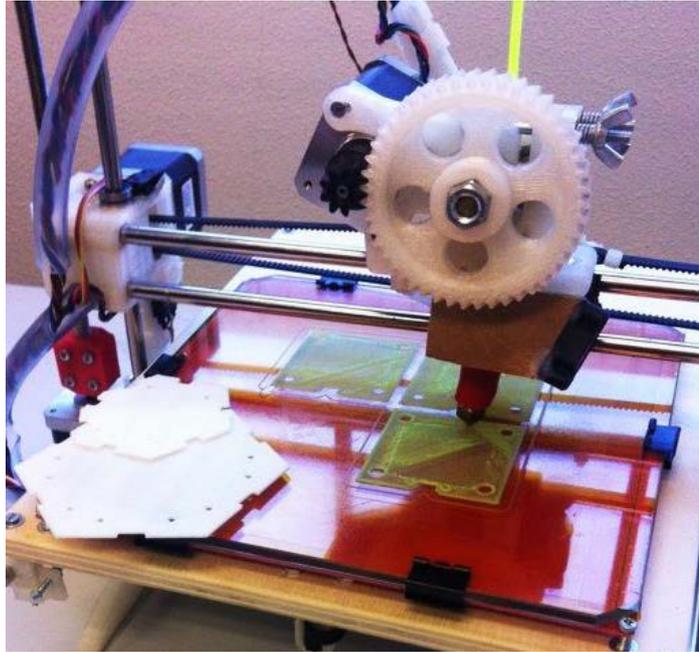


Figura 6-11: Primera construcción de la estructura de sujeción

Teniendo la estructura construida pasamos a incorporar los elementos radiantes y la red de alimentación. Enganchándolos entre sí con seis cables de la misma longitud para no añadir un desfase no deseado, volvemos a medir la reflexión, en este caso de la estructura total.

