

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Diseño y fabricación de antenas en tecnología plana para Manpacks y aplicaciones TT&C.



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor: Víctor Sesma Santos

Director: Juan Carlos Iriarte Galarregui

Pamplona, 19 de Enero de 2018



## RESÚMEN

---

La tecnología espacial continua aportando los datos que tanta importancia suponen para el desarrollo global. La coordinación entre satélites y lanzaderas con estaciones terrestres necesita de una tecnología precisa y segura. Tales características las aportan aplicaciones como la telemetría, rastreamiento o telecomando, también llamadas “*TT&C systems*”. Junto con los sistemas de comunicación espacial, y manteniendo cierta similitud, la industria de defensa siempre se ha caracterizado por emplear sistemas de comunicaciones modernos, robustos y seguros en el campo de batalla entre la infantería y bases militares. Uno de los dispositivos más populares utilizados en esta área son los *Manpacks*, radio definida por software en redes de combate táctico.

Las antenas planas que se diseñarán en este proyecto para aplicaciones TT&C y Manpacks son antenas parche y antenas slot. Los diseños de antena parche se realizan bajo unas condiciones específicas propias del sector comercial en cuanto a ganancia (6.5dBi), *axial ratio* (<4dB), ancho de banda (4%), polarización (CP) y frecuencia de operación, estando esta última en un rango de 2.2GHz-2.29GHz. El objetivo principal será cumplir con estas especificaciones.

Como bien es sabido, una de las limitaciones más importantes de las antenas parche es el estrecho ancho de banda. Con este motivo, se realiza un estudio de mejora de ancho de banda en antenas parche utilizando distintos grosores de sustrato. Para alcanzar la ganancia requerida, será necesario recurrir a configuraciones en array de antenas parche, con lo que se mostrará el proceso de mejora tanto de ancho de banda como de ganancia y así presentar el diseño que cumpla con las especificaciones.

Por otra parte, y en relación con las aplicaciones TT&C, se presentan situaciones en la que se ve necesario recurrir a antenas con ambas capas metálicas. Este hecho se debe a que las lanzaderas poseen un exterior metálico y sufre de rozamiento y cambios bruscos, con lo que se debe utilizar antenas de este estilo. Para ello se van a llevar a cabo diseños de antenas slot para cumplir con estas características, pasando por distintas configuraciones en relación con la línea de alimentación hasta llegar a una versión final. El proceso consta de un diseño con línea microstrip, otro diseño con stripline y ambas capas metálicas y finalmente el mismo diseño con la inclusión de postes cilíndricos con el fin de mitigar los modos de sustrato.

## ABSTRACT

---

Space technology provides useful data for global development. Coordination between satellites and aircrafts with terrestrial stations needs an accurate and secure technology. Applications such as telemetry, tracking and command systems (TT&C systems) provide those previous characteristics. Together with space communication systems, and keeping certain similitude, Defense Industry has always been characterized by the use of modern, robust and secure communications systems between the infantry and military bases. One of the most popular devices in this area is the Manpack, a tactical software-defined combat-net radio.

Patch and slot antennas are the types of planar antennas that will be designed in this project. The designs are performed under certain commercial requirements in terms of gain (6.5dBi), axial ratio (<4dB), bandwidth (4%), polarization (CP) and operation frequency located at the 2.2GHz-2.29GHz range. The main objective is design antennas to comply with these specifications.

It is well known that the narrow bandwidth is one of the most important limitations of patch antennas. With this motive, a bandwidth enhancement study is performed on patch antennas using different substrate heights. In order to reach the required gain, it will be necessary appeal to array configurations and it will be shown the enhancement process of both the bandwidth and gain parameters.

On the other hand, and regarding TT&C applications, there are situations where it is necessary to use antennas with metallic layers on top and bottom. This fact is due to the aircraft's metallic exterior that suffers from friction and abrupt changes, so it is recommendable to use these type of antennas. The designs that are going to take part to comply with these characteristics are slotted antennas. This process consists of different configurations, starting from microstrip slotted antenna, another stripline slotted antenna with both metallic layer design and finishing with a final design of stripline slotted antenna with both metallic layers and the inclusion of cylindrical pins along the substrate to remove substrate's modes.



## Lista Palabras Clave

---

- Antena Parche Microstrip
- Sistemas TT&C
- Manpacks
- Polarización Lineal
- Polarización Circular
- Array
- Subarray Síncrono
- Ancho de Banda
- Ganancia
- Antena Slot
- Lóbulo trasero
- Modos de substrato



# Tabla de contenido

---

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

<b>1.1</b>	<b>Antenas parche microstrip .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2</b>	<b>Aplicaciones TT&amp;C y Manpacks.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3</b>	<b>Software para el diseño y simulación .....</b>	<b>9</b>
<b>1.4</b>	<b>Estructura del proyecto .....</b>	<b>10</b>
1.4.1	Especificaciones requeridas para el diseño .....	10
1.4.2	Procedimiento del diseño .....	10

## CAPÍTULO 2: PROPIEDADES DE LA LINEA MICROSTRIP

<b>2.1</b>	<b>Funcionamiento de la línea microstrip .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Fórmulas para <math>\epsilon_e</math>, <math>Z_0</math> y atenuación .....</b>	<b>13</b>

## CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS DE LAS ANTENAS PARCHE MICROSTRIP

<b>3.1</b>	<b>Teoría general de antenas parche microstrip.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Métodos de análisis .....</b>	<b>16</b>
3.2.1	Modelo de línea de transmisión.....	17
<b>3.3</b>	<b>Efecto de la forma del conductor .....</b>	<b>20</b>
3.3.1	Parches rectangulares y cuadrados .....	20
3.3.2	Parches circulares y elípticos .....	21
3.3.3	Parches triangulares y sector de disco.....	21
3.3.4	Anillos anulares.....	21
<b>3.4</b>	<b>Fundamentos de radiación e impedancia en parches de capa única. ....</b>	<b>22</b>
<b>3.5</b>	<b>Métodos de excitación de parches microstrip .....</b>	<b>24</b>
3.5.1	Parches con edge-fed .....	25
3.5.2	Parches con probe fed .....	26
3.5.3	Parches por acoplamiento de proximidad.....	27
3.5.4	Parches por acoplamiento de apertura .....	28

## CAPÍTULO 4: GENERACIÓN DE POLARIZACIÓN CIRCULAR EN ANTENAS PARCHE MICROSTRIP

<b>4.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>30</b>
<b>4.2</b>	<b>Método de alimentación único</b>	<b>30</b>
<b>4.3</b>	<b>Método de alimentación doble</b>	<b>31</b>
<b>4.4</b>	<b>Subarrays síncronos</b>	<b>32</b>
<b>4.5</b>	<b>Comparación de las técnicas</b>	<b>33</b>

## CAPÍTULO 5: FUNDAMENTOS DE ARRAYS DE ANTENAS

<b>5.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>35</b>
<b>5.2</b>	<b>Teoría básica de funcionamiento</b>	<b>36</b>
5.2.1	Factor de agrupación	37
5.2.1	Grating lobes	37

## CAPÍTULO 6: MEJORANDO EL ANCHO DE BANDA EN ANTENAS PARCHE MICROSTRIP

<b>6.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>40</b>
<b>6.2</b>	<b>Técnicas intrínsecas</b>	<b>41</b>
<b>6.3</b>	<b>Large Slot Excited Patches (Resonancia mediante apertura de grandes dimensiones)</b>	<b>42</b>
<b>6.4</b>	<b>Otros métodos</b>	<b>43</b>

## CAPÍTULO 7: DISEÑO DE ANTENA PARCHE CON POLARIZACIÓN CIRCULAR A 2.2GHz

<b>7.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>44</b>
<b>7.2</b>	<b>Calculo de las dimensiones del diseño</b>	<b>45</b>
<b>7.3</b>	<b>Resultados de la antena parche microstrip</b>	<b>52</b>
7.3.1	Mejora de ancho de banda	54
7.3.2	Resultados con grosor de 2.54mm	56
7.3.3	Resultados con grosor de 3.175mm	58
7.3.4	Resultados con grosor de 4.75mm	59
7.3.5	Resultados con grosor de 5.537mm	61
7.3.6	Resultados grosor de 6.35mm	62
7.3.7	Resumen del ancho de banda	64
7.3.8	Resumen ganancia	65

<b>7.4 Diseño de array 2x2 de antena parche microstrip.....</b>	<b>65</b>
7.4.1 Obtencion de polarización circular en los arrays .....	65
7.4.2 Resultados de ancho de banda de polarización y axial ratio .....	67
7.4.3 Resultados de S11 y ganancia .....	68
7.4.3.1 Resultados con un sustrato de grosor 1.27mm .....	68
7.4.3.2 Resultados con un grosor de 2.54mm .....	69
7.4.3.3 Resultados con un grosor de 3.175mm .....	70
7.4.3.4 Resultados con un sustrato de grosor 4.75mm .....	71
7.4.3.5 Resultados con un sustrato de grosor 5.537mm.....	72
7.4.3.6 Resultados con un sustrato de grosor 6.35mm.....	73
7.4.4 Conclusiones .....	74

## CAPÍTULO 8: DISEÑO DE ANTENA SLOT CON POLARIZACIÓN LINEAL A 2.2GHZ

<b>8.1 Diseño de Antena Slot con línea microstrip .....</b>	<b>79</b>
8.1.1 Calculo de dimensiones.....	80
8.1.2 Resultados .....	82
<b>8.2 Diseño de Antena Slot con Stripline .....</b>	<b>84</b>
8.2.1 Calculo de las dimensiones .....	85
<b>8.3 Diseño de Antena Slot con Stripline y postes cilíndricos .....</b>	<b>86</b>
8.3.1 Calculo de las dimensiones .....	87
8.3.2 Resultados.....	88

## CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

<b>Bibliografía .....</b>	<b>98</b>
---------------------------	-----------



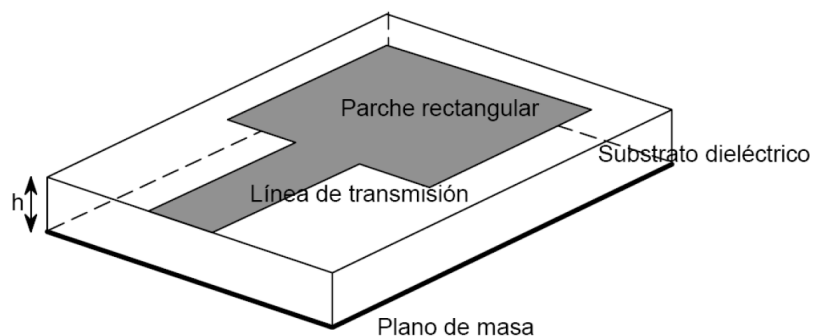
## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El primer capítulo tiene como objetivo introducir los temas principales y el contexto que va a abarcar el proyecto en cuanto al diseño, fabricación y medida de antenas en tecnología plana para Manpacks y aplicaciones TT&C.

### 1.1 ANTENAS PARCHE MICROSTRIP

Las antenas parche microstrip son probablemente la solución más versátil para muchos de los sistemas que requieran un elemento radiante. Este tipo de antenas entran en la categoría de antenas impresas: elementos radiantes que utilizan circuitos impresos para desarrollar estructuras radiantes y de alimentación. [1]

Una línea microstrip consiste en una tira conductora colocada sobre un plano de masa y separada de este por un material dieléctrico. La antena parche microstrip (*Figura 1.1.1*), es por tanto una sección de línea microstrip resonante. [2]



*Figura 1.1.1: Antena parche microstrip [2]*

A mitades de 1970 se observaron las primeras contribuciones reales hacia esta tecnología. En la década de los ochenta se realizaron investigaciones y desarrollos en torno a las antenas parche por parte de la industria de defensa, avanzando en uno de sus problemas más notables; el estrecho ancho de banda de impedancia. A partir de 1990 el desarrollo en esta área entro de lleno en los sistemas comerciales, siendo la comunicación móvil una aplicación primaria. Además se investigaron técnicas de mejora de ancho de banda. Ya en el cambio de siglo, los parches microstrip han sido ampliamente utilizados en la mayoría de los sistemas de comunicaciones de “espacio-libre”, entre los que se encuentran las aplicaciones TT&C. [1]

Las antenas parche microstrip poseen diversas ventajas que hacen de ellas una solución adaptable y popular:

- Tamaño y perfil: En su forma convencional, el volumen de la antena parche microstrip es relativamente pequeño comparado con otros elementos radiantes. El grosor mínimo del material, o el perfil, permite al parche que sea fácilmente integrable sobre la superficie de varios objetos, como los del fuselaje de un avión o misil, o incluso el de un ordenador.[1]
- Facilidad de fabricación, integración y bajo coste: El parche microstrip puede desarrollarse utilizando circuitos impresos estándares con técnicas de grabación, que equivalen a un reducido coste de fabricación.[1]
- Facilidad de implementar arrays: Este tipo de antenas son consideradas como radiadores de ganancia media (típicamente menor que 8 dBi), por lo que para aplicaciones en las que se requiera mayor ganancia, es necesario aplicar técnicas de arrays. Precisamente estas técnicas son directas, añadiendo varias líneas de alimentación y varios parches (*Figura 1.1.2*) según sean necesarios.[1]
- Eficiencia: Las antenas parche microstrip son básicamente radiadores eficientes. Esto puede ser atribuido a un simple hecho: son radiadores estilo-resonantes. Las antenas resonantes son más eficientes que sus homólogos de banda ancha. La eficiencia depende del material, en el que derivan las pérdidas del conductor, del dieléctrico y la de onda de superficie. También es dependiente del proceso de alimentación adoptado. [1]



Sin embargo, no todo son ventajas en las antenas parche. Existen ciertas desventajas que son importante conocer a la hora de realizar su diseño:

- Ancho de banda de impedancia: En su forma convencional, el ancho de banda de la antena parche microstrip es estrecho, limitado a valores por debajo de un par de porcentajes de la frecuencia de operación. Esto es debido a que al ser una antena estilo-resonante, la condición de resonancia eficiente solo se satisface en frecuencias de banda estrecha. El fino grosor también influye en el corto ancho de banda. [1]
- Excitación de ondas de superficie: Debido a la presencia del substrato dieléctrico, las antenas parche microstrip convencionales excitarán siempre la onda de superficie  $TM_0$  (a no ser que se utilice el aire como material). Esta excitación puede llevar a reducir la eficiencia y también a acoplar la onda de superficie generada a otros aspectos de la antena y la red de alimentación. [1]
- Funcionamiento de radiación: Aunque el funcionamiento de radiación del parche microstrip se comporta razonablemente bien y logra polarización dual relativamente fácil, hay casos en los que la tecnología microstrip no funciona adecuadamente para alcanzar los requerimientos del sistema. [1]
- Tamaño: El tamaño del parche aparece como ventaja y desventaja, simplemente porque hay aplicaciones en las que esta forma de antena impresa es demasiado grande. Estas aplicaciones están asociadas a la industria inalámbrica y en particular a terminales de comunicación “hand-held” operando por debajo de 2 GHz, donde estos dispositivos son demasiado pequeños en comparación con la longitud de onda. [1]

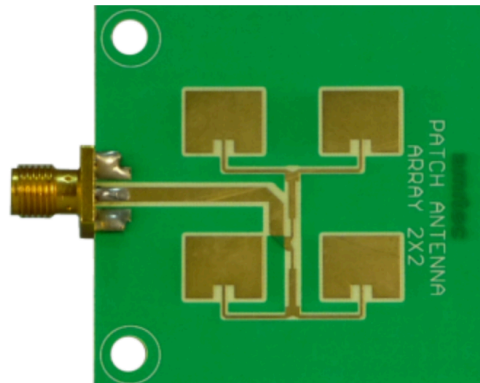


Figura 1.1.2: Array 2x2 [4]

## 1.2 APLICACIONES TT&C Y MANPACKS

Los subsistemas de telemetría, tracking y control (TT&C) de un satélite proveen conexión entre el propio satélite y las instalaciones de tierra. El propósito de las funciones TT&C es asegurar el correcto funcionamiento del satélite. Como parte del bus de comunicaciones, el subsistema TT&C es requerido para todo tipo de satélites independientemente de la aplicación. [3]

Los subsistemas TT&C se encargan de tres funciones importantes. (1) Monitorización de la salud y estado del satélite a través de la colección, procesado y transmisión de datos desde varios subsistemas de vehículos espaciales. (2) La determinación de la localización exacta del satélite a través de la recepción, procesamiento y transmisión de señales de colocación. (3) Control adecuado del satélite a través de la recepción, procesamiento e implementación de comandos transmitidos desde tierra. [3]

Por otra parte los sistemas Manpack son radios para redes de combate táctico definidos por software. Suelen cubrir un rango de frecuencias de 30-2000 MHz y ciertos manpacks poseen la certificación de la NSA para la transmisión de voz y datos en nivel Top Secret. [4]

Este proyecto se va a centrar en aplicaciones TT&C y manpacks con la implementación de antenas parche. Sin embargo, este tipo de antenas cuenta con una amplia variedad de aplicaciones en las que forma parte.

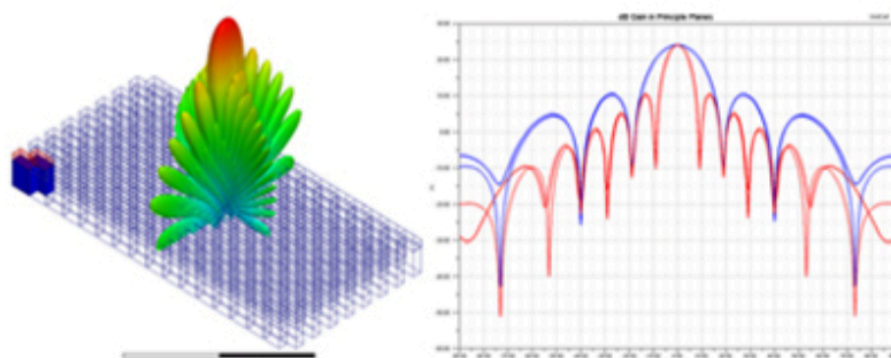
Aplicaciones como el Radar, sistema utilizado en vehículos espaciales donde la ligereza de la antena impresa es muy ventajosa. Aplicaciones de comunicación móvil de estaciones base, la cual es una de las más utilizadas por las antenas parche microstrip, y también aplicaciones como comunicación móvil celular, una de las más recientes.[1]

### 1.3 SOFTWARE PARA EL DISEÑO Y SIMULACIÓN

Este proyecto se ha ayudado de la herramienta software HFSS (High Frequency Electromagnetic Field simulation) para el diseño y simulación de todos los esquemáticos.

ANSYS HFSS es una solución de simulación de campos electromagnéticos de alta frecuencia, que utiliza el método de elemento finito de alta precisión (FEM), la técnica del método de gran escala de momentos (MoM), los métodos asintóticos de escala ultra grande de óptica física (PO) y disparo y rayos rebote (SBR). [6]

Este software (*Figura 3*) utiliza técnicas de mallado adaptativo automático, el cual requiere solamente especificar la geometría, propiedades del material y la salida esperada. El proceso de mallado utiliza una técnica de mallado volumétrico altamente robusto e incluye capacidades multi-amenaza que reduce la cantidad de memoria utilizada y acelera el tiempo de solución. Esta tecnología probada elimina la complejidad de construir y refinar un elemento de malla finito y realiza un practico análisis numérico avanzado para todos los niveles de organización. [6]



*Figura 1.2.1: Software HFSS. [4]*

## 1.4 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

### 1.4.1 ESPECIFICACIONES REQUERIDAS PARA EL DISEÑO

En el proyecto se va a introducir el diseño de diversas antenas parche con el objetivo de satisfacer ciertos parámetros (*Tabla 1.4.1.1*) requeridos y el de mejorar una de las desventajas más importantes de las antenas parche: el ancho de banda de impedancia y de polarización.

Por otra parte, con el fin de lograr una antena en su mayor parte metálica y conformada con su entorno, se diseñarán antenas slot a este rango de frecuencias para desarrollar otro tipo de antena popular en aplicaciones TT&C.

Especificaciones	
Frecuencia	2.2-2.29 GHz
Ganancia	6.5 dBi
Ancho de Banda	4%
Axial Ratio	< 4 dB
Polarización	Circular (CP)

*Tabla 1.4.1.1: Tabla de especificaciones*

### 1.4.2 PROCEDIMIENTO DEL DISEÑO

Todos los diseños que se realizarán en este proyecto cuentan con un sustrato Rogers 5880 de constante dieléctrica  $\epsilon_r = 2.2$ . El grosor del sustrato y por tanto las dimensiones del parche irán variando entre diferentes diseños con el fin de obtener el estudio completo del ancho de banda.

Primeramente, se dibujará en el software y se calcularán las dimensiones, tanto de la antena como de otros elementos (substrato, slots, líneas, etc.) para que resuene correctamente en las frecuencias de 2.2-2.29 GHz.

Cabe destacar, que al requerirse una polarización circular, se va a optar por introducir un slot diagonal en el parche para satisfacer esta especificación. Por tanto, se necesitara ajustar las dimensiones teóricas del parche para la correcta resonancia a la frecuencia de operación.

En cuanto al método de alimentación, se ha optado por una alimentación por conector desde el plano de masa hacia el parche.

A continuación, y una vez diseñado varios parches de distintos grosores, se llevara a cabo el diseño de arrays de 2x2 con los mismos parámetros de parche y substrato utilizados anteriormente con el objetivo de estudiar la mejora del *axial ratio* y ganancia con esta configuración.

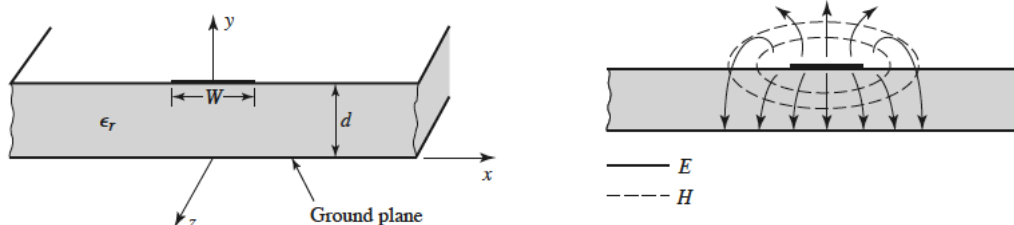
Por otro lado, las antenas slot se diseñaran bajo el mismo pretexto que las antenas parche pero con polarización lineal, con el mismo tipo de substrato y a la misma frecuencia. Primero se diseñara una antena slot alimentada con una línea microstrip y después una antena slot alimentada con una línea stripline simétrica con diferentes modificaciones para lograr suprimir el teórico lóbulo trasero que radia con la línea microstrip.

## CAPÍTULO 2: PROPIEDADES DE LA LÍNEA MICROSTRIP

En el presente capítulo se pretende introducir las propiedades de la línea Microstrip, que va a ser utilizada en diversos diseños.

### 2.1 FUNCIONAMIENTO DE LA LÍNEA MICROSTRIP

La línea Microstrip es uno de los tipos de líneas de transmisión plana más populares debido principalmente a que pueden ser fabricadas por procesos fotolitográficos y son fácilmente miniaturizables e integrables en dispositivos activos y pasivos. La geometría de la línea microstrip está presente en la *Figura 2.1.1*. Un conductor de anchura  $W$  se imprime sobre un substrato dieléctrico estrecho y con plano de tierra de grosor  $d$  y permitividad relativa  $\epsilon_r$ ; la *Figura 2.1.1* muestra también el esbozo de los campos de la línea. [7]



*Figura 2.1.1: Línea microstrip y campos generados [7]*

Si el substrato dieléctrico no estuviera presente ( $\epsilon_r = 1$ ), tendríamos una línea de dos cables que consiste en un conductor de tira (strip) plana sobre un plano de masa, incrustado en un medio homogéneo (aire). Esto constituye una línea de transmisión simple TEM con velocidad de fase  $v_p = c$  y constante de propagación  $\beta = k_0$ . [7]

En la actualidad, los campos exactos de la línea microstrip lo constituye la onda TM-TE y requiere técnicas de análisis más avanzadas. Sin embargo, en la mayoría de aplicaciones prácticas, el substrato dieléctrico eléctricamente es muy estrecho ( $d \ll \lambda$ ), es por esto que los campos son quasi-TEM. En otras palabras, los campos son esencialmente los mismos que en el caso estático (DC). Por tanto, se pueden obtener aproximaciones adecuadas para la velocidad de fase, constante de propagación e impedancia característica gracias a las soluciones estáticas o quasi-estáticas. [7]

Por esta aproximación, la velocidad de fase y constante de propagación se pueden expresar como:

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.1)$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_e} \quad (2.2)$$

donde  $\epsilon_e$  es la constante dieléctrica efectiva de la línea microstrip y depende de la constante dieléctrica del substrato, el grosor del substrato, la anchura del conductor y la frecuencia. Por el hecho que algunas líneas de campo están en la región dieléctrica y otros en el aire, la constante dieléctrica efectiva satisface la relación: [7]

$$1 < \epsilon_e < \epsilon_r \quad [7]$$

## 2.2 FÓRMULAS PARA $\epsilon_e$ , $Z_0$ Y ATENUACIÓN

La constante dieléctrica efectiva de una línea microstrip es aproximadamente:

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (2.3)$$

Dadas las dimensiones de la línea microstrip, la impedancia característica puede calcularse como:

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left( \frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) & \text{for } W/d \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} [W/d + 1.393 + 0.667 \ln (W/d + 1.444)]} & \text{for } W/d \geq 1. \end{cases} \quad (2.4)$$

Para una impedancia característica  $Z_0$  y una constante dieléctrica  $\epsilon_r$ , se puede obtener el ratio  $W/d$ :

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{for } W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{for } W/d > 2, \end{cases} \quad (2.5)$$

donde,

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (2.6)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}.$$



## CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS DE LAS ANTENAS PARCHE MICROSTRIP

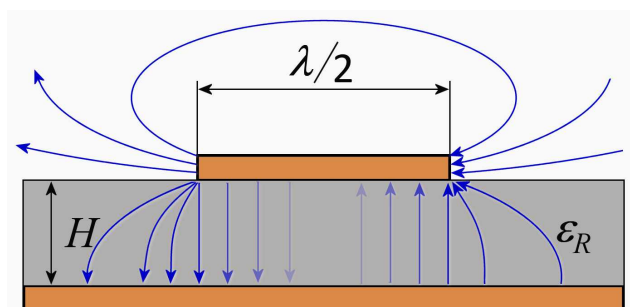
A continuación se va detallar los fundamentos generales de las antenas parche microstrip, su teoría general, métodos de análisis, así como diferentes métodos de alimentación

### 3.1 TEORÍA GENERAL DE ANTENAS PARCHE MICROSTRIP

La antena parche microstrip es un radiador estilo-resonante, por lo que una de sus dimensiones ha de ser aproximadamente  $\lambda_g/2$ , donde  $\lambda_g$  es la longitud de onda en la guía tomando en consideración el entorno que rodea a la antena impresa. [1]

La dimensión de resonancia depende en la forma del parche conductor, por lo que las propiedades del substrato como son la constante dieléctrica  $\epsilon_r$  y la altura juegan un papel muy importante en el funcionamiento de la antena impresa. [1]

Básicamente, cuando se aplica voltaje al punto de alimentación del radiador, se excitará una corriente o modo en el propio parche, y se generarán campos eléctricos verticales entre el parche y el plano de masa (*Figura 3.1.1*). [1]



*Figura 3.1.1: Campos eléctricos en la antena parche microstrip [1]*

Gracias a que los slots formados (entre los bordes del parche y el plano de masa) están a  $\lambda_g/2$ , los campos radiados se sumarán constructivamente creando un radiador resonante eficiente. La eficiencia de radiación dependerá del material utilizado, así como el confinamiento de campos que vendrá determinado por la constante dieléctrica del sustrato y su altura. [1]

Desde el punto de vista de circuito equivalente, cuando el punto de alimentación se cierra al circuito abierto del borde del parche, desde el punto de alimentación se verá un gran voltaje y una corriente mínima, resultando de una alta impedancia de entrada. Cuando el punto de alimentación está en el centro del parche, la impedancia de entrada estará cercana a cero, ya que el voltaje es mínimo (estando a  $\lambda_g/4$  del circuito abierto) y la corriente máxima, presentando una baja impedancia de entrada en el puerto de entrada. Por tanto, la ubicación de la alimentación puede usarse para controlar la impedancia de entrada de la antena. [1]

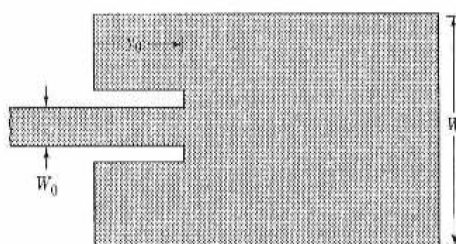


Figura 3.1.2: Punto de alimentación [1]

## 3.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS

El parche microstrip es un radiador relativamente complicado. En esencia, es una antena resonante ubicada en un entorno no-homogéneo. [1]

Después de varios años, se han propuesto numerosos métodos numéricos/analíticos usados para analizar este radiador. Estos métodos pueden agruparse como técnicas aproximadas o análisis de onda completa. Las técnicas aproximadas, el modelo de línea de transmisión y el modelo de cavidad usan suposiciones simplificadas para reducir la complejidad del análisis de la antena. [1]

Estas herramientas de diseño pueden ser bastante precisas bajo ciertas condiciones. Una de esas condiciones es que el sustrato debe ser relativamente fino ( $0.02 \lambda_0$ ). Otra condición es que la constante dieléctrica sea relativamente baja. Una ventaja de utilizar estas técnicas es la velocidad en determinar el funcionamiento predicho y por tanto el uso de estos métodos para obtener tendencias globales. [1]

Los análisis de onda completa obviamente proporcionan resultados más precisos, ya que aplican las ecuaciones de Maxwell al problema y asegurándose que las condiciones de contorno asociadas a la estructura son satisfactorias.[1]

Las técnicas de análisis de onda completa se puede subdividir en dos campos, dependiendo en cómo se resuelven las ecuaciones de Maxwell; diferencialmente o integrando. En los procedimientos de análisis de onda completa, el aproximamiento por ecuación integral es el más maduro con la formulación del Dominio Espectral y el Dominio Espacial, ambos aplicados para predecir el funcionamiento del parche microstrip desde principios de 1980. Por otra parte, la solución por integrales cargaba en el pasado el tiempo de computación para la resolución del problema. [1]

A continuación se detallará el modelo de línea de transmisión, útil para calcular diversos parámetros de los diseños con antenas parche microstrip.

### 3.2.1 MODELO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Este modelo se basa en que una antena parche microstrip puede modelarse como una sección de línea de transmisión colocada entre dos ranuras radiantes. Es uno de los modelos más sencillos para realizar el diseño de una antena parche microstrip, aunque no siempre el más recomendado debido a su imprecisión. Además, sólo sirve para el diseño de antenas parche cuya forma sea rectangular o circular. No obstante, si el problema en concreto en el que la precisión de esta técnica es razonablemente suficiente, ofrece una primera aproximación para realizar el diseño. De todos modos, probablemente serán necesarias diversas modificaciones iterativas en el diseño de la antena parche. [1] [8]

En este modelo los bordes de la antena son considerados como dos aperturas (slots) que radian. Cada apertura posee una anchura  $w$  (que será el ancho de la antena), estará situada a una altura  $h$  sobre el plano de masa (será la altura o grosor del substrato) y estarán separadas entre ellas una distancia  $l$  (será la longitud de la antena). [8]

Estas aperturas son consideradas como admitancias complejas compuestas de una conductancia (de valor  $G$ ) y una susceptancia (de valor  $B$ ). En la siguiente imagen se muestra el circuito equivalente para una antena rectangular con el modelo de línea de transmisión. [8]

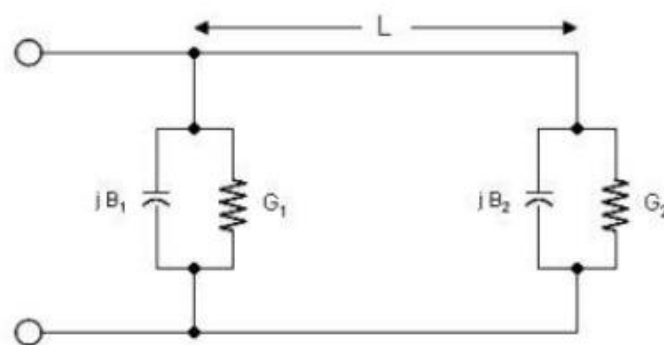


Figura 3.2.1.1: Circuito equivalente de un parche rectangular en el modelo de línea de transmisión [11]

La distribución de los campos que se producen en los bordes de una antena parche microstrip presenta los llamados *fringing effects*. Los campos se desbordan en los bordes de la antena formando las líneas de campo apreciables en las siguientes imágenes. [9]

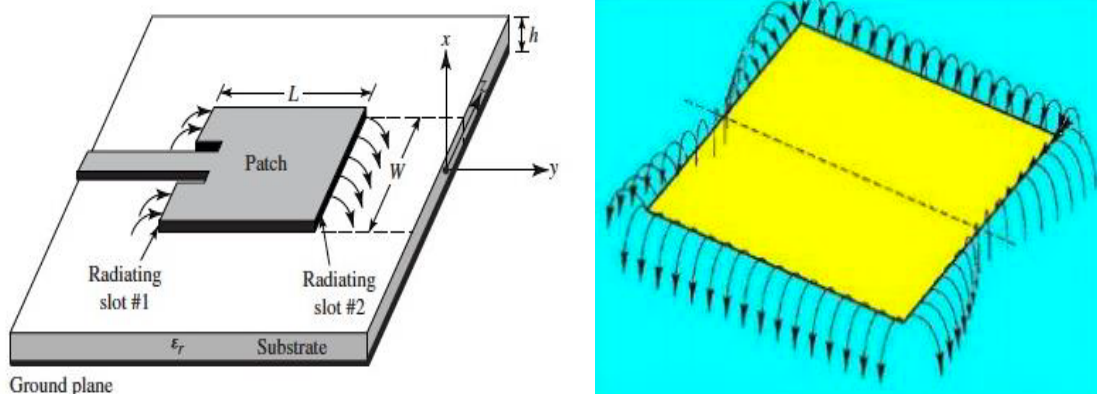


Figura 3.2.1.2: Líneas de campo provocadas por fringing effect. [8][10]

Este efecto dependerá tanto de la frecuencia de operación como del sustrato empleado, debido a que se va a manifestar en el medio que rodea la antena, es decir, el aire y el sustrato. Al producirse este efecto en dos medios distintos (aire y sustrato) la distribución de campos será distinta debido a que cada medio tiene una permitividad eléctrica diferente. [8]

Para evitar la existencia de dos permitividades eléctricas diferentes, se define un nuevo parámetro, la permitividad eléctrica efectiva  $\epsilon_{eff}$ , combinando ambas permitividades eléctricas. [9]

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{H}{W} \right)^{-1/2} \quad (3.2.1)$$

Donde  $\epsilon_r$  es la permitividad eléctrica del sustrato,  $H$  el grosor del sustrato y  $W$  la anchura del parche microstrip, calculada previamente mediante la siguiente expresión:[9]

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.2.2)$$

Siendo  $c$  la velocidad de la luz en el vacío.

Debido a los efectos provocados por los campos de desbordamiento (*fringing fields*) o *fringing effects*, la antena parche microstrip es eléctricamente mayor que sus dimensiones físicas, por lo que se deberá realizar un ajuste en la medida obtenida para la longitud de la antena. Dicho ajuste se calculará mediante la siguiente expresión. [8]

El cálculo de la longitud real viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta L = 0.412H \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{W}{H} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{W}{H} + 0.8 \right)} \quad (3.2.3)$$

$$L = L_r - 2\Delta L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (3.2.4)$$

### 3.3 EFECTO DE LA FORMA DEL CONDUCTOR

A continuación se explican los distintos efectos que tienen las formas del conductor de la antena parche.