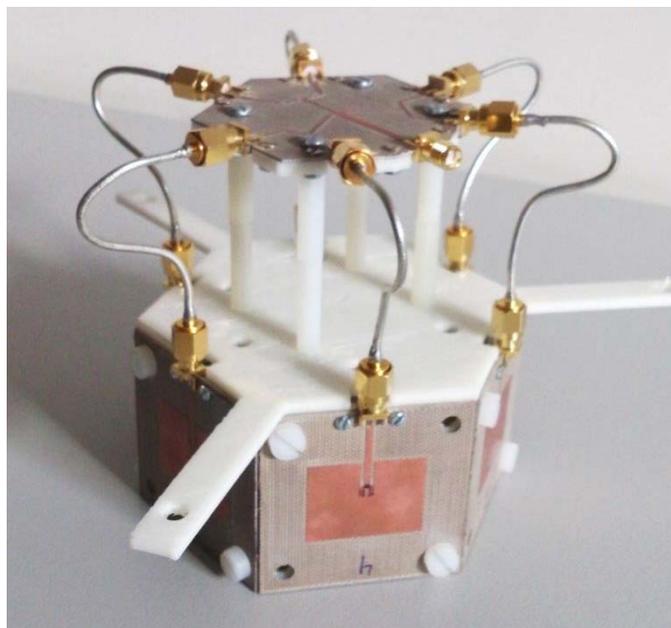


Figura 6-12: Antena final

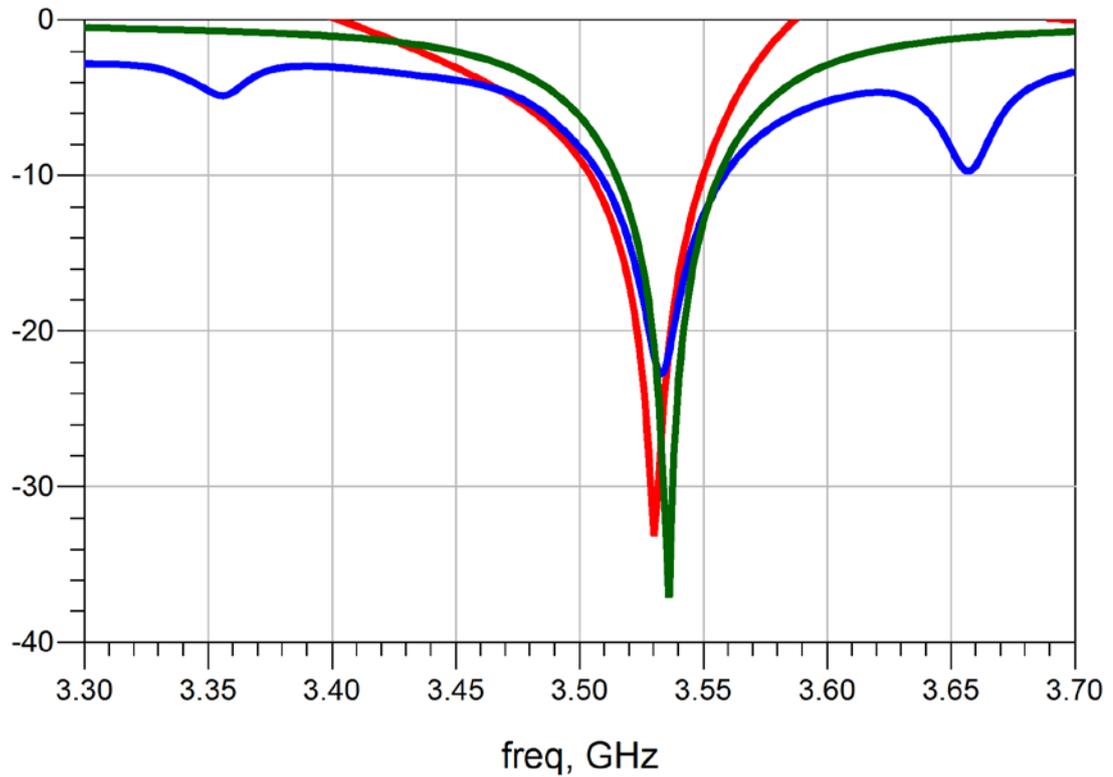


Figura 6-13: Adaptación de red con parches en ADS (rojo), red con parches medida (azul) y parche (verde)

Para poder comparar los resultados obtenidos se muestran también la reflexión de un único parche y la obtenida al unir por separado cada una de las medidas realizadas a cada elemento en ADS. Teniendo en cuenta el desplazamiento de la frecuencia central en el parche comentado en el primer apartado de este capítulo, se puede apreciar cómo la forma se mantiene aunque se hayan perdido 10 dB en dicha frecuencia.

El último paso es medir el diagrama de radiación de la antena completa en la cámara anecoica. Para ello, se realizan un total de ocho medidas en un ancho de banda de 3.3 a 3.7 GHz: seis en el plano vertical y otras dos en el horizontal.

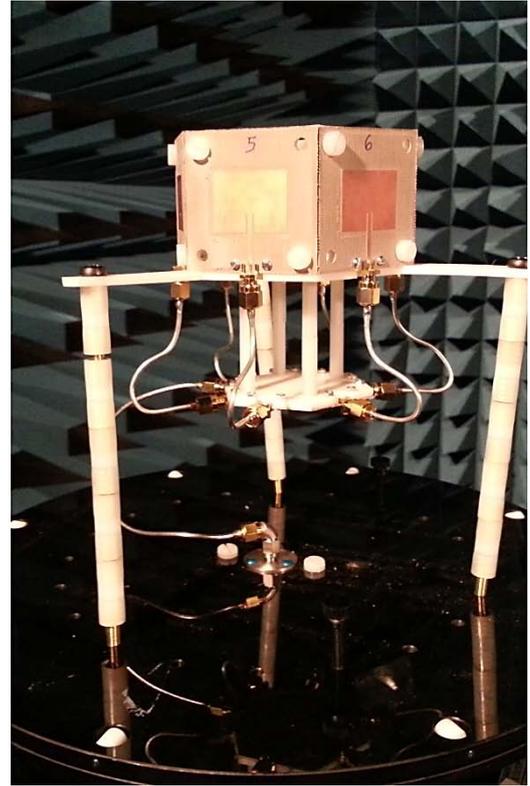
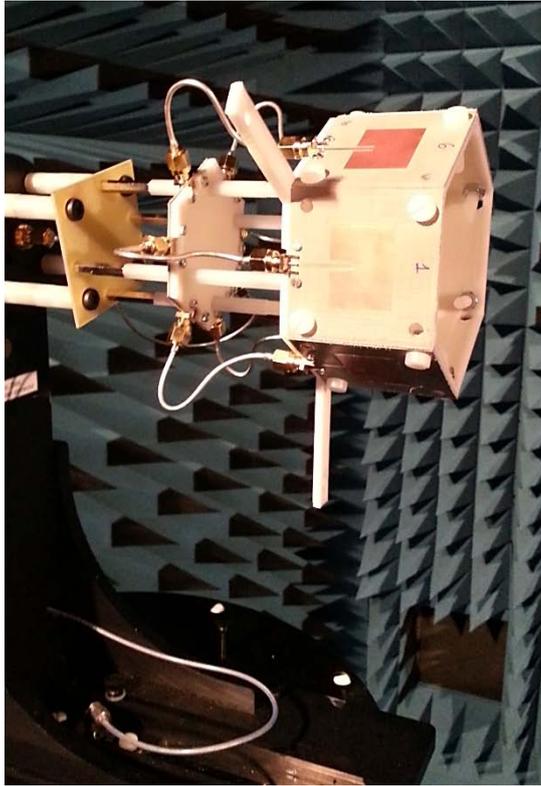


Figura 6-14: Colocación de la antena para el plano vertical (izquierda) y horizontal (derecha)

Mientras que en el plano horizontal con sólo dos medidas se pueden extraer las componentes copolar y contrapolar, en el vertical deben realizarse tres veces más ya que sólo es posible realizar la medida de aquellos parches perpendiculares a la torre (parche 1 en la figura 6-13) y, por lo tanto, únicamente se pueden extraer las componentes copolares y contrapolares de dos de los parches en cada medida. Dichos parches están situados en las posiciones de $\pm 90^\circ$.

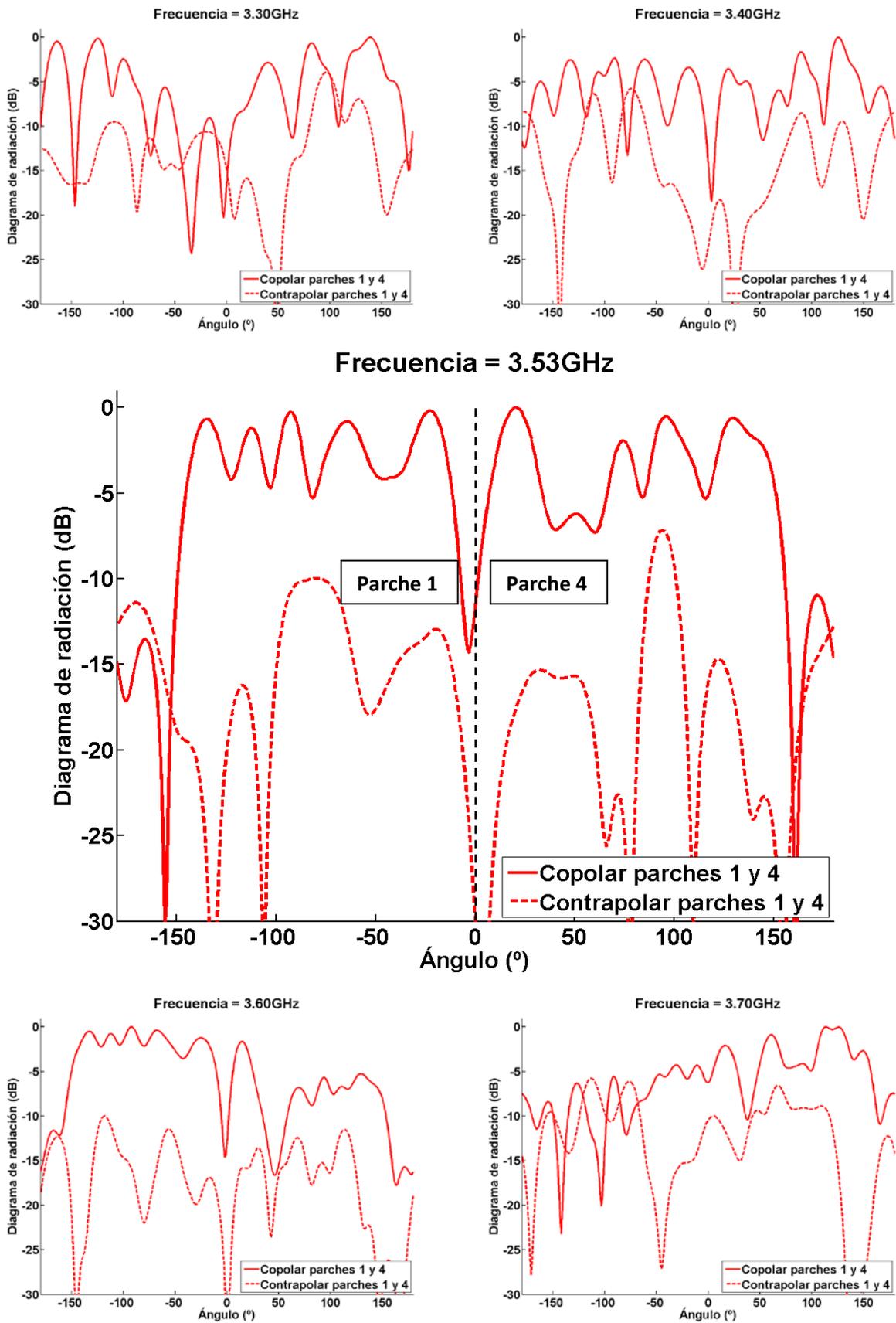


Figura 6-15: Diagramas de radiación normalizados de la estructura en el plano vertical, parches 1 y 4