#### 3.3.1 PARCHES RECTANGULARES Y CUADRADOS

Los primeros y probablemente la geometría más utilizada fueron las formas rectangulares y cuadradas (*Figura 3.3.1.1*). [1]



*Figura 3.3.1.1: Parches rectangulares [1]*

Para los parches rectangulares, la antena se excita en algún punto a lo largo de la dimensión resonante,  $L$ , para generar un modo en esa dirección. En general, la longitud del parche controla la frecuencia de resonancia y la anchura afecta al nivel de impedancia en resonancia así como al ancho de banda. Cuando mayor sea la anchura del parche, más pequeño será la impedancia de entrada de la antena, siempre bajo las condiciones de substrato previamente mencionadas. [1]

Por lo general, todos los conductores con forma rectangular tienden a tener mayor ancho de banda de impedancia, simplemente porque son más grandes que otro tipo de formas de conductor. Por otra parte, los parches cuadrados pueden utilizarse para general polarización dual o circular. [1]

### 3.3.2 PARCHES CIRCULARES Y ELÍPTICOS

Estas formas probablemente sean las segundas más populares. Los parches elípticos y circulares son ligeramente más pequeñas que sus homólogos rectangulares. Como resultado tienen una ganancia y ancho de banda menor que las anteriores.[1]

El parche circular, como el cuadrado tiene solo un grado de libertad en la forma del conductor, y ese es su radio. Por tanto, cambiando el radio se controlará la frecuencia de resonancia del parche circular. [1]

### 3.3.3 PARCHES TRIANGULARES Y SECTOR DE DISCO

Esta geometría es más pequeña que las formas rectangulares y circulares. Los parches triangulares tienden a generar niveles de polarización cruzada más alta, debido a la falta de simetría en su configuración. [1]

Para las antenas de sector de disco, si se excita el modo  $TM_{01}$ , el radio del disco controlará la frecuencia de resonancia y el ángulo del sector afectará al ancho de banda y a la impedancia. [1]

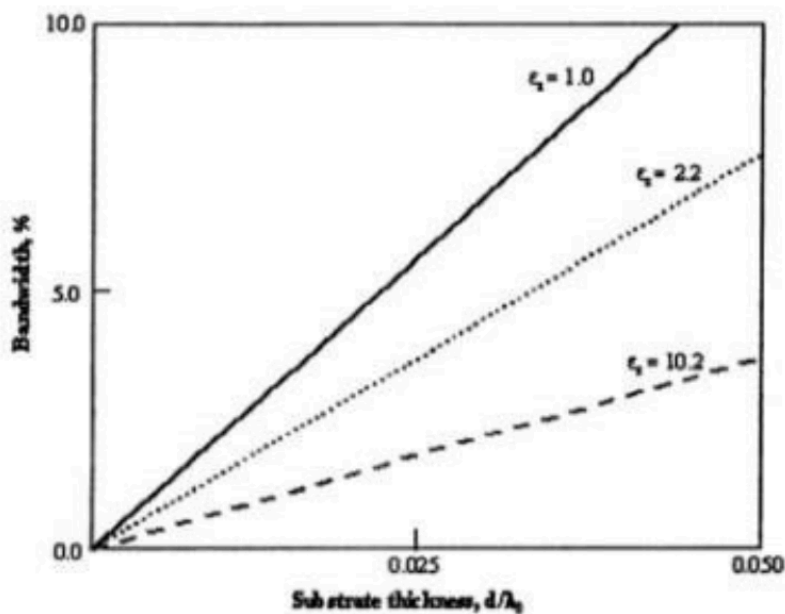
### 3.3.4 ANILLOS ANULARES

La geometría de anillo anulares es la forma más pequeña, una vez más a expensas del ancho de banda y la ganancia. Un problema asociado al anillo anular es que no es tan simple el proceso de excitación del modo de menor orden y obtener una impedancia de entrada cercana a  $50\Omega$ . [1]

Se puede ajustar tanto el anillo interior como el exterior para controlar la frecuencia de resonancia de la antena impresa, lo cual es una ventaja. Sin embargo, en el caso que el radio interior se acerque al exterior, el ancho de banda de impedancia se estrechará. [1]

### 3.4 FUNDAMENTOS DE RADIACIÓN E IMPEDANCIA EN PARCHES DE CAPA ÚNICA.

La *Figura 3.4.1* muestra fundamentos de tendencias muy importantes del funcionamiento de la antena parche microstrip de capa única como función de las propiedades de la lámina utilizada para fabricar el sustrato. Estas tendencias de funcionamiento representan las propiedades en su estado puro con método de excitación ideal. [1]



*Figura 3.4.1: Ancho de banda en función del grosor del sustrato [1]*



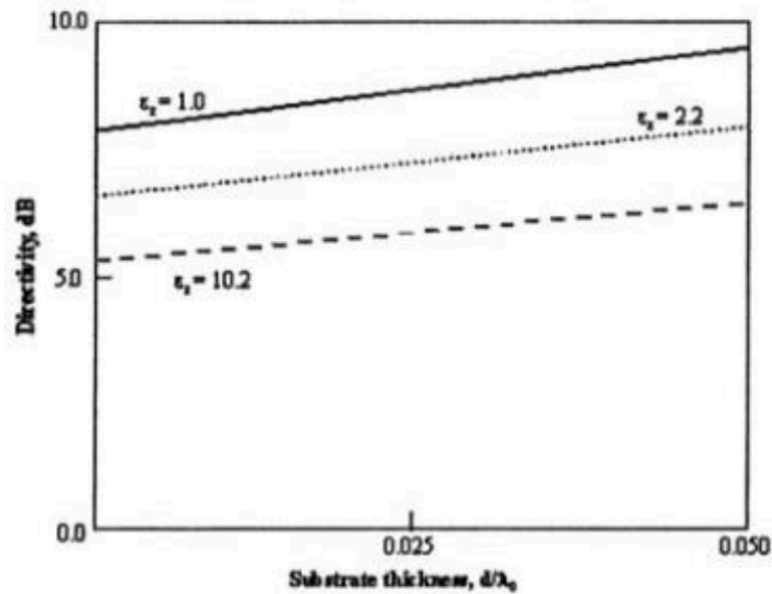


Figura 3.4.2: Directividad en función del grosor del sustrato [1]

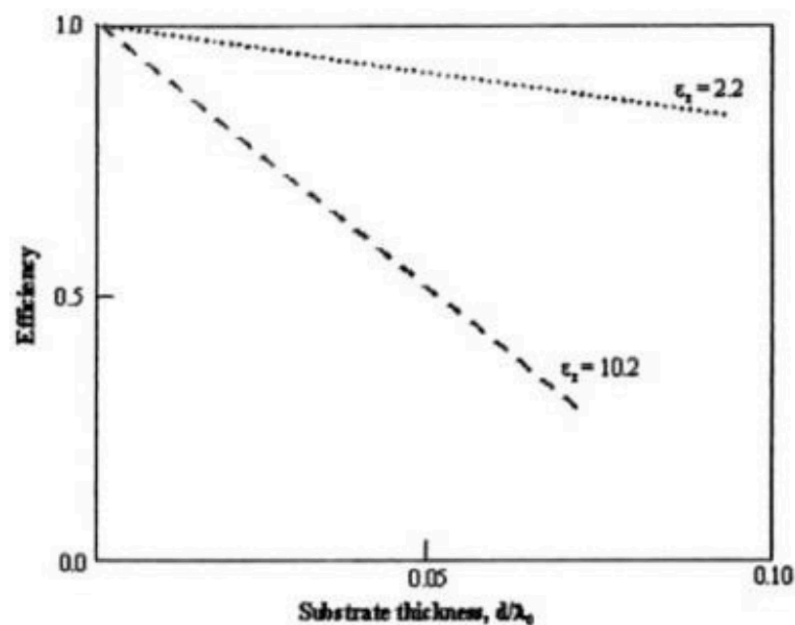


Figura 3.4.3: Directividad en función del grosor del sustrato [1]

Como se puede ver en los gráficos, cuanto más grueso sea el material sustrato, mayor será el ancho de banda de la antena microstrip. Una observación importante de la *Figura 3.4.1* es que a menor constante dieléctrica, se obtiene mayor ancho de banda. [1]

En cuanto a la directividad, como bien se observa en la *Figura 3.4.1*, básicamente, la antena parche microstrip montada sobre el material con baja constante dieléctrica es físicamente más grande que la antena implementada sobre una constante dieléctrica alta. Tiene una mayor área, por tanto mayor directividad. La directividad incrementa ligeramente cuando el grosor incrementa, debido a que el volumen de la antena crece.[1]

Hay tres tipos de pérdidas asociadas a la antena parche microstrip: pérdidas del conductor, pérdidas del dieléctrico y pérdidas de onda de superficie. Las primeras dos de estos mecanismos de pérdidas dependen de la calidad del material utilizado. La última es debida a las características del material; la constante dieléctrica y el grosor. [1]

Las ondas de superficie son modos de propagación apoyados por el sustrato con plano de masa. La *Figura 3.4.1* muestra que a mayor constante dieléctrica, se pierde mayor potencia de onda de superficie y por tanto menor eficiencia de antena. [1]

### 3.5 MÉTODOS DE EXCITACIÓN DE PARCHES MICROSTRIP

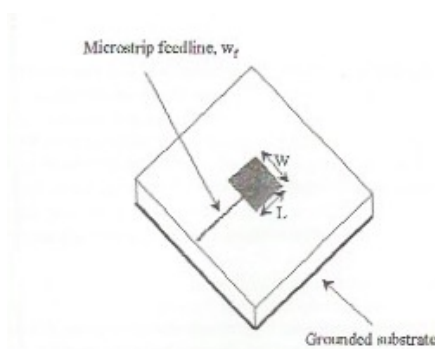
La manera en la que se excita una antena parche microstrip determinará el ancho de banda de impedancia que se puede obtener, la pureza y dirección de los campos radiados, la eficiencia global de la antena y la facilidad de fabricación así como de su robustez. [1]

Hay cuatro técnicas fundamentales para alimentar o excitar una antena parche. He aquí la clasificación de las técnicas:

- Método directo
  - Edge-fed (Alimentación desde el borde)
  - Probe-fed (Alimentación por sonda)
  
- Método sin contacto
  - Aperture-coupled (Acoplamiento por apertura)
  - Proximity-coupled (Acoplamiento por proximidad)

### 3.5.1 PARCHES CON EDGE-FED

Uno de los métodos originales de excitación para la antena parche microstrip es la alimentación desde el borde o técnica de alimentación por línea microstrip. En el diagrama esquemático se muestra esta técnica, donde una línea de alimentación microstrip de anchura  $w_f$  está en contacto directo con el conductor parche rectangular de longitud  $L$  y anchura  $W$ . [1]



*Figura 3.5.1.1: Antena parche con alimentación edge-fed [1]*

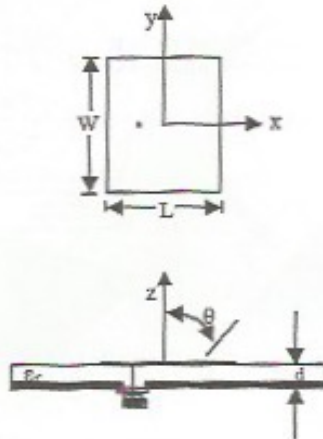
El parche reside en el sustrato de grosor  $d$  y constante dieléctrica  $\epsilon_r$ . Típicamente, la línea de alimentación microstrip viene en contacto con uno de los bordes radiantes de la antena, como se muestra en la *Figura 3.5.1.1*. Como la fuente de excitación está en contacto eléctrico directo con el parche radiador, el método de excitación edge-fed entra en la categoría de excitaciones por contacto directo.[1]

Este método de excitación tiene varias ventajas sobre otros tipos de métodos de alimentación. Una de las características clave de esta tecnología es la facilidad de fabricación, ya que la red de alimentación y el parche pueden implementarse en la misma placa.[1]

Los parches microstrip con edge-fed tienen unas características de ancho de banda y ganancia consistentes, poseen un ancho de banda relativamente estrecho y pueden sufrir de radiación espuria alta. Esto es debido a que la red de alimentación no está separada de la antena, lo que causará que la línea de alimentación también pueda radiar. [1]

### 3.5.2 PARCHES CON PROBE FED

El esquemático de esta configuración se encuentra en la *Figura 3.5.2.1*. Una sonda de radio  $r_0$  se extiende sobre el plano de masa y está conectado al parche conductor mediante soldadura. La sonda o el pin de alimentación corresponde por lo general al conductor interior de la línea coaxial (alimentación coaxial). [1]



*Figura 3.5.2.1: Parche alimentado por probe fed [1]*

La posición de la sonda provee el control de impedancia de manera similar a insertar la alimentación por un parche edge-fed. Por el hecho de que existe un contacto directo entre la línea de alimentación y la antena parche, nos referimos a la alimentación por sonda (probe fed) como un mecanismo de excitación por contacto directo. [1]

La antena con probe-fed tiene varias ventajas. Para empezar, la red de alimentación, donde pueden ubicarse los filtros y desfasadores, se ve aislada de los elementos radiantes vía el plano de masa. Esta característica permite una optimización independiente de cada capa funcional. De todos los métodos de excitación, la alimentación por sonda es probablemente la más eficiente como mecanismo de alimentación, y al estar aislado del parche, minimiza la radiación espuria. [1]

### 3.5.3 PARCHES POR ACOPLAMIENTO DE PROXIMIDAD

Esta técnica de alimentación sin contacto directo fue creada para solucionar las limitaciones de los parches alimentados por contacto directo. Consiste básicamente en un substrato con plano de masa en el cual se encuentra la línea microstrip de alimentación, terminada en circuito abierto. Encima de esa capa de substrato, se encuentra otra lámina de substrato que soporta la antena parche microstrip. [1]

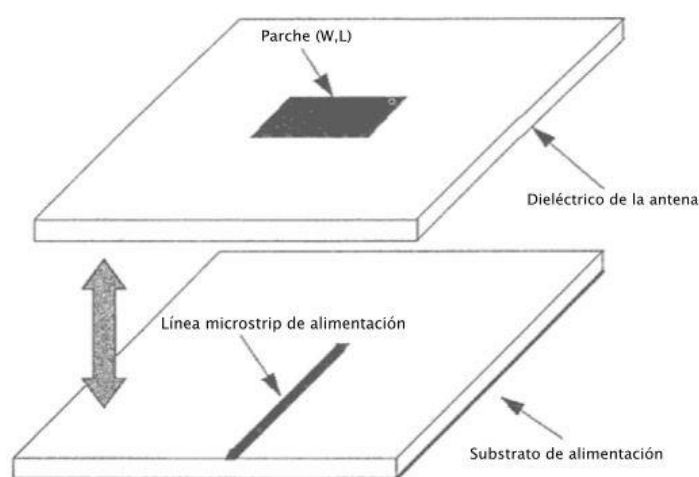


Figura 3.5.3.1: Parche alimentado por acoplamiento de proximidad [1]

Obviamente, no habrá plano de masa en esta segunda capa de dieléctrico para no aislar completamente la alimentación, debido a que la potencia debe acoplarse electromagnéticamente, contrariamente a lo que sucede con el contacto directo. Por esta razón, a esta técnica de alimentación de antenas parche microstrip suele denominarse como *electromagnetically coupled patch antenna* (antena parche alimentada electromagnéticamente) [1]. En la Figura 3.5.3.1, se puede observar un esquemático de una antena parche alimentada mediante esta técnica.

Un atributo clave de los parches alimentados por proximidad es que el mecanismo de acoplamiento tiene naturaleza capacitiva, a diferencia de los parches alimentados por contacto directo, cuya alimentación tenía una naturaleza predominantemente inductiva. Esta es una característica de los parches alimentados sin contacto directo. [1]

Esta diferencia afecta directamente al ancho de banda obtenible, debido a que el acoplamiento inductivo de las técnicas de alimentación por contacto directo limita en gran medida el ancho de banda. El ancho de banda de un parche alimentado por proximidad es inherentemente mayor que el de los parches alimentados por contacto directo [1].

A pesar de sus ventajas, esta técnica de alimentación de antenas parche microstrip presenta ciertas desventajas. La primera es que las capas de alimentación y de antena no son completamente independientes, ya que la potencia debe ser acoplada de manera eficiente a la antena. Por ello, esta clase de parches suelen presentar niveles relativamente altos de radiación espuria, aunque no tan alto como en un parche *edge-fed*. Además, al ser un desarrollo multicapa, el empleo de procesos de alineamiento es muy importante. [1]

### 3.5.4 PARCHES POR ACOPLAMIENTO DE APERTURA

La alimentación por apertura o ranura (*Figura 3.5.4.1*) es otro método de alimentación sin contacto directo, fruto de las limitaciones de la alimentación por contacto directo. Se trata, como en la técnica de acoplo por proximidad, de dos láminas de substrato en las que se coloca la red de alimentación y la antena, pero, en esta ocasión, las láminas se encuentran aisladas por un plano de masa. El acoplo se realiza mediante una apertura o slot en el plano de masa que separa ambas láminas de substrato. La línea de alimentación microstrip puede terminarse tanto en un circuito abierto como en un circuito cerrado. Los parches alimentados por apertura son, probablemente, los más empleados en el mercado hoy en día [1].

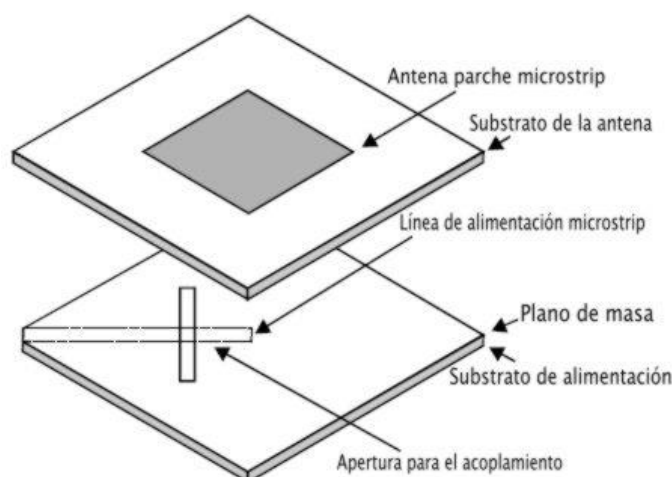


Figura 3.5.4.1: Parche alimentado por acoplamiento de apertura [1]

Esta técnica de alimentación tiene ciertas ventajas sobre otras técnicas de acoplo sin contacto directo y, por supuesto, sobre técnicas de alimentación con contacto directo. Primero, a diferencia de los parches *edge-fed* y los parches alimentados por proximidad, existe cierta independencia entre las láminas de sustrato, debido a la presencia del plano de masa que las separa. Esta independencia no es total, pero sirve para realizar una aproximación de primer orden. Además, las antenas parche microstrip alimentadas mediante esta técnica son idóneas para su integración con componentes activos. [1]

A diferencia de los parches alimentados por sonda, esta técnica no requiere de conectores verticales entre la red de alimentación y la antena, por lo que los procesos de fabricación se simplifican considerablemente. [1]

No obstante, los parches alimentados mediante apertura presentan ciertas limitaciones. Al igual que otras técnicas multicapa, se deben emplear procesos avanzados para garantizar el correcto alineamiento de ambas capas, ya que un mal alineamiento puede afectar al funcionamiento de la antena. [1]

Además, tal y como sucede en otros desarrollos multicapa, se pueden generar pequeñas cavidades con aire en la unión de ambas capas que modifiquen la impedancia de la antena, especialmente a altas frecuencias. [1]

## CAPÍTULO 4: GENERACIÓN DE POLARIZACIÓN CIRCULAR EN ANTENAS PARCHE MICROSTRIP

---

En el presente capítulo se pretende introducir los fundamentos de obtención de polarización circular en antenas parche microstrip.