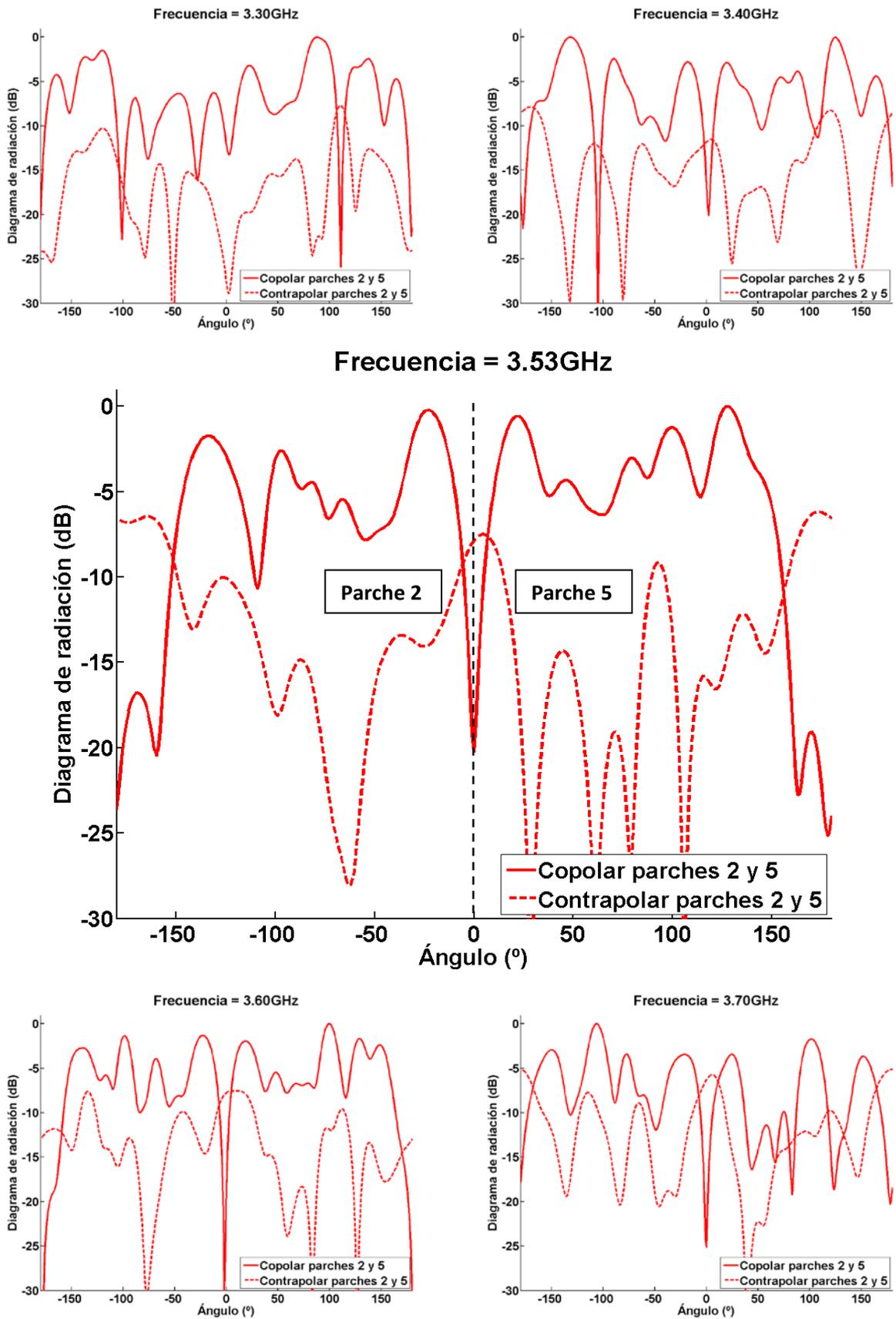


Figura 6-16: Diagramas de radiación normalizados de la estructura en el plano vertical, parches 2 y 5