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Una de las ventajas de las antenas parche microstrip es la facilidad con la que se puede generar polarización circular empleando este tipo de antenas. Hay tres métodos principales para conseguir polarización circular con antenas parche microstrip: *single feed* (alimentación única), *dual feed* (doble alimentación) y *synchronous subarrays* (empleando arrays síncronos). [1]

### 4.2 MÉTODO DE ALIMENTACIÓN ÚNICO

Como ya se ha mencionado, la polarización circular se obtiene cuando dos modos idénticos y ortogonales son excitados con una diferencia de fase de  $90^\circ$  entre ellos. Para lograr esto con una antena parche microstrip alimentada con una única línea de alimentación, basta con alimentar una de las diagonales de la antena parche rectangular (*Figura 4.2.1*). De este modo, se consigue excitar dos modos idénticos y ortogonales. Para lograr la diferencia de fase de  $90^\circ$ , un modo debe ser perturbado ligeramente con respecto al otro. Para ello, hay múltiples opciones: hacer que una de las dimensiones de la antena sea ligeramente mayor que la otra o introducir deformaciones en el parche. Estas deformaciones pueden ser recortes en las esquinas del parche, introducir unas pequeñas ranuras en los bordes o colocar un *slot* en el parche. El objetivo es ajustar ligeramente la frecuencia de resonancia de uno de los modos con respecto al otro para obtener la diferencia de fase de  $90^\circ$  entre ellos [1].



A pesar de su sencillez, este método presenta un problema muy importante a considerar: el ancho de banda de la polarización circular es extremadamente estrecho, típicamente una fracción del ancho de banda de impedancia.

El problema está en que conseguir que la diferencia de fase de  $90^\circ$  en un rango amplio de frecuencias es complicado, debido a la rapidez con la que varía la impedancia de una antena parche microstrip, alrededor de la frecuencia de resonancia. [1]

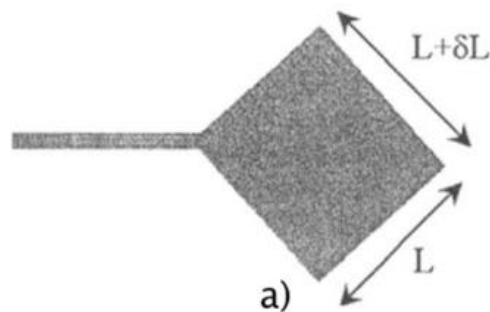


Figura 4.2.1: Parche alimentado por la diagonal [1]

### 4.3 MÉTODO DE ALIMENTACIÓN DOBLE

Este método es, probablemente, el más común y el más simple para generar polarización circular en una antena parche microstrip. Consiste en emplear dos líneas de alimentación, alimentando el parche microstrip por dos puntos distintos (Figura 4.3.1), asegurándose que una de las líneas introduzca un desfase de  $90^\circ$  con respecto a la otra. Una de las maneras más simples y efectivas de implementar esta técnica es emplear un divisor híbrido en cuadratura, que tiene dos salidas desfasadas  $90^\circ$  entre ellas [1].

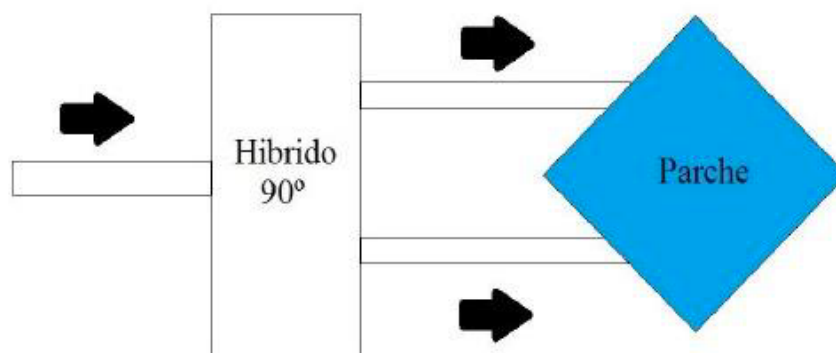


Figura 4.3.1: Método de alimentación doble [1]

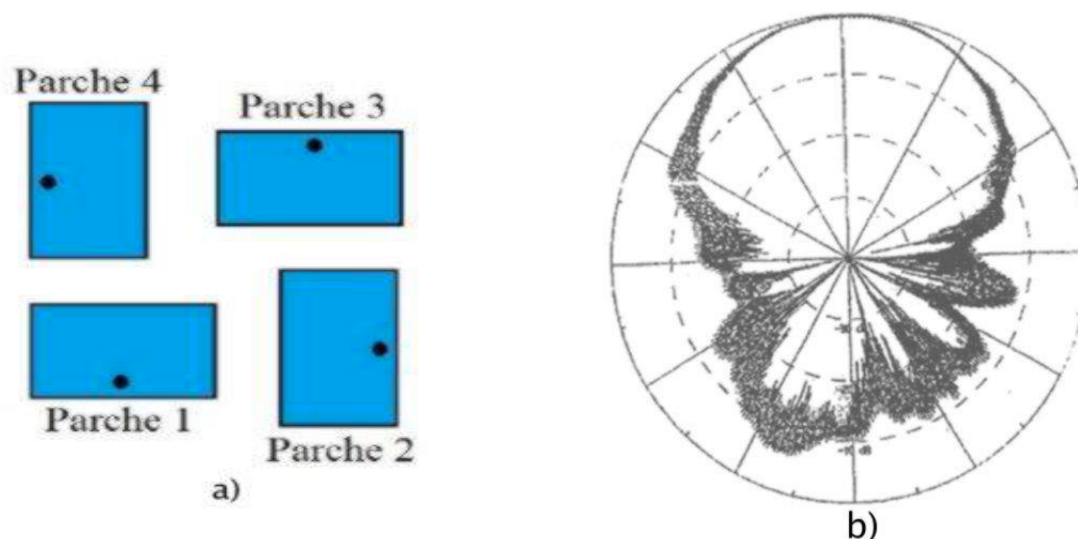
Debido a la configuración asimétrica de este método y a la generación de radiación espuria por la red de alimentación, el *axial ratio* obtenido en soluciones alimentadas por contacto directo (sobre todo soluciones *edge-fed*), se degrada. Por esta razón, se suele optar por soluciones de acoplo por apertura o incluso mediante sonda [1].

#### 4.4 SUBARRAYS SÍNCRONOS

Este es el método con el que se podrá conseguir el mayor ancho de banda de polarización circular y el *axial ratio* más bajo. Consiste en colocar un cierto número de parches, rotados espacialmente a cierto ángulo. El ángulo de rotación dependerá del número de parches del subarray [1].

Además de la rotación espacial de los parches, los puntos de alimentación también deben colocarse rotados  $90^\circ$  de manera secuencial. Son habituales los desarrollos con cuatro antenas parche, con  $90^\circ$  de rotación secuencial, aunque, lo más importante es que haya simetría espacial con respecto al centro de la estructura. Así, se podrían considerar otras configuraciones de tres o incluso cinco elementos, como el descrito en líneas superiores [1].

En la *Figura 4.4.1* se observa la configuración de este método así como la respuesta típica de *axial ratio* para parches con subarrays síncronos.



*Figura 4.4.1: Subarray síncrono y su respuesta [1]*

Podría ser posible implementar una solución de este tipo en un único parche, incorporando cuatro puntos de alimentación, rotados secuencialmente, aunque, presenta múltiples limitaciones. [1]

Más adelante se intentaran resolver esas limitaciones realizando distintas configuraciones detalladas profundamente.

#### 4.5 COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS

A continuación, se muestra una comparación del axial ratio obtenido con cada una de las tres técnicas presentadas (*Figura 4.5.1*). Para ello, se ha empleado un sustrato dieléctrico con una constante dieléctrica alta ( $\epsilon_r = 10.2$ ), elegida deliberadamente para resaltar las limitaciones del método de alimentación única. En la siguiente imagen se muestra una gráfica del *axial ratio* sobre la frecuencia normalizada (normalizada sobre la frecuencia de resonancia) en la que se puede apreciar el buen rendimiento en este aspecto que ofrece la técnica del subarray síncrono y las limitaciones en ancho de banda de polarización circular de la técnica de alimentación única. [1]

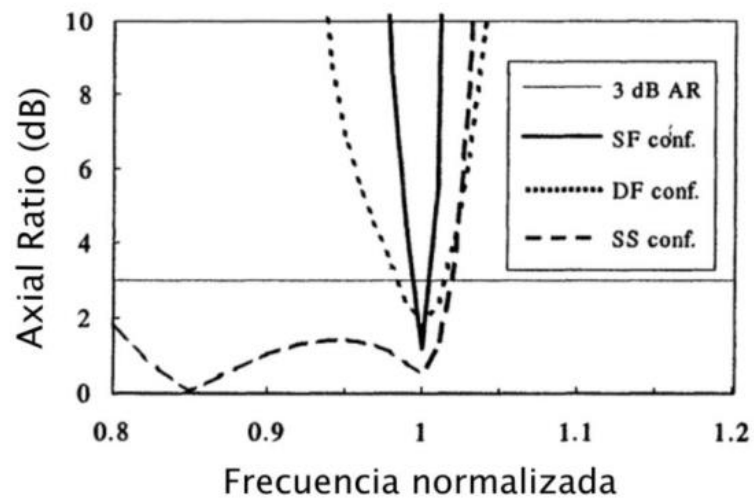


Figura 4.5.1: Comparación de técnicas [1]

## CAPÍTULO 5: FUNDAMENTOS DE ARRAYS DE ANTENAS

---

En este capítulo se dará a conocer los fundamentos de arrays de antenas. El proyecto cuenta con varios diseños de arrays, por lo que resulta conveniente introducir el concepto de array y sus características.

### 5.1 INTRODUCCIÓN

Como ya hemos visto en anteriores capítulos, las antenas parche microstrip tienen una directividad media (sobre los 8 dB). Pero a menudo se encuentran aplicaciones que exigen de un valor de directividad mayor. En esas aplicaciones en las que son necesarias directividades elevadas, las dimensiones eléctricas de la antena parche microstrip a emplear se hacen muy grandes. [8]

Además, aunque puede obtenerse cualquier diagrama de radiación siempre y cuando la distribución de corriente sea la adecuada, es obvio que no se puede aplicar cualquier distribución de corriente a cualquier tipo de antena, debido a las condiciones de contorno que introducen en las Ecuaciones de Maxwell. [8]

Todos estos problemas pueden ser solucionados integrando múltiples antenas en una agrupación. Junto a la distribución de corriente empleada y a los desfases introducidos a cada elemento, se puede obtener el diagrama deseado, además de que la directividad de la antena mejorará [8]. El objetivo de una agrupación de antenas es simular antenas de grandes dimensiones o distribuciones de corriente difícilmente obtenibles empleando una única antena. [8]

## 5.2 TEORÍA BÁSICA DE FUNCIONAMIENTO

Se tiene un conjunto de  $N$  antenas iguales equiespaciadas una distancia  $d$  y alineadas en el eje  $z$ . Cada antena se alimenta con corrientes  $I_n$ , donde  $n=0,1,\dots,N-1$ . Cada antena está situada en la posición  $z'_n=nd$ . En tal caso, la distribución de corrientes de la agrupación será: [8]

$$\vec{J}(\vec{r}') = \vec{J}_0(\vec{r}') * \sum_{n=0}^{N-1} I_n \delta(\vec{r}' - nd\hat{z}) = \vec{J}_0(\vec{r}') * I(n) \quad (5.2.1)$$

El vector de radiación de la agrupación es la transformada de Fourier tridimensional de la distribución de corrientes: [8]

$$\vec{N}(\hat{r}') = TF_{3D}[\vec{J}(\hat{r}')] = \vec{N}_0(\hat{r}') \cdot TF_{3D}[I(n)] \quad (5.2.2)$$

Desarrollando la expresión anterior y considerando que: [8]

$$I_n = a_n e^{jn\alpha} \quad (5.2.3)$$

Donde  $\alpha$  es la **fase progresiva** de las alimentaciones de cada antena. El vector de radiación queda de la siguiente manera: [8]

$$\vec{N}(\hat{r}') = \vec{N}_0 \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn(kd \cos \theta + \alpha)} \quad (5.2.4)$$

Donde,

$$kd \cos \theta = k_z d = \omega_z \quad (5.2.4)$$

Para simplificar los cálculos, la expresión anterior suele escribirse en función de un ángulo eléctrico  $\Psi$ :

$$\Psi = kd \cos \theta + \alpha \quad (5.2.5)$$

### 5.2.1 FACTOR DE AGRUPACIÓN

El diagrama de radiación de la agrupación resulta ser el diagrama de radiación de la antena básica, multiplicado por un factor que tiene en cuenta la interferencia de las  $N$  ondas generadas por las  $N$  antenas de la agrupación. A este factor se le denomina factor de agrupación. [8]

El factor de agrupación se define, por tanto, del siguiente modo: [8]

$$FA(\Psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\Psi} \quad (5.2.1.1)$$

El factor de agrupación es una función del ángulo  $\Psi$ , de periodo  $2\pi$  y los coeficientes de su serie de Fourier dependen únicamente de los coeficientes de la alimentación. [8]

### 5.2.1 GRATING LOBES

Tal y como se ha mencionado en el apartado anterior, el factor de agrupación es una función periódica de periodo  $2\pi$ , si el máximo está en  $\Psi_{m\acute{a}x}$ , existen máximos periódicos en los múltiplos enteros de  $2\pi$  [8]. De este modo, se tiene que:

$$\Psi = 2m\pi + \Psi_{m\acute{a}x} \quad (5.3.1)$$

Si estos máximos están dentro del margen visible, aparecerán varios máximos de radiación en el espacio real. [8]

$$kd + \alpha \geq 2\pi \text{ ó } -kd + \alpha \leq 2\pi \quad (5.3.2)$$

A estos máximos de radiación se denominan *grating lobes*. Su existencia depende de la relación entre la separación entre antenas y la longitud de onda y la fase progresiva  $\alpha$ . [8]

Si se aumenta la distancia de separación entre antenas, aumentará el margen visible y se reducirá el ancho de haz. Además, si el espaciado es suficientemente grande, aparecerán *grating lobes* [8]. Este fenómeno se puede observar en la siguiente imagen.

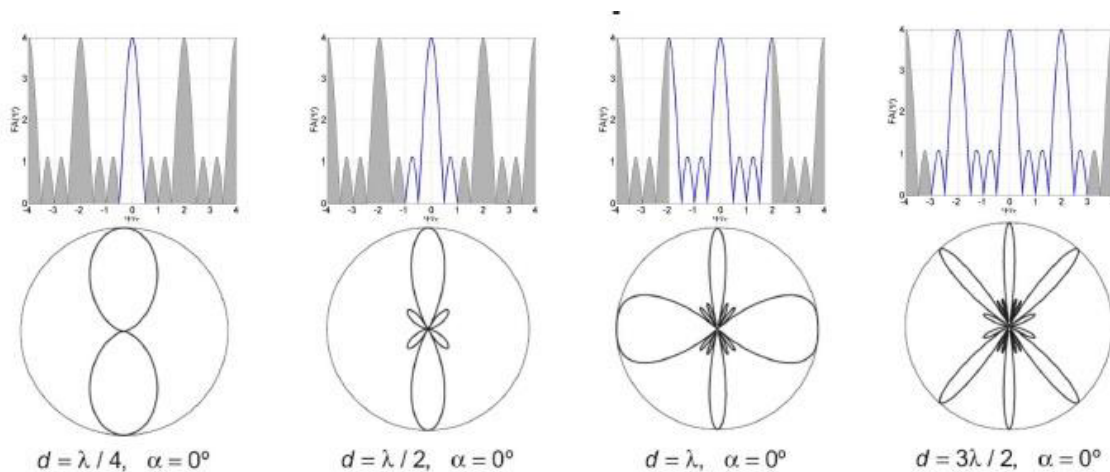


Figura 5.2.1.1: Grating lobes [8]

Además, si se varía la fase progresiva, el margen visible se desplazará y puede que aparezcan *grating lobes* (Figura 5.2.1.1) [8].



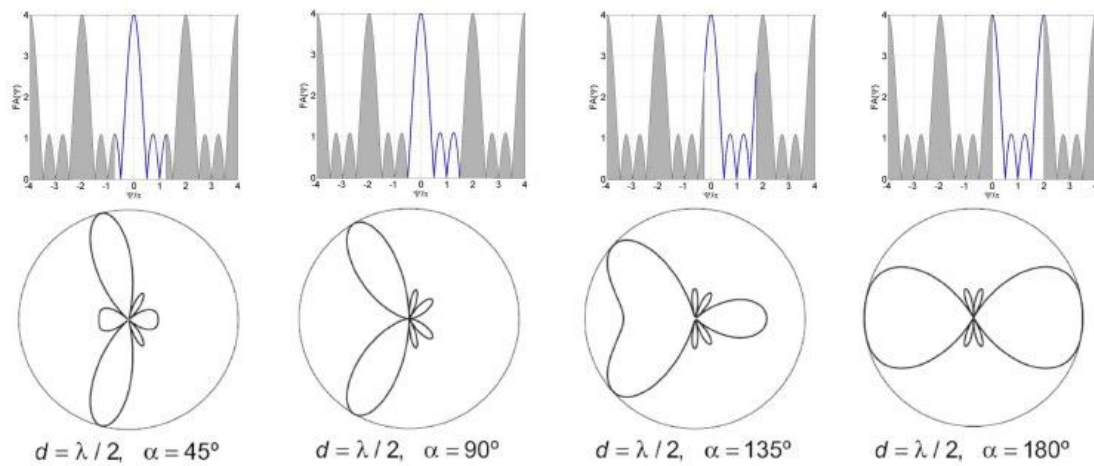


Figura 5.2.1.2: Grating lobes [8]

En arrays de antenas parche microstrip, una regla sencilla para que no aparezcan grating lobes, es separar las antenas parche aproximadamente en  $0.6\lambda$ .

## CAPÍTULO 6: MEJORANDO EL ANCHO DE BANDA EN ANTENAS PARCHE MICROSTRIP

Uno de los objetivos de este proyecto es realizar diseños de antenas parche microstrip con anchos de banda de funcionamiento por encima del 4%, por lo que resulta imprescindible introducir las técnicas de mejora de ancho de banda para el futuro diseño.

### 6.1 INTRODUCCIÓN

En tecnología de antenas, el ancho de banda se mide en las frecuencias a las que la respuesta empeora 10 dB con respecto al valor máximo, el cual se da a la frecuencia de operación. Debido a ello, se denomina **ancho de banda de impedancia o ancho de banda a menos 10 dB** ( $BW_{-10dB}$ ) [8].