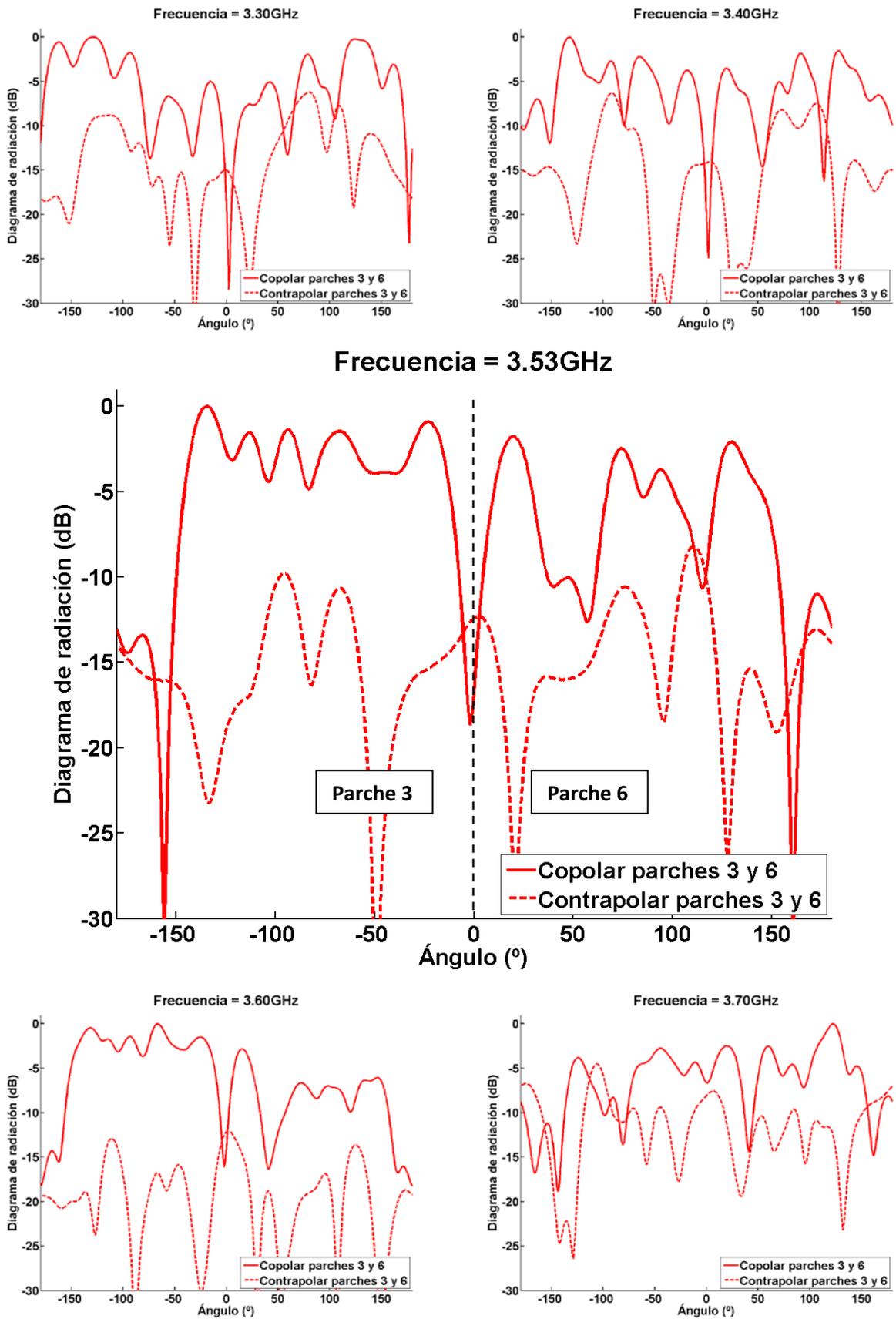


Figura 6-17: Diagramas de radiación normalizados de la estructura en el plano vertical, parches 3 y 6

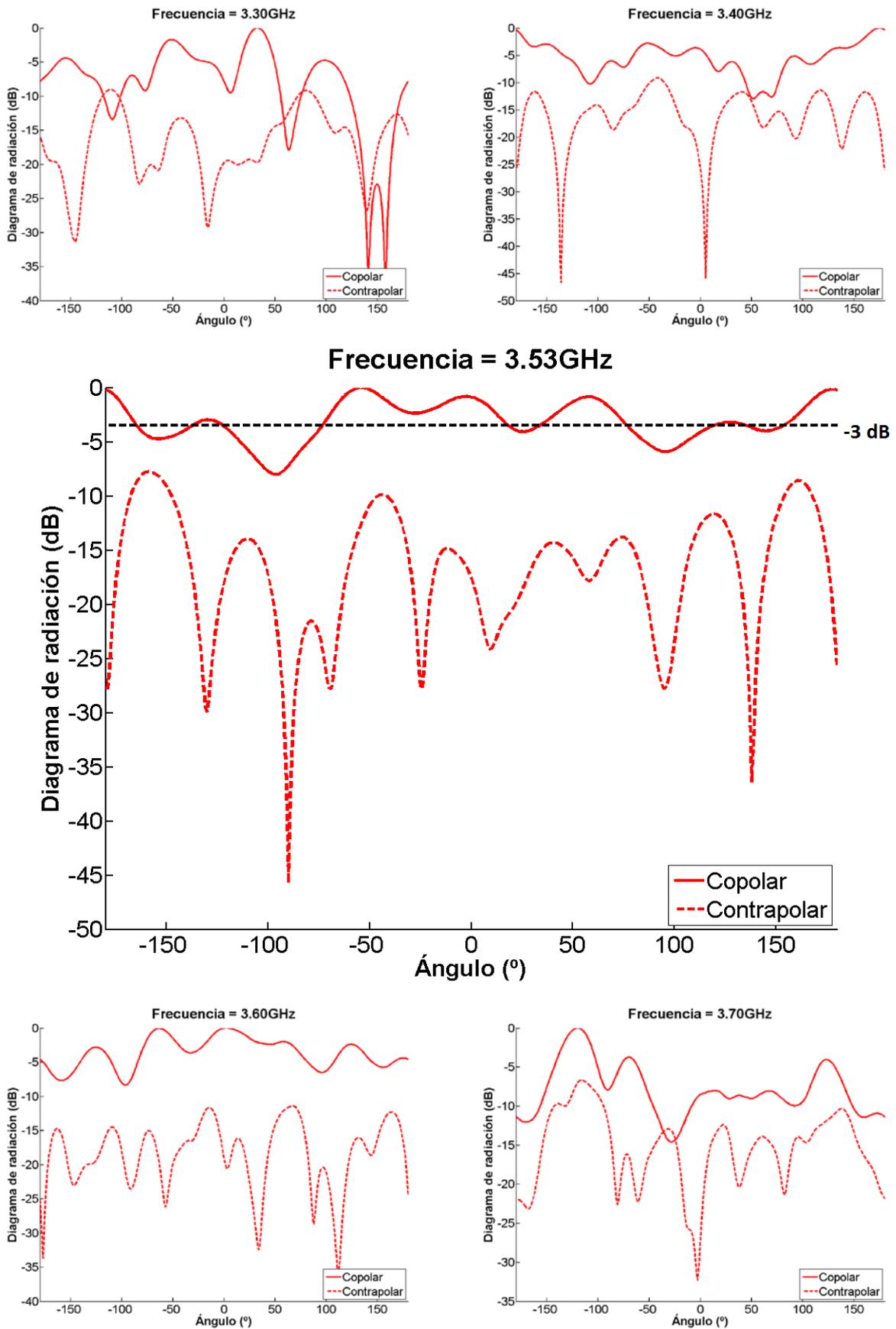


Figura 6-18: Diagramas de radiación normalizados en el plano horizontal

En el plano vertical se puede apreciar cómo en las zonas cercanas a los ángulos en los que están situados los dos parches que se están midiendo se produce un máximo de radiación en la copolar para la frecuencia de trabajo. Sin embargo, la radiación se ve degenerada en el resto de frecuencias ya que, como se puede apreciar en las figuras 6-15,16 y 17, el ancho de banda es muy estrecho.

En el plano horizontal, como se comentó en el apartado 4.1, se buscaba una caída de a lo sumo 3 dB en la frecuencia de trabajo pero el resultado final nos proporciona una caída de alrededor de 5 dB a 3.53 GHz y, al igual que en el plano vertical, el ancho de banda es muy estrecho y por ello se pierde el carácter omnidireccional en el resto de frecuencias de la banda medida.

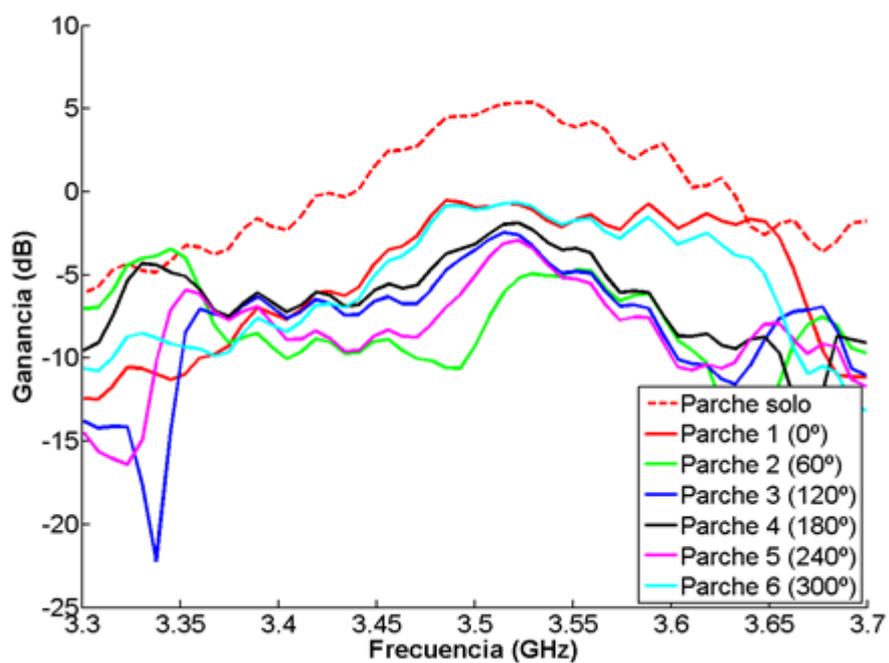


Figura 6-19: Ganancia de la estructura frente a la de un único parche

En la anterior gráfica aparecen las ganancias medidas de cada parche en la estructura frente a la de un único parche. Teniendo en cuenta el reparto equitativo de potencia dado por la red de alimentación cada uno de los parches de la estructura debería radiar una sexta parte de lo que radia un solo parche, es decir, aproximadamente 0.9 dB a 3.53 GHz. En dicha frecuencia se aprecia que no se obtienen estos valores, lo cual podría deberse a que las medidas se cogieron en las posiciones indicadas en la leyenda de la figura pero, si se analiza la gráfica de frecuencia 3.53 GHz de la figura 6-16, los máximos no aparecen exactamente en estos ángulos si no que aparecen ligeramente desplazados.

En el parche individual aparece una ganancia de 5.4 dB ya que su colocación contenía la dirección de máxima radiación, mientras que las ganancias de la estructura se ven modificadas por no haber cogido los valores en el punto exacto de máxima radiación de cada parche.

7 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7.1 Conclusiones

En este Trabajo Fin de Grado se ha diseñado, construido y medido un array conformado de seis parches a 3.5GHz con su respectiva red de alimentación uniforme.

En el diseño del elemento unitario se han conseguido alcanzar las especificaciones deseadas: la adaptación es muy cercana al valor de Γ_{50} y su diagrama de radiación es bastante cercano al simulado, manteniendo el ancho de haz.