En antenas polarizadas circularmente, el parámetro de *axial ratio* cobra importancia. Por ello, además del ancho de banda de impedancia o ancho de banda a menos 10 dB, en antenas polarizadas circularmente, existe el ancho de banda de polarización circular o CP bandwidth (circular polarization bandwidth), que indica el rango de frecuencias a las que la antena obtiene un valor de axial ratio por debajo de un estándar. En concreto, se mide a las frecuencias a las que el axial ratio es menor a 3 dB. [1]

Expresiones en porcentaje del ancho de banda de impedancia y de polarización obtenido a 3dB para polarización circular [8]:

$$BW(\%)_{-10dB} = \frac{f_{\text{sup}(-10dB)} - f_{\text{inf}(-10dB)}}{f_c} \times 100 \quad (6.1.1)$$

$$BW(\%)_{CP} = \frac{f_{\text{sup}(3dB)} - f_{\text{inf}(3dB)}}{f_c} \times 100 \quad (6.1.2)$$

## 6.2 TÉCNICAS INTRÍNSECAS

En la *Figura 3.4.1* se aprecia claramente que, a mayor grosor de sustrato, mayor es el ancho de banda en el que la antena parche trabaja correctamente. Además, puede apreciarse que cuanto más cercana a uno es la constante dieléctrica del sustrato (es decir, cuanto más cercana es a la del vacío), mayor será el ancho de banda en el que la antena trabaja correctamente. [1]

Debido a ello, un método para aumentar el ancho de banda de una antena parche microstrip es aumentar el grosor del sustrato dieléctrico empleado lo máximo posible. Esta técnica no puede emplearse ilimitadamente, debido a que tiene varios factores limitantes. Uno de ellos es la naturaleza inductiva de la alimentación de la antena. A medida que se aumenta el grosor del sustrato, la inductancia de la línea de alimentación de la antena aumenta, lo cual hace que la impedancia de la antena parche microstrip tenga un estado más inductivo. [1]

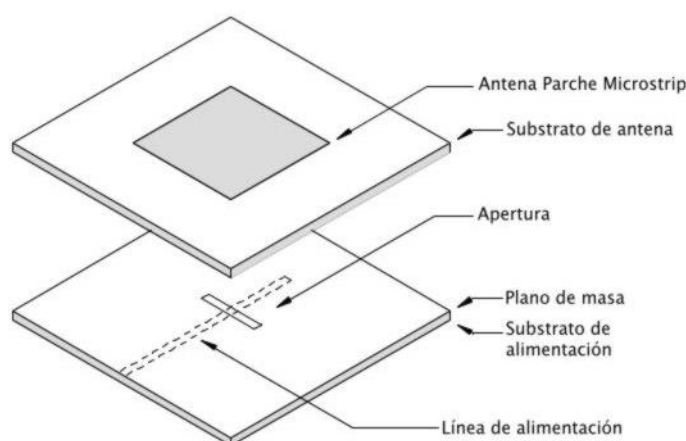
En aplicaciones *edge-fed* (antenas parche alimentadas desde el borde del parche), este método para aumentar el ancho de banda no es recomendable. La principal razón para ello es que, al aumentar el grosor del sustrato, la red de alimentación empieza a contribuir a la potencia radiada, lo que supone radiación espuria. Al aumentar el grosor del sustrato y disminuir la constante dieléctrica del mismo, la línea de alimentación crece en anchura y el parche microstrip disminuye su tamaño. Todo ello conlleva a que el parche contribuya cada vez menos con la potencia radiada. Este fenómeno se acentúa a altas frecuencias. [1]

En aplicaciones *probe-fed* (antenas parche alimentadas por sonda), aparecen problemas relacionados con la radiación, pero los efectos no son tan severos como el fenómeno mencionado en líneas superiores. En este tipo de aplicaciones, aumentar el grosor del sustrato hace que la sonda se comporte como un monopolo ya que, al aumentar el grosor del sustrato, la longitud de la sonda debe aumentar en la misma medida. Esto provoca que la componente contrapolar (*cross-polar*) aumente considerablemente en el plano H. [1]

### 6.3 LARGE SLOT EXCITED PATCHES (RESONANCIA MEDIANTE APERTURA DE GRANDES DIMENSIONES)

Uno de los métodos más simples y comunes de mejorar el ancho de banda de una antena parche microstrip alimentada por apertura o *slot* sin añadir demasiada complejidad a la antena, como parches apilados, es incrementar el tamaño de la apertura. Como se ha mencionado en apartados anteriores, para incrementar el ancho de banda de una antena parche microstrip, se debe escoger un sustrato grueso. [1]

En un parche con acoplo mediante apertura (*Figura 6.3.1*), para asegurar que la potencia se acopla perfectamente empleando un sustrato grueso, el tamaño de la apertura se debe incrementar. Empleando esta técnica se han obtenido anchos de banda mayores del 40%. Además, al ser parches con alimentación indirecta, no sufren los problemas de discontinuidad de corriente en el punto de alimentación que sufren los parches con alimentación directa. [1]



*Figura 6.3.1: Parche alimentado por slot [1]*

Con el fin de cortar la radiación trasera de esta configuración, se podría añadir una cavidad metálica a este diseño, aportando una solución robusta.

## 6.4 OTROS MÉTODOS

A parte de las técnicas ya mencionadas, existen también un amplio abanico de ellas con objeto de mejorar el estrecho ancho de banda que de por si aportan las antenas parche microstrip.

Otro método conocido son los parches parásitos acoplados horizontalmente. Se trata de acoplar de forma parásita, varias antenas parche microstrip en el mismo plano, por tanto, de colocar antenas parche microstrip lo suficientemente cerca del alimentado y cuya frecuencia resonante sea ligeramente diferente a la suya. De este modo, las respuestas en frecuencia de todos los elementos se combinan lo que provoca una mejora en el ancho de banda. [9]

La técnica de los parches apilados resulta también ampliamente conocida a la hora de mejorar el ancho de banda. Este método consiste en acoplar de forma parásita, otro parche microstrip al parche alimentado. Así, las respuestas de los parches se combinan, aumentando el ancho de banda.[1]

Existen otra técnicas que se basan en la combinación de varias de ellas, como es el método de parches apilados alimentados por apertura. Combinando las mejoras que aportan los parches apilados con la alimentación por apertura resulta de una mejora importante en el ancho de banda.

## CAPÍTULO 7: DISEÑO DE ANTENA PARCHE CON POLARIZACIÓN CIRCULAR A 2.2GHZ

### 7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detallan los diseños realizados de antena parche para las características de funcionamiento requeridas. A su vez, con el fin de llegar a esas características de funcionamiento, se ha realizado un estudio de mejora de ancho de banda y de ganancia.

La siguiente tabla muestra los requerimientos de diseño de la antena parche microstrip.

Especificaciones	
Frecuencia	2.2-2.29 GHz
Ganancia	6.5 dBi
Ancho de Banda	4%
Axial Ratio	< 4 dB
Polarización	Circular (CP)

*Tabla 7.1.1: Requerimientos de diseño*

Antenas planas para cubesats suelen solicitar el cumplimiento de estas especificaciones.

Para alcanzar estos requerimientos se empezará con un sustrato de 1.27mm de grosor. En el caso de no cumplir con las especificaciones, se analizará que parámetro es necesario mejorar para cambiar en el diseño. Como bien es sabido, el ancho de banda de las antenas parche tiene muchas limitaciones, por lo que se buscará y se realizara un estudio para alcanzar el ancho de banda descrito en las especificaciones.

En cuanto a la polarización circular, se ha optado por implementar un slot diagonal en todos los posibles diseños a realizar. Esta configuración induce el campo eléctrico a rotar de manera circular (CP), y por tanto un *axial ratio* lo suficientemente bajo. La orientación del slot, conforme a la diagonal escogida, determinará si la polarización circular es a derechas o izquierdas. En todos los

diseños se ha implementado el slot sobre la diagonal ascendente al lado derecho del parche, por lo que la polarización circular será a derechas.

El método de alimentación para los siguiente diseños será la alimentación por sonda. En este caso mediante conector SMA, soldado desde el plano de masa hasta el parche. Para elegir el punto correcto de alimentación, se buscará el punto que presente  $50 \Omega$  en el parche.

Para los primeros diseños de antenas parche se han tomado las siguientes consideraciones generales:

- Substrato utilizado: Rogers 5880 con  $\epsilon_r = 2.2$
- La distancia entre los bordes de la antena y los bordes del substrato es mayor de  $\lambda/4$  para el cálculo del diagrama de radiación en campo lejano.
- Máximo número de pasadas de 15 con un error del 0.01.
- Mínimo número de pasadas de 5 y 3 pasadas mínimas convergidas.
- Caja de aire que contiene dentro todos los elementos del diseño.
- Las imágenes de los diseños adjuntados evitan el visionado de la caja de aire para una mejor visión del diseño.

## 7.2 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL DISEÑO

Como primer paso del diseño, se calculará la longitud y anchura teórica de la antena parche para alcanzar una buena resonancia alrededor de 2.2-2.29GHz. Para el cálculo de dichas dimensiones se seguirá el modelo de línea de transmisión, descrito en el *apartado 3.2.1*.

Se necesitan los siguientes parámetros para el cálculo de las dimensiones del parche:

Parámetros	
Frecuencia	2.2 GHz
Constante dieléctrica del substrato	$\epsilon_r = 2.2$
Altura del substrato	$h = 1.27\text{mm}$

*Tabla 7.2.1: Parámetros para calcular las dimensiones*

Tras emplear las ecuaciones del *apartado 3.2.1* se obtienen los siguientes resultados:

- Anchura del parche  $W=53.90\text{mm}$
- Longitud del parche  $L=45.37\text{mm}$
- Constante dieléctrica efectiva  $\epsilon_{\text{eff}}=2.12$

Cabe destacar que al necesitar una polarización circular, teóricamente se debe configurar un parche cuadrado, para poder excitar igualmente los dos modos con un desfase de  $90^\circ$  entre ellos. Por tanto, se empleará la longitud teórica como lado del parche, siendo sus dimensiones  $45.37 \times 45.37$  (mm).

Una vez calculado las dimensiones teóricas del parche, se pueden deducir las medidas del sustrato. Como se ha comentado anteriormente, tiene que haber una distancia mínima de  $\lambda/4$  entre los bordes de la antena y los bordes del sustrato. Por lo que primero se calculará el valor de  $\lambda/4$  para esta configuración.

$$\lambda = \lambda_0 / (\epsilon_{\text{eff}})^{0.5}$$

$$\lambda_0 = c / f = 3 \times 10^8 / 2.2 \times 10^9 = 136.36\text{mm}$$

$$\lambda = 93.65\text{mm}$$

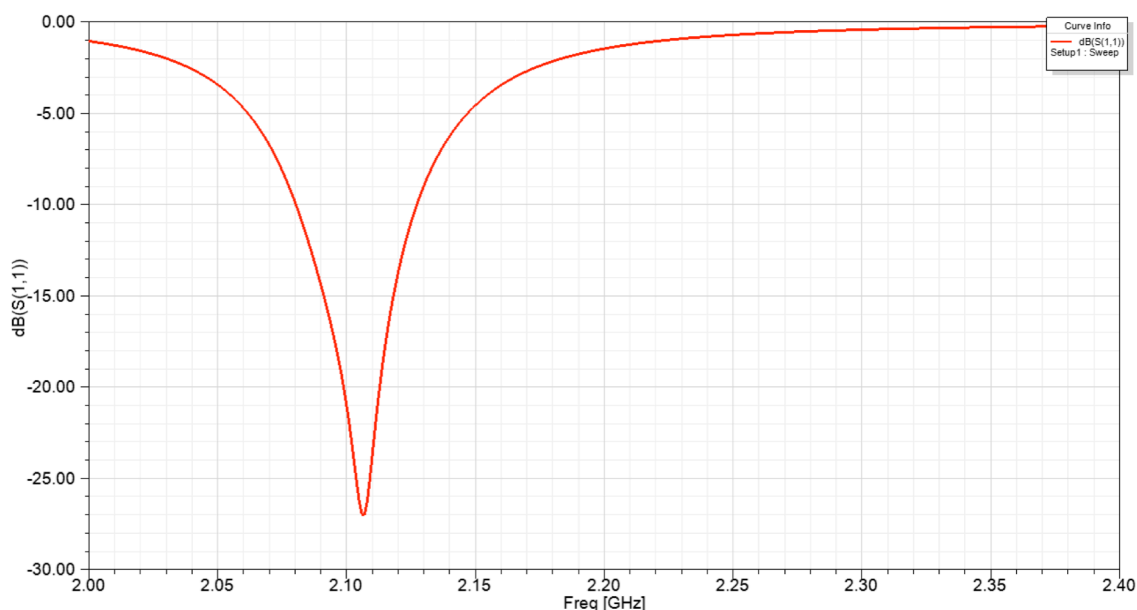
$$\lambda/4 = 23.41\text{mm}$$

Por tanto, y para cumplir suficientemente con esta condición las dimensiones del sustrato serán:  $95\text{mm} \times 95\text{mm}$

Las dimensiones del slot vendrán condicionadas a la correcta adaptación de impedancia y al valor del *axial ratio*. Se tomarán unos valores arbitrarios para el slot y se irán parametrizando, para entender como varían los parámetros de impedancia y *axial ratio* con los cambios en las dimensiones del slot.

El punto de alimentación sobre el parche, se ha escogido en el cual produce un mínimo en el coeficiente de reflexión, y por tanto adaptación de impedancia entre el puerto del conector que está a  $50 \Omega$  y el punto del parche que también está a  $50 \Omega$ .





*Figura 7.2.2:  $S_{11}$  para antena parche sin slot sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$  y dimensiones  $95\text{mm} \times 95\text{mm}$*

En esta primera aproximación se ve que la frecuencia de resonancia no está correctamente ajustada con las especificaciones (2.2GHz). Teniendo en cuenta la base teórica del apartado 3.3.1 se variara ligeramente la longitud teórica del parche para alcanzar la frecuencia de resonancia requerida. Esta primera aproximación se ha realizado sin slot.

Cabe destacar que el slot condiciona también el comportamiento de la frecuencia de resonancia y del valor de  $S_{11}$  a dicha frecuencia, con lo que se ha parametrizado conjuntamente el parche y el slot para lograr valores óptimos de  $S_{11}$  y de axial ratio. Además, se ha ajustado también las dimensiones del sustrato debida a la inclusión del slot.

Para ello se ha realizado un barrido paramétrico en torno a la longitud teórica calculada. La Figura 7.2.3 muestra uno de los muchos barridos realizados, donde se logra la correcta resonancia alrededor de 2.2 GHz.

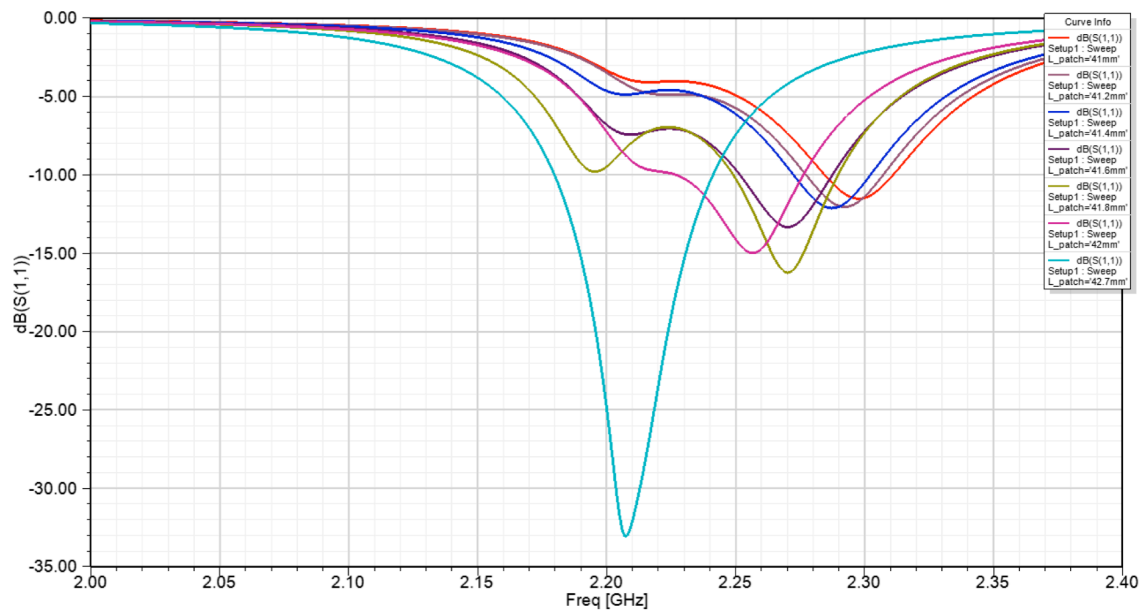


Figura 7.2.3:  $S_{11}$ : Barrido paramétrico de la longitud del parche con slot para el caso de una antena parche sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$  y dimensiones  $88.5\text{mm} \times 88.5\text{mm}$

Como se ve, a mayor longitud de antena parche, menor será la frecuencia de resonancia. Con la longitud teórica de  $45.37\text{mm}$  la antena opera en  $2.11\text{GHz}$ , mientras que decrementando la longitud hasta un valor de  $42.7\text{mm}$ , la antena resuena en  $2.21\text{GHz}$  aproximadamente. Por tanto, con esta nueva longitud cumplimos con la frecuencia de operación del diseño.

Cabe destacar que con el diseño teórico propuesto existe una desadaptación entre el  $S_{11}$  y el *axial ratio*. No resuenan a la misma frecuencia, lo que resulta crítico. Como solución se varía ligeramente las dimensiones del parche, no siendo así un cuadrado perfecto. Aun y todo esa ligera diferencia entre los lados del parche no afectará a la obtención de la polarización circular.

En cuanto a la adaptación de impedancias, con el fin de lograr un valor bajo del coeficiente de reflexión a la frecuencia de operación, se ha variado la anchura del parche y a su vez se ha encontrado el punto a  $50\Omega$  del parche para ubicar el conector. Las siguiente figura muestra esa variación en función de la anchura del parche y del punto de alimentación.

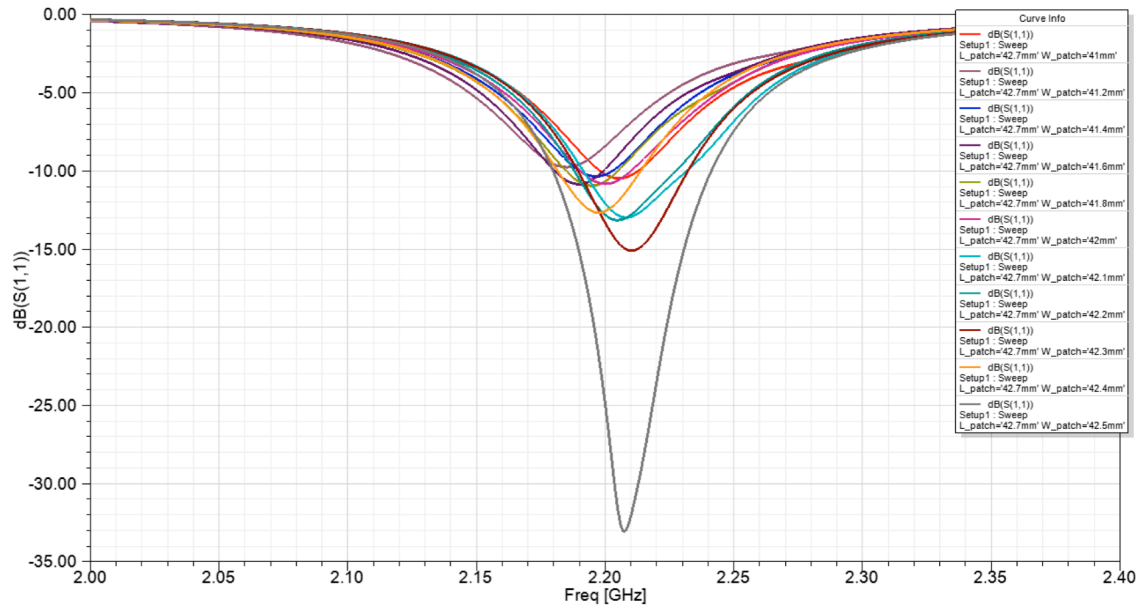


Figura 7.2.4:  $S_{11}$ : Barrido paramétrico de la anchura del parche con slot para el caso de una antena parche sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$  y dimensiones  $88.5\text{mm} \times 88.5\text{mm}$

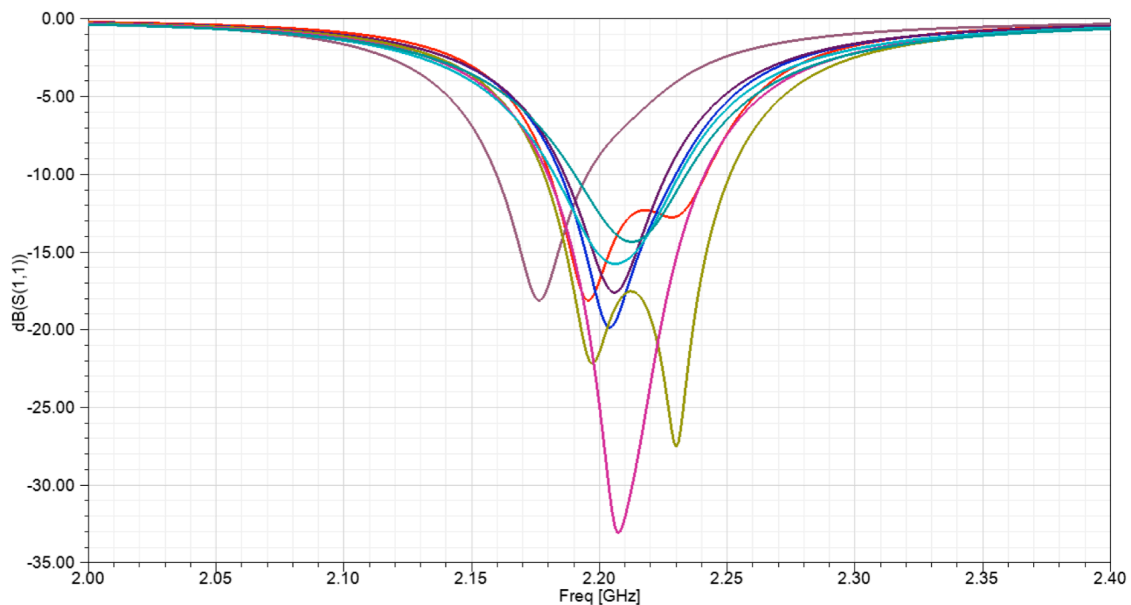
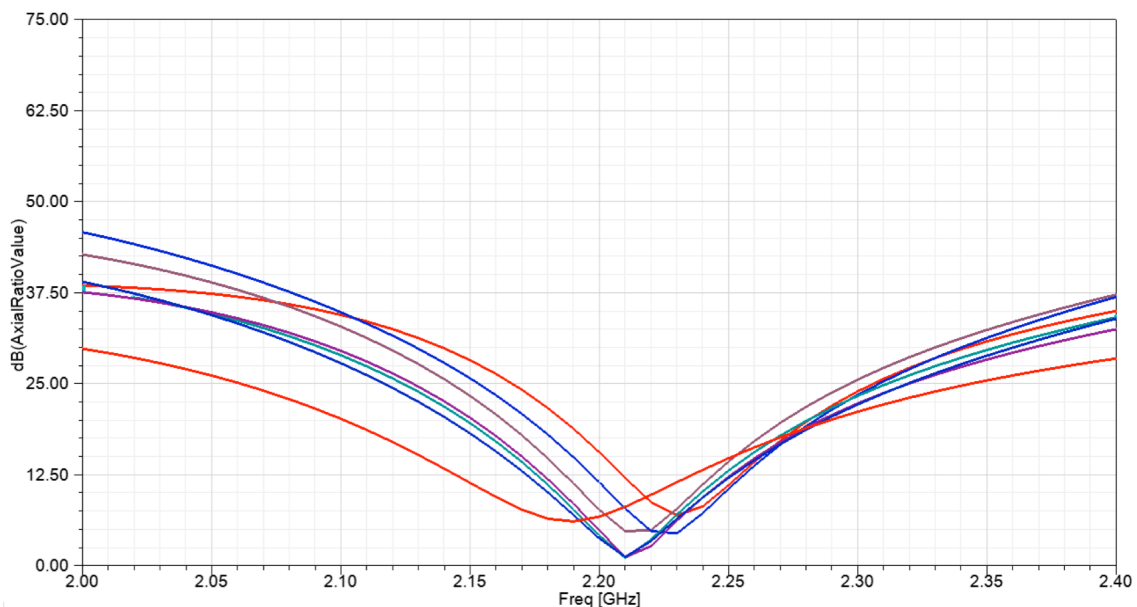


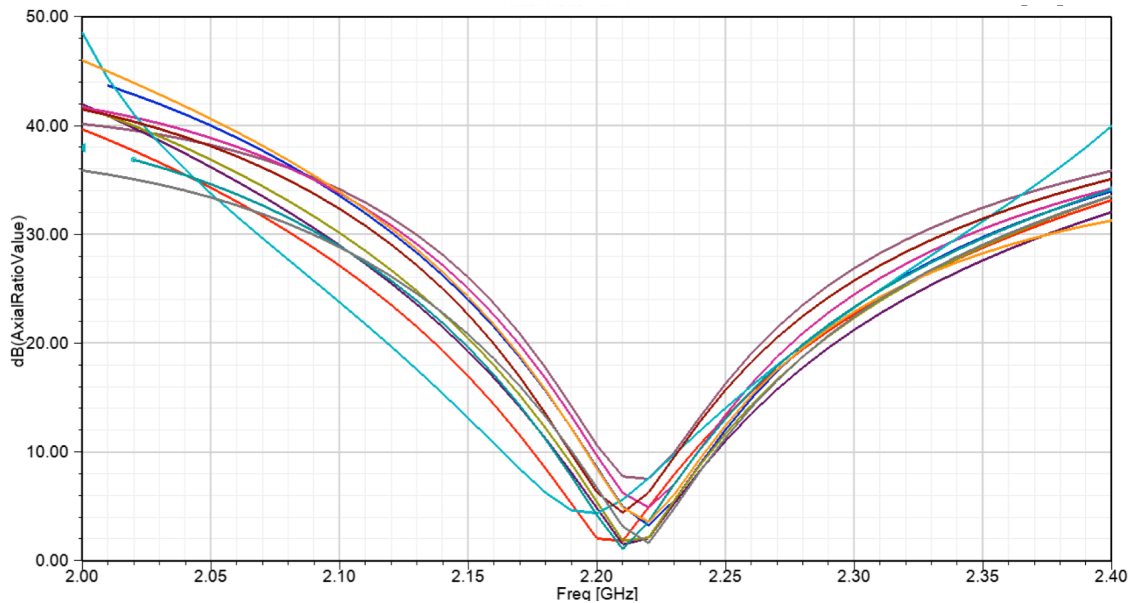
Figura 7.2.5:  $S_{11}$ : Barrido paramétrico del punto de alimentación para el caso de una antena parche con slot sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$  y dimensiones  $88.5\text{mm} \times 88.5\text{mm}$

Como se puede comprobar, para la anchura de parche de 42.5mm y el punto de alimentación colocado a 21mm del centro del parche se obtiene un valor de -33dB de  $S_{11}$  a la frecuencia de resonancia.

Las dimensiones del slot han ido parametrizándose hasta alcanzar un valor óptimo en cuanto a axial ratio. La variación de la longitud del slot modifica el valor del *axial ratio*, mientras que la variación de la anchura del slot modifica la frecuencia en el que el *axial ratio* tiene su mínimo valor. Destacar nuevamente que el cambio en las dimensiones del slot afecta también al comportamiento del  $S_{11}$ , por lo se ha analizado los cambios tanto en el  $S_{11}$  como en el *axial ratio*. Las siguientes figuras muestran el cambio en el *axial ratio* tras parametrizar la anchura y la longitud del slot.



*Figura 7.2.6: Barrido paramétrico de la anchura del slot para el caso de una antena parche sobre substrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$  y dimensiones  $88.5\text{mm} \times 88.5\text{mm}$*



*Figura 7.2.7: Barrido paramétrico de la longitud del slot para el caso de una antena parche sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$  y dimensiones  $88.5\text{mm} \times 88.5\text{mm}$*

Tras realizar numerosos barridos paramétricos tanto del slot, las dimensiones del parche como de la posición del conector, se ha logrado un funcionamiento adecuado de la antena parche (Figura 7.2.9) con polarización circular. La siguiente tabla muestra los parámetros finales de diseño.

Parámetros del diseño	
Longitud del parche	42.7mm
Anchura del parche	42.5mm
Longitud del slot	9.7mm
Anchura del slot	3mm
Posición del conector *	21mm
Dimensiones del sustrato	88.5 x 88.5 mm

\*Distancia respecto al centro del parche sobre el eje x

*Tabla 7.2.8: Dimensiones finales*

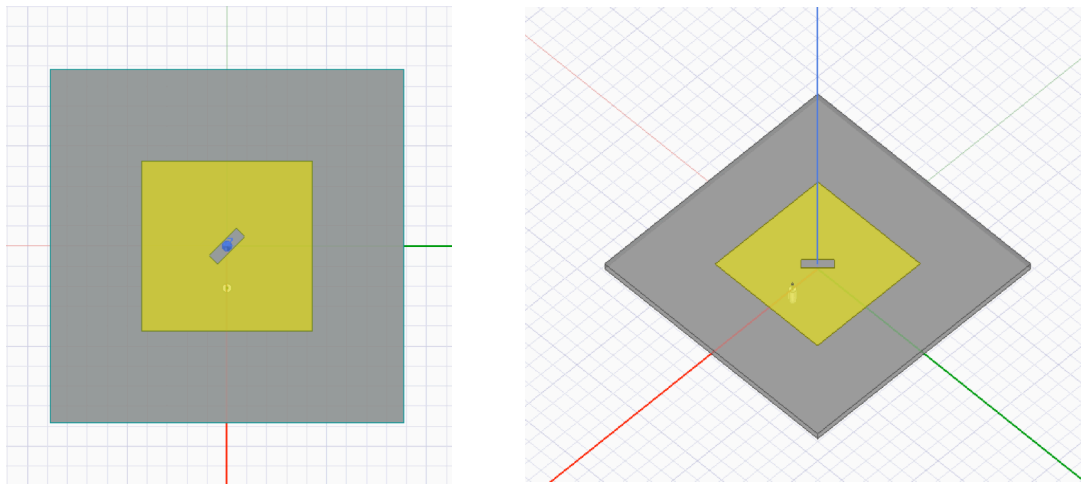


Figura 7.2.9: Antena parche microstrip

### 7.3 RESULTADOS DE LA ANTENA PARCHE

Gráficamente, los resultados obtenidos se pueden observar en las siguientes imágenes. La frecuencia de resonancia esta en torno a las especificaciones requeridas de 2.2-2.29GHz con un valor de  $S_{11}$  por debajo de los -30dB. El ancho de banda a -10dB del  $S_{11}$  es de un **2.72%**. El axial ratio resuena también a la misma frecuencia que el gráfico del coeficiente de reflexión con un valor por debajo de los 4dB. La Figura 7.3.4 muestra la variación del campo eléctrico en función de la fase. Se observa cómo va rotando el campo eléctrico circularmente en torno al slot.

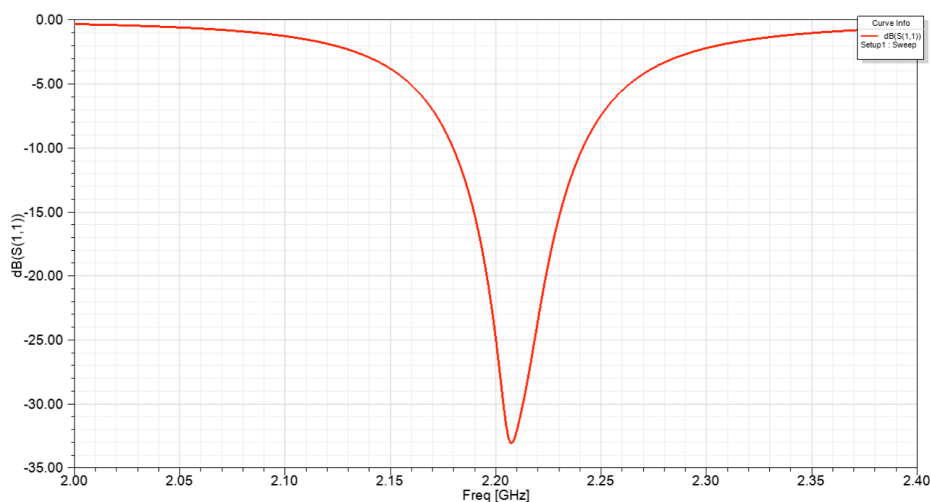


Figura 7.3.1: Resultado de  $S_{11}$  slot para el caso de una antena parche con slot sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$  y dimensiones  $88.5\text{mm} \times 88.5\text{mm}$

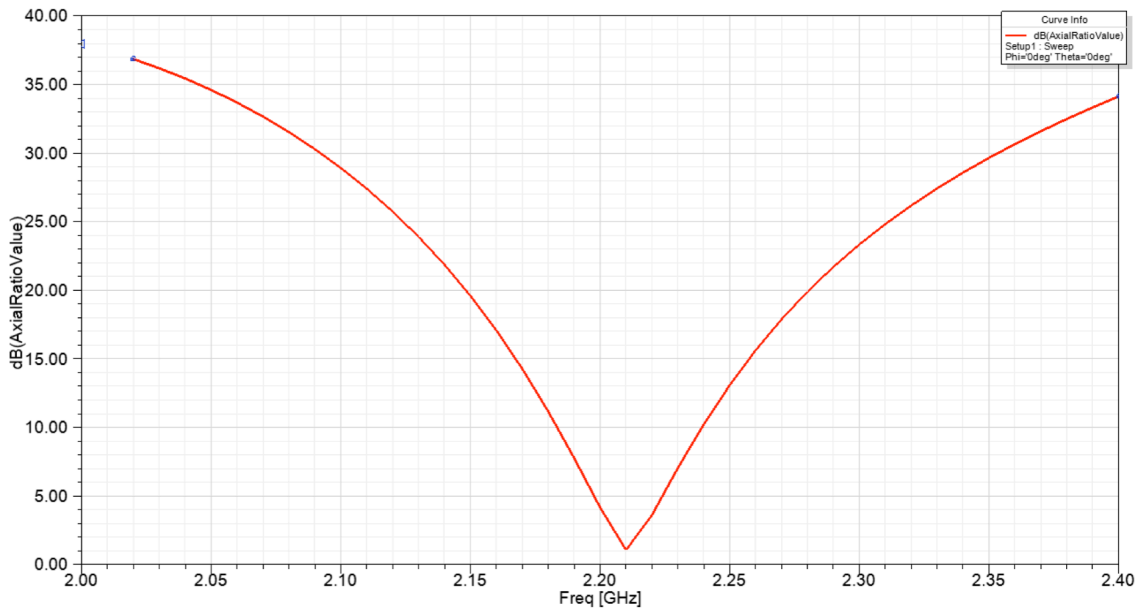


Figura 7.3.2: Axial ratio para el caso de una antena parche sobre substrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$  y dimensiones  $88.5\text{mm} \times 88.5\text{mm}$

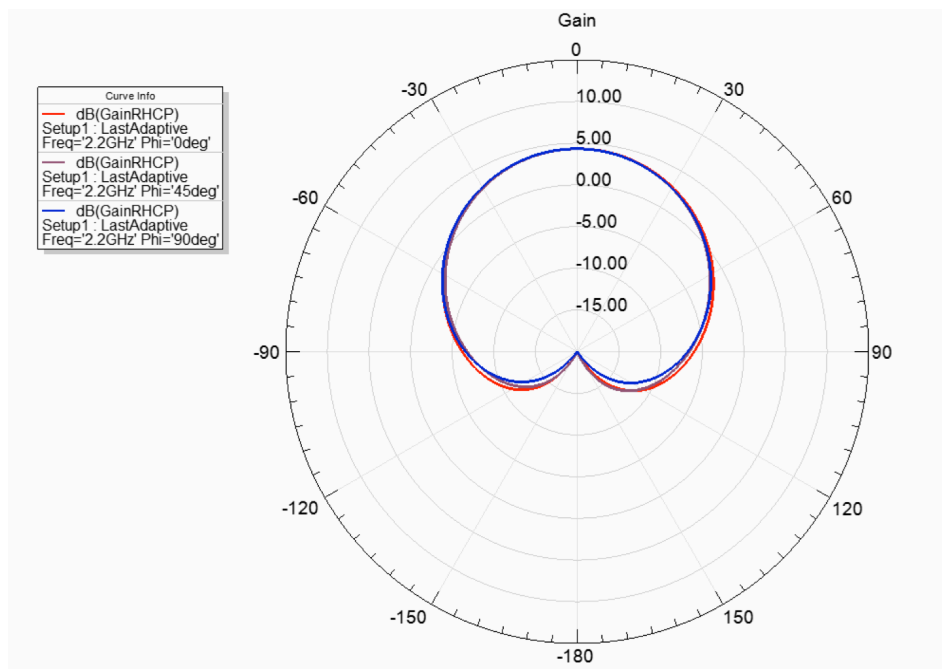


Figura 7.3.3: Diagrama de radiación de la antena parche sobre substrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$  y dimensiones  $88.5\text{mm} \times 88.5\text{mm}$  a la frecuencia de  $2.2\text{GHz}$