En lo relativo a la red de alimentación, debido al tiempo limitado para la realización de este Trabajo Fin de Grado, únicamente se ha podido realizar una red que permita comprobar el comportamiento omnidireccional. Pese a haber obtenido un desfase no deseado, el objetivo de tener una distribución de potencia uniforme se ha visto cumplido.

El diagrama de radiación omnidireccional obtenido es bastante cercano al deseado teniendo en cuenta la imposibilidad de simular correctamente la estructura y el modelado básico del campo radiado, consiguiendo una caída máxima de 8 dB en la frecuencia de trabajo, teniendo un valor medio de aproximadamente 5 dB. Se aprecia una caída en ganancia debido al carácter omnidireccional de la antena: al haber un reparto equitativo de potencia, los 5.4 dB del parche individual se ven distribuidos entre cada una de las seis direcciones de apuntamiento de cada parche.

7.2 Trabajo futuro

Debido al tiempo limitado en la realización de este trabajo, algunos aspectos no han podido ser cubiertos o desarrollados con la precisión requerida.

En primer lugar, se puede apreciar que el ancho de banda de la antena es muy limitado. Una de las posibles mejoras aplicables teniendo en cuenta el trabajo ya realizado sería cambiar el elemento unitario a un doble parche apilado, es decir, incluir un segundo parche resonante el cual generaría una segunda frecuencia de resonancia muy próxima a la original y obteniendo un ancho de banda combinado mayor.

Otro punto de mejora sería a la hora de modelar el campo radiado para la selección de la estructura. La aproximación utilizada, $\cos^x(\phi)$, es la más básica posible pero, teniendo el diagrama de radiación medido, se podría conseguir un resultado más próximo a la realidad.

Por último, en el comienzo de este trabajo se habló sobre la posibilidad de cambiar el comportamiento de la antena en función de la red de alimentación. El diseño que se implementó era el de una red que distribuyera la potencia de forma uniforme pero, con la inclusión de switches o desfases en la misma se podría conseguir un comportamiento totalmente diferente manteniendo la misma estructura.

REFERENCIAS

- [1] **Cardama, Jofre, Rius, Romeu, Blanch, Ferrando**, Antenas, UPC 2002.
- [2] **José Luis Masa Campos**. Antenas y Compatibilidad Electromagnética, 2014. Asignatura del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de la Telecomunicación, impartida en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.
- [3] **Jorge Alfonso Ruiz Cruz**. Medios de Transmisión, 2012. Asignatura del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de la Telecomunicación, impartida en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.
- [4] **José Luis Masa Campos, Jorge Alfonso Ruiz Cruz**. Antenas y circuitos de alta frecuencia, 2009. Asignatura de máster impartida en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.
- [5] **Balanis, C.A.** Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley & Sons Inc, 1997.
- [6] Datasheet RF-35 Taconic. <http://www.taconic-add.com/pdf/rf35.pdf>
- [7] Datasheet PLA-4043D.
http://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_films_pdf.pdf
- [8] **Sipus, Z.; Persson, P.; Lanne, M.; Heckler, M.; Maci, S.; Masa-Campos, J.L.; Knott, P.; Erturk, V.; Vandenbosch, G.** "Structuring Research on Conformal Antennas a European Collaboration," *Antennas and Propagation, 2007. EuCAP 2007. The Second European Conference on*, pp.1,4, 11-16 Nov. 2007
- [9] **Al-Rizzo, H.M.; Clark, K.G.; Tranquilla, J.M.; Adada, R.A.; Elwi, T.A.; Rucker, D.** "Enhanced Low-Angle GPS Coverage Using Solid and Annular Microstrip Antennas on Folded and Drooped Ground Planes," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol.57, no.11, pp.3668,3672, Nov. 2009
- [10] **Masa, J.L.; Serna, J.M.; Sierra, M.** "Circularly Polarized Omnidirectional Patch Array for Millimetre Application", *XIX URSI/COST 284*, Sept. 2004

ANEXO A: SOFTWARE

Las herramientas software utilizadas en este Trabajo Fin de Grado han sido las siguientes:

CST Microwave Studio

CST Microwave Studio es la principal herramienta utilizada en el diseño de este trabajo.

Se trata de un software especializado en la simulación 3D de campos electromagnéticos de circuitos de alta frecuencia.

Con este programa se pueden analizar infinidad de dispositivos como pueden ser filtros, antenas o acopladores. A su vez, permite la importación y exportación de múltiples formatos de archivos, como pueden ser aquellos para diseño tridimensional (STL), archivos .txt con datos de simulación que permiten el procesamiento de resultados en otro software o archivos DXF para poder extraer planos.