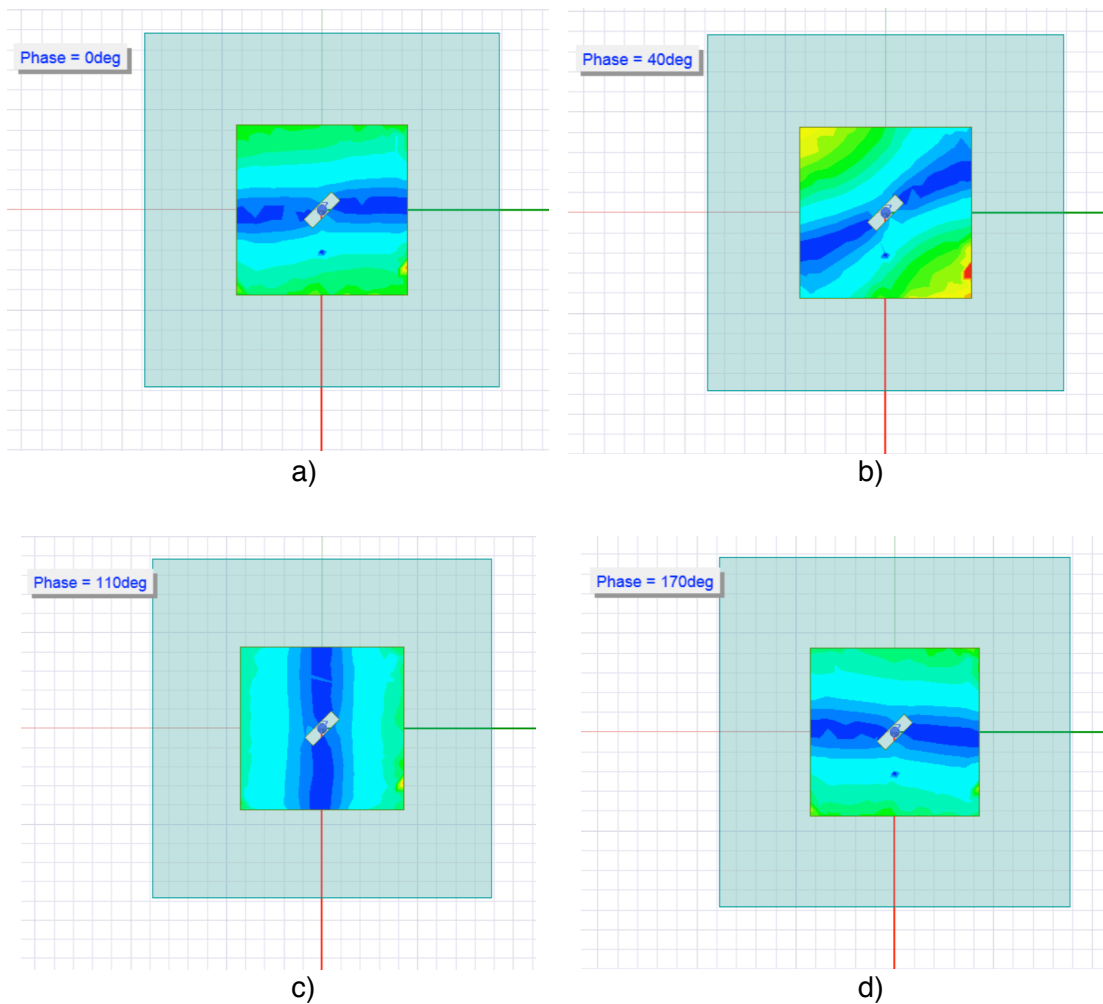


Figura 7.3.4: Campo eléctrico en la antena parche para distintos instantes de fase a) 0 deg b) 40 deg c) 110 deg y d) 170 deg

### 7.3.1 MEJORA DE ANCHO DE BANDA

A la vista de los resultados cabe destacar la necesaria mejora del ancho de banda. Por lo que se aumentará el grosor del sustrato para observar como varía el ancho de banda, y si existe una mejoría.

Se ha realizado el mismo proceso paramétrico para los siguientes diseños, variando los grosores con el fin de llegar a un 4% de ancho de banda.

Al variar la altura del sustrato, se verá afectada tanto la  $\epsilon_{\text{eff}}$  como las dimensiones teóricas del parche. La siguiente tabla muestra los valores de  $\epsilon_{\text{eff}}$  para los diferentes grosores de sustrato.



Altura del sustrato (mm)	$\epsilon_{eff}$
1.27	2.1298
2.54	2.0795
3.175	2.0593
4.75	2.0183
5.537	2.0015
6.35	1.9862

*Tabla 7.4.1: Valores de  $\epsilon_{eff}$  en función de la altura del sustrato*

Los grosores de sustrato están escogidos como estándares distribuidos por el fabricante Rogers. Alguno de ellos son la suma de varios sustratos estandarizados.

Siguiendo el proceso del apartado 7.2, se ha logrado el correcto funcionamiento de las antenas parche microstrip con los siguientes parámetros para cada grosor diferente. La *Tabla 7.4.2* muestra las dimensiones de diseño que proveen un rendimiento adecuado y la *Tabla 7.4.3* detalla los resultados de ancho de banda obtenidos. El punto de alimentación se ha escogido el mismo que en el diseño con un grosor de 1.27mm, excepto para los últimos dos diseños con el punto de alimentación estando a 26.8mm para el diseño de grosor 5.537mm y 30.6mm para el diseño con grosor 6.35mm.

Altura del sustrato (mm)	Sustrato (mm)	Parche (mm)	Slot (mm)
<b>1.27</b>	88.5 x 88.5	42.7 x 42.5	9.7 x 3
<b>2.54</b>	90 x 90	41.825 x 41.3	14.5 x 3.5
<b>3.175</b>	88 x 88	40.44 x 40.169	17 x 5.5
<b>4.75</b>	87.5 x 87.5	39.5 x 38.225	25 x 3
<b>5.537</b>	87.55 x 87.55	38.55 x 36.4	24.6 x 5.9
<b>6.35</b>	86 x 86	37.45 x 35.6	26 x 5.5

*Tabla 7.4.2: Dimensiones del diseño en función del grosor del sustrato*

Altura del sustrato (mm)	$BW_{S11}(\%)$	$BW_{AR}(\%)$
1.27	2.72	0.9
2.54	5.909	1.36
3.175	8.63	2.27
4.75	12.27	3.63
5.537	15.9	4.09
6.35	20.45	5

*Figura 7.4.3: Valores de ancho de banda en función del grosor del sustrato*

Como se puede ver no es hasta el substrato de grosor **5.537mm** cuando el ancho de banda de impedancia y de polarización supera el 4% exigido en el diseño.

A continuación se despliega gráficamente los resultados para cada grosor utilizado.

Los trazos de  $S_{11}$  presentan en su mayoría una frecuencia de resonancia principal y otra resonancia secundaria debido al efecto del slot. A pesar de que en algunos gráficos de  $S_{11}$ , la frecuencia de resonancia no cae exactamente a la frecuencia deseada, el ancho de banda medido a -10dB sí que entra dentro del rango de frecuencias indicadas en las especificaciones. Sin embargo, el *axial ratio* sí que cumple con la condición de resonancia en 2.2GHz en todos los casos.

### 7.3.2 RESULTADOS CON GROSOR DE 2.54MM

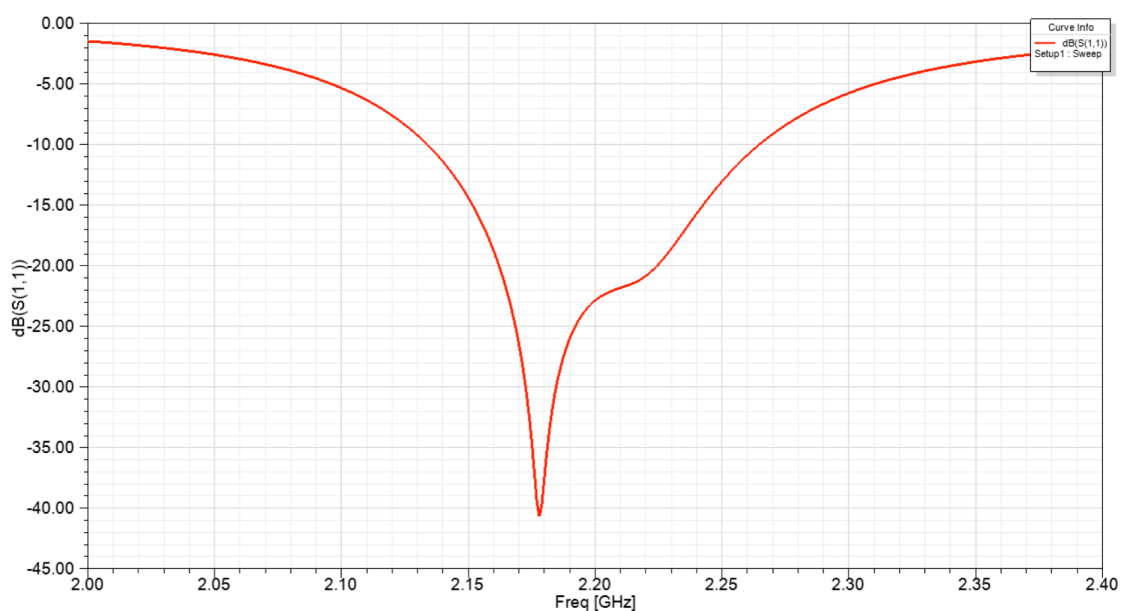


Figura 7.3.2.1: Resultado del  $S_{11}$  para el caso de una antena parche con slot sobre substrato Ro5880 de  $h=2.54\text{mm}$

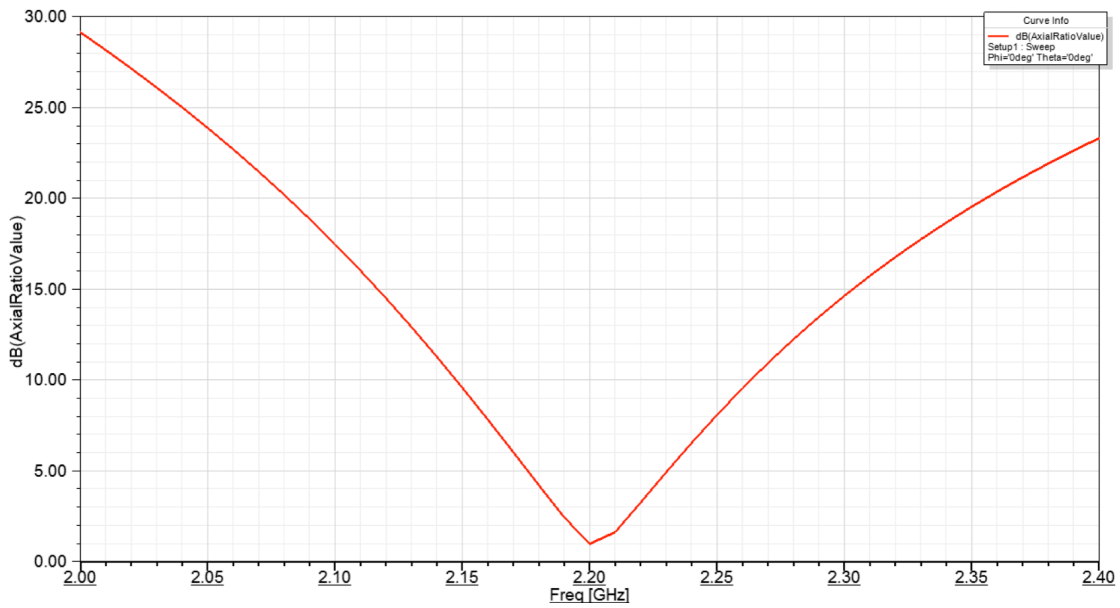


Figura 7.3.2.2: Resultado del axial ratio para el caso de una antena parche con slot sobre sustrato Ro5880 de  $h=2.54\text{mm}$

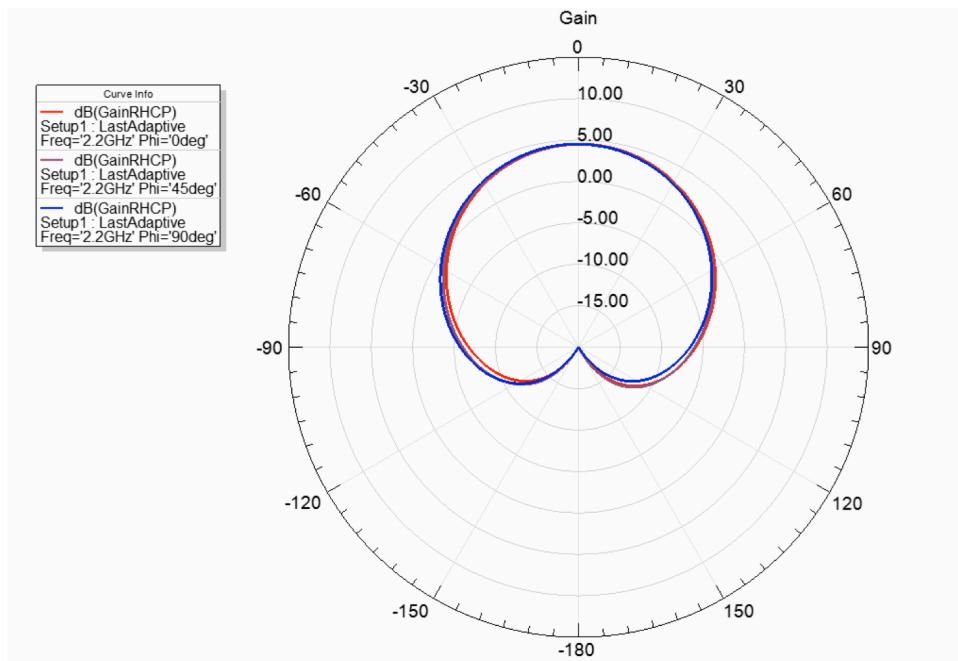
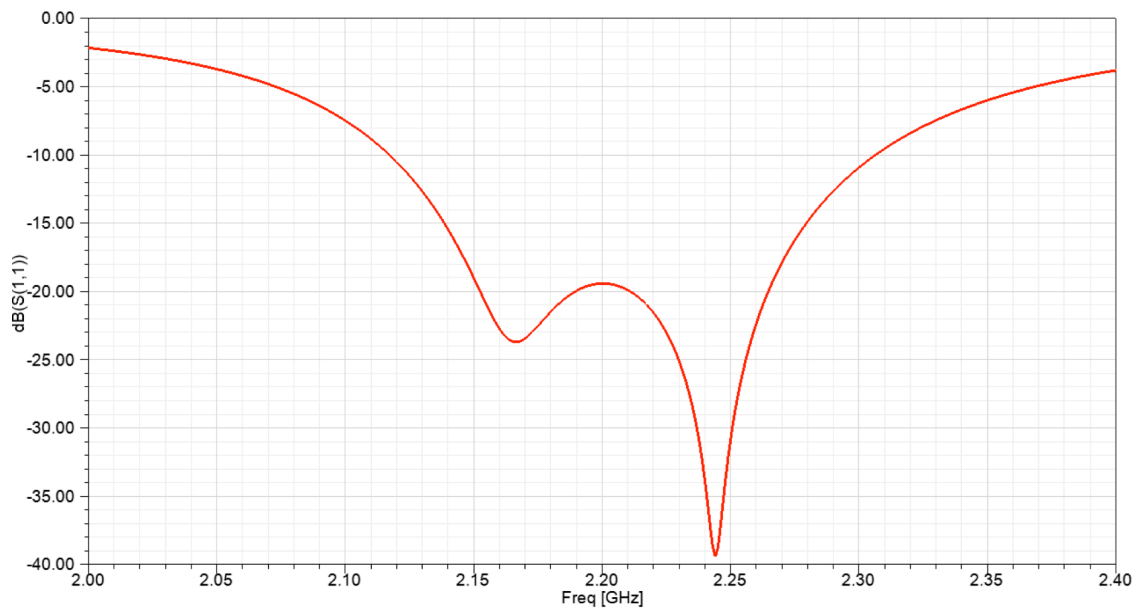
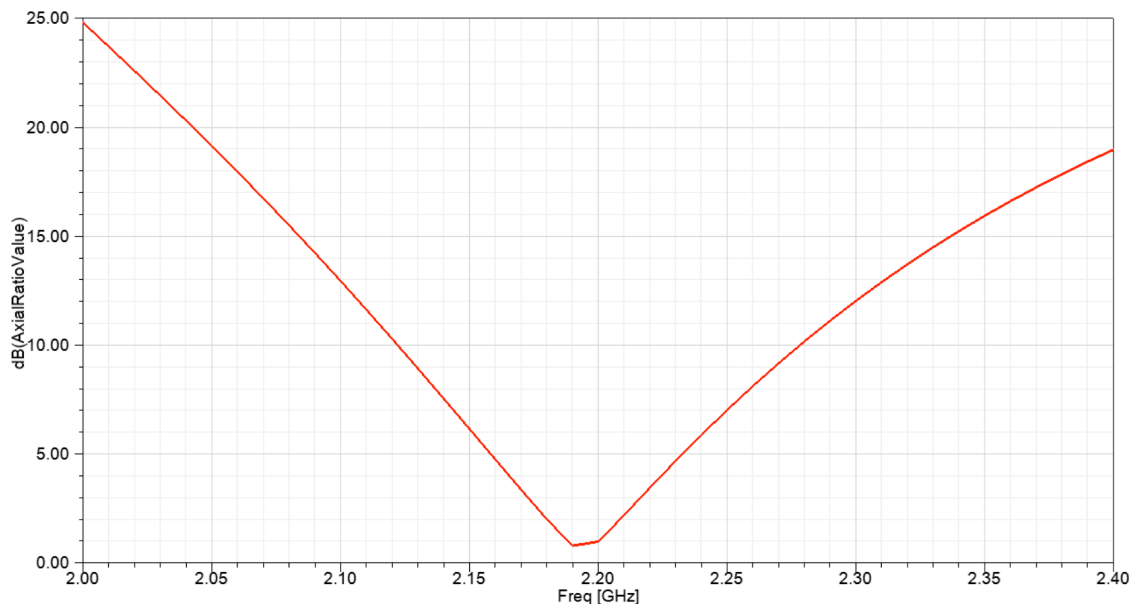