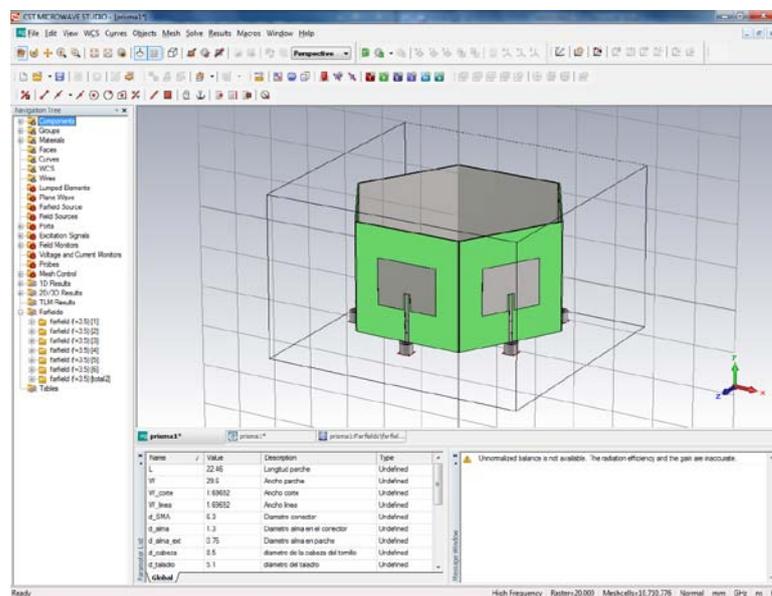


Figura A-1: Interfaz de CST

Advanced Design System (ADS)

ADS es un software de diseño y simulación circuital para radiofrecuencia, microondas y aplicaciones digitales de alta velocidad.

Su entorno de desarrollo contiene múltiples librerías que permiten el diseño de circuitos de alta frecuencia, permitiendo mostrar los resultados de las simulaciones de forma personalizada. También es capaz de generar *layouts* o 'planos' de los circuitos diseñados, de los cuales se pueden extraer los ficheros necesarios para la construcción del diseño.

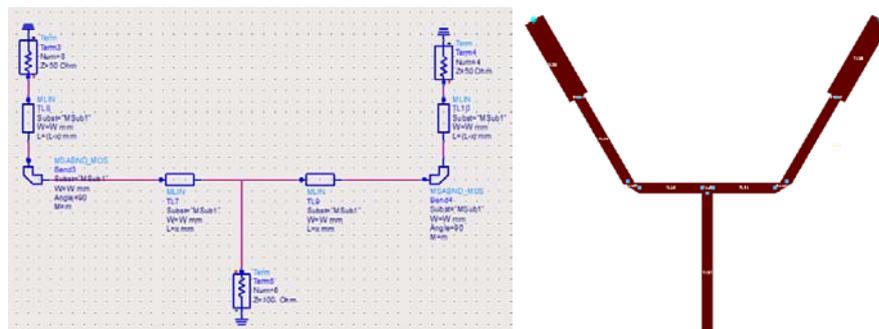


Figura A-2: Interfaz de ADS circuital (izquierda) y layout (derecha)

ADS también permite, al igual que CST, importar y exportar múltiples archivos, como pueden ser de parámetros S o los ya nombrados ficheros para la construcción, en este caso, *gerber*.

ANEXO B: FABRICACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS

En este trabajo se ha realizado la construcción de seis parches y una red de alimentación con tecnología de sustrato integrado en circuitos impresos. Para ello se ha utilizado la máquina de fresado de PCB's LPKF ProtoMat S100 propiedad de la Escuela con la cual se puede alcanzar la precisión necesaria para esta construcción.

Para realizar la construcción de un circuito impreso a partir del diseño software se siguen los siguientes pasos:

- Se toma como punto de partida el diseño 3D realizado en *CST Microwave Studio*, el cual será exportado en formato DXF.
- Los archivos DXF son importados en *ADS*, donde se genera un fichero *gerber* por cada capa: superior, inferior, contorno y taladros.
- Con el programa *CircuitCAM* y tomando como base los *gerbers* extraídos de *ADS* se seleccionan las herramientas y otros parámetros de construcción de la placa. Con todo ello se genera un fichero LMD el cual se importará a *BoardMaster*, encargado de controlar la fresadora permitiendo el control de la máquina en las distintas fases de la construcción.

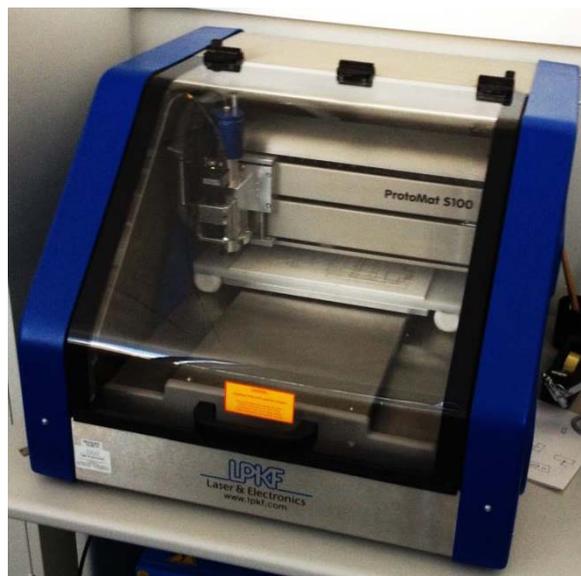


Figura B-1: Fresadora LPKF ProtoMat S100