Figura 7.3.2.3: Diagrama de radiación de la antena parche sobre sustrato Ro5880 de  $h=2.54\text{mm}$  a la frecuencia de 2.2GHz

### 7.3.3 RESULTADOS CON GROSOR DE 3.175MM



*Figura 7.3.3.1: Resultado del  $S_{11}$  para el caso de una antena parche con slot sobre substrato Ro5880 de  $h=3.175\text{mm}$*



*Figura 7.3.3.2: Resultado del axial ratio para el caso de una antena parche con slot sobre substrato Ro5880 de  $h=3.175\text{mm}$*

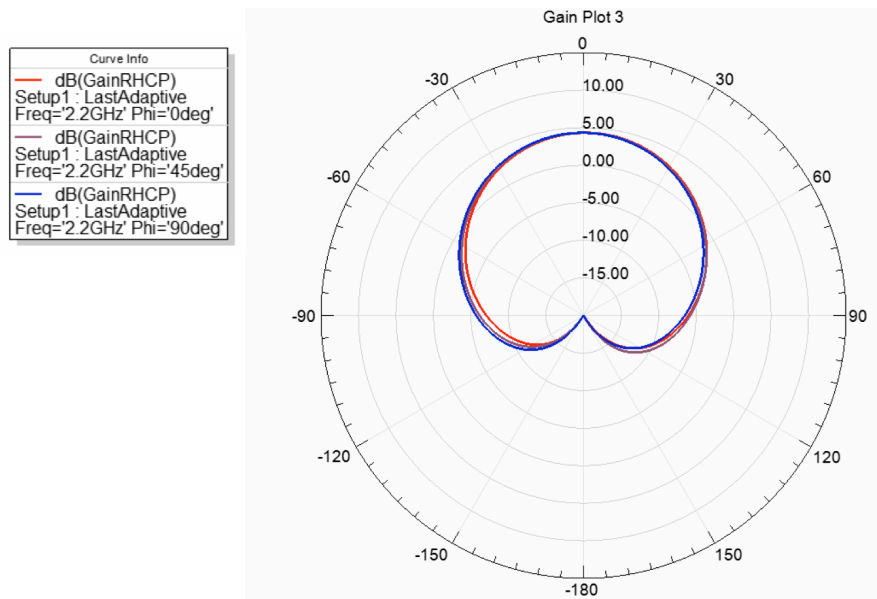


Figura 7.3.3.3: Diagrama de radiación de la antena parche sobre sustrato Ro5880 de  $h=3.175\text{mm}$  a la frecuencia de 2.2GHz

### 7.3.4 RESULTADOS CON GROSOR DE 4.75MM

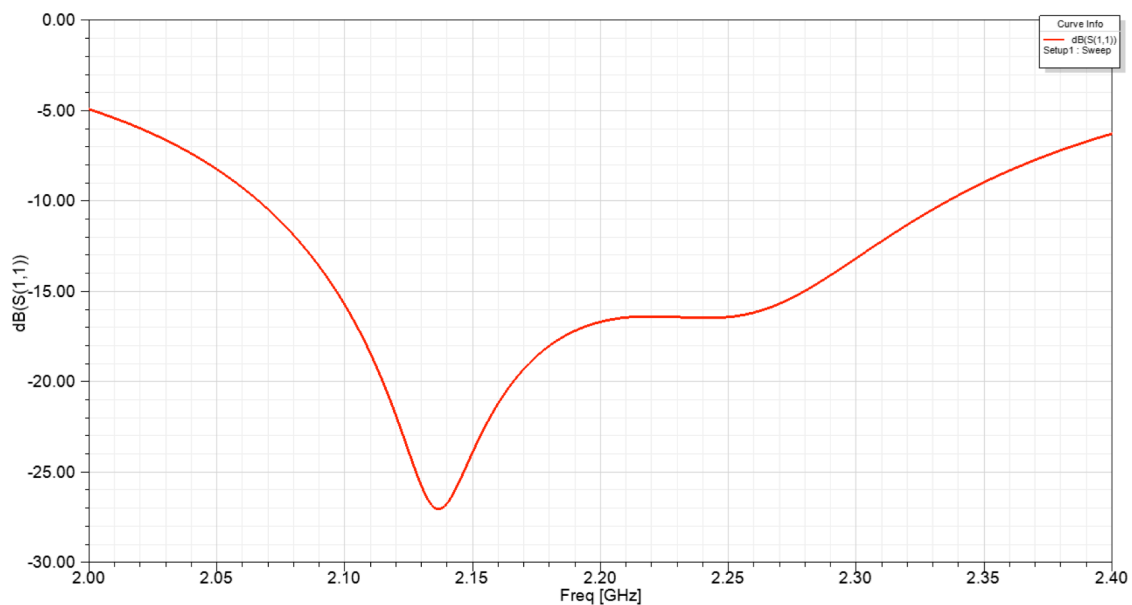


Figura 7.3.4.1: Resultado del  $S_{11}$  para el caso de una antena parche con slot sobre sustrato Ro5880 de  $h=4.75\text{mm}$

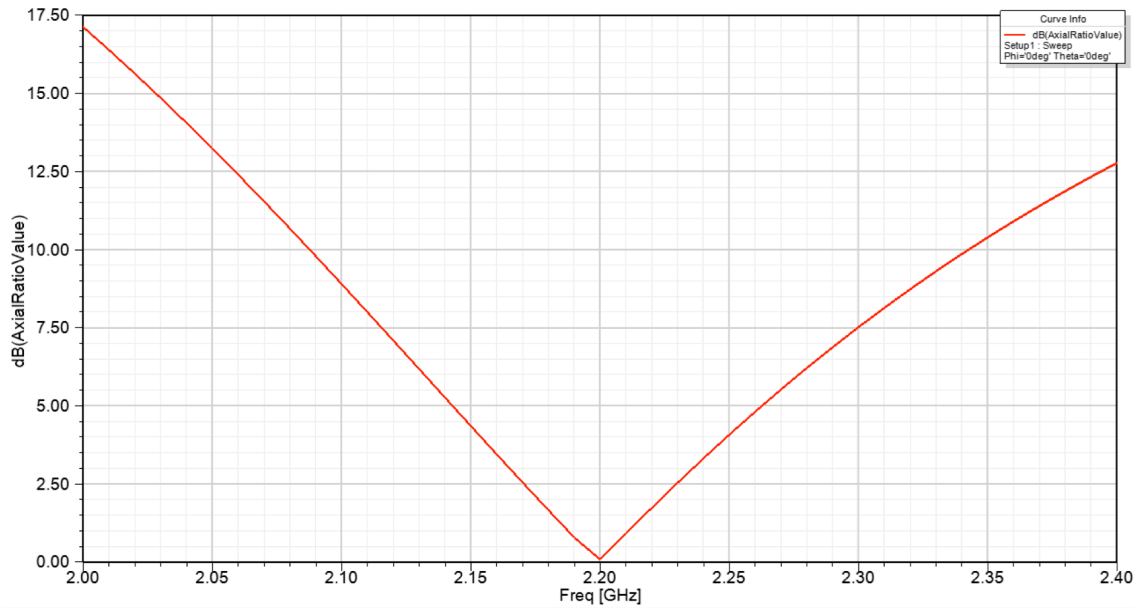


Figura 7.3.4.2: Resultado del axial ratio para el caso de una antena parche con slot sobre sustrato Ro5880 de  $h=4.75\text{mm}$

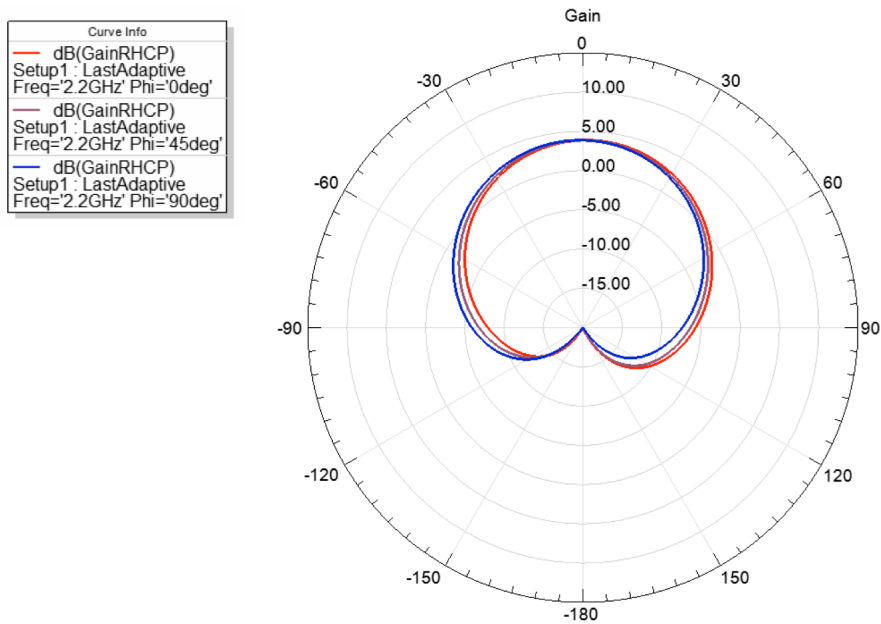


Figura 7.3.4.3: Diagrama de radiación de la antena parche sobre sustrato Ro5880 de  $h=4.75\text{mm}$  a la frecuencia de 2.2GHz

### 7.3.5 RESULTADOS CON GROSOR DE 5.537MM

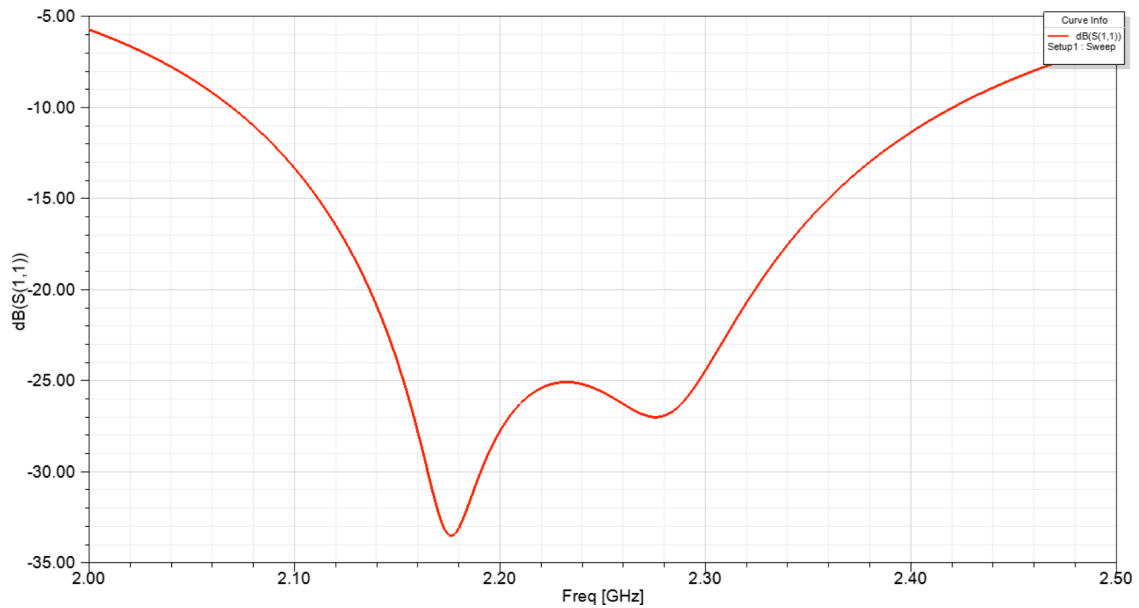


Figura 7.3.5.1: Resultado del  $S_{11}$  para el caso de una antena parche con slot sobre substrato Ro5880 de  $h=5.537\text{mm}$

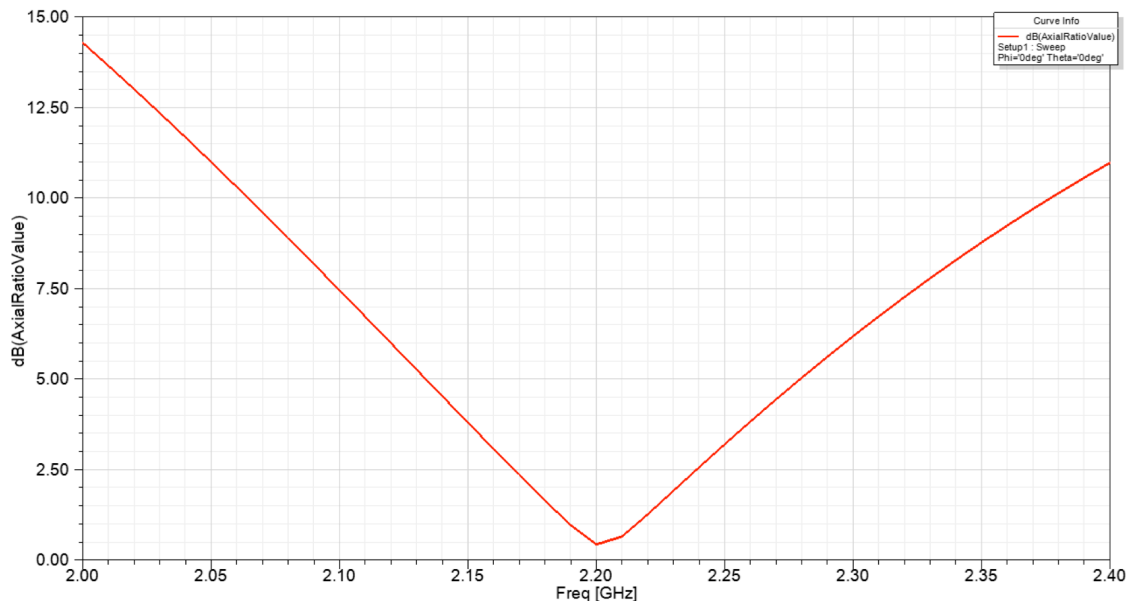


Figura 7.3.5.2: Resultado del axial ratio para el caso de una antena parche con slot sobre substrato Ro5880 de  $h=5.537\text{mm}$

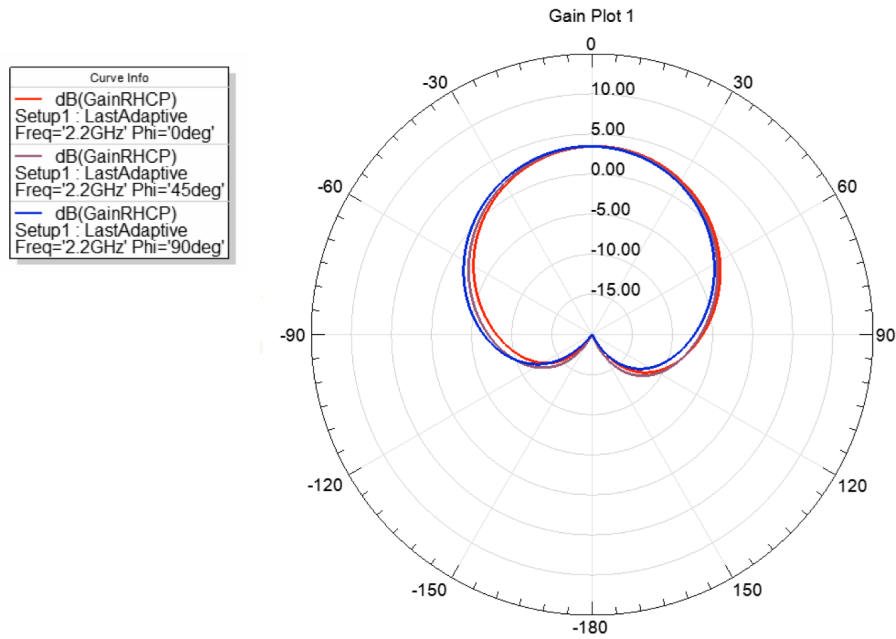


Figura 7.3.5.3: Diagrama de radiación de la antena parche sobre substrato Ro5880 de  $h=5.537\text{mm}$  a la frecuencia de 2.2GHz

### 7.3.6 RESULTADOS GROSOR DE 6.35MM

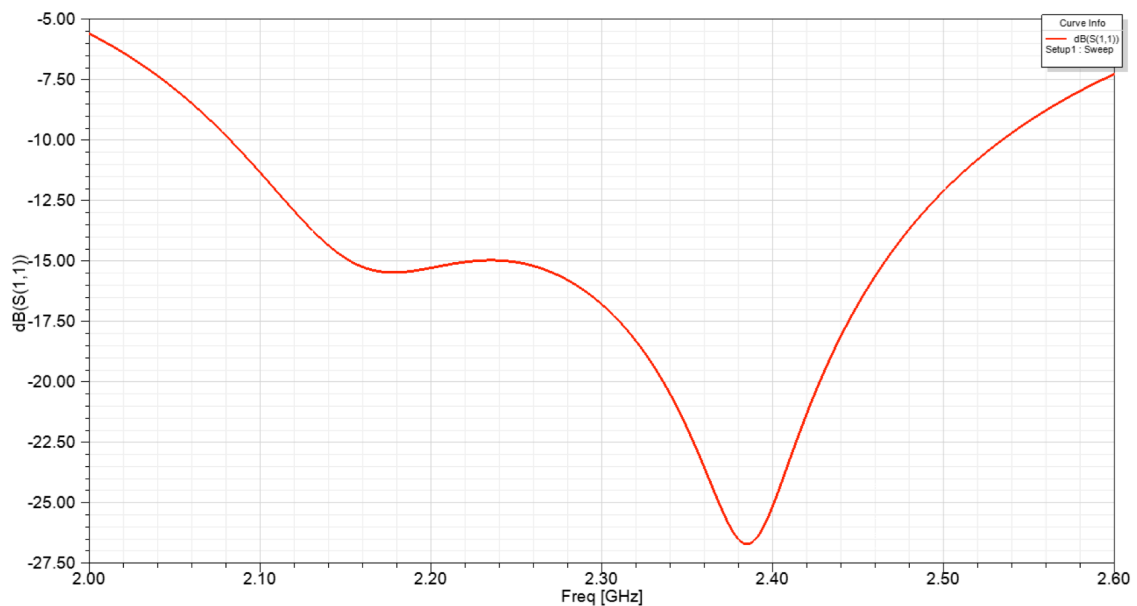


Figura 7.3.6.1: Resultado del  $S_{11}$  para el caso de una antena parche con slot sobre substrato Ro5880 de  $h=6.35\text{mm}$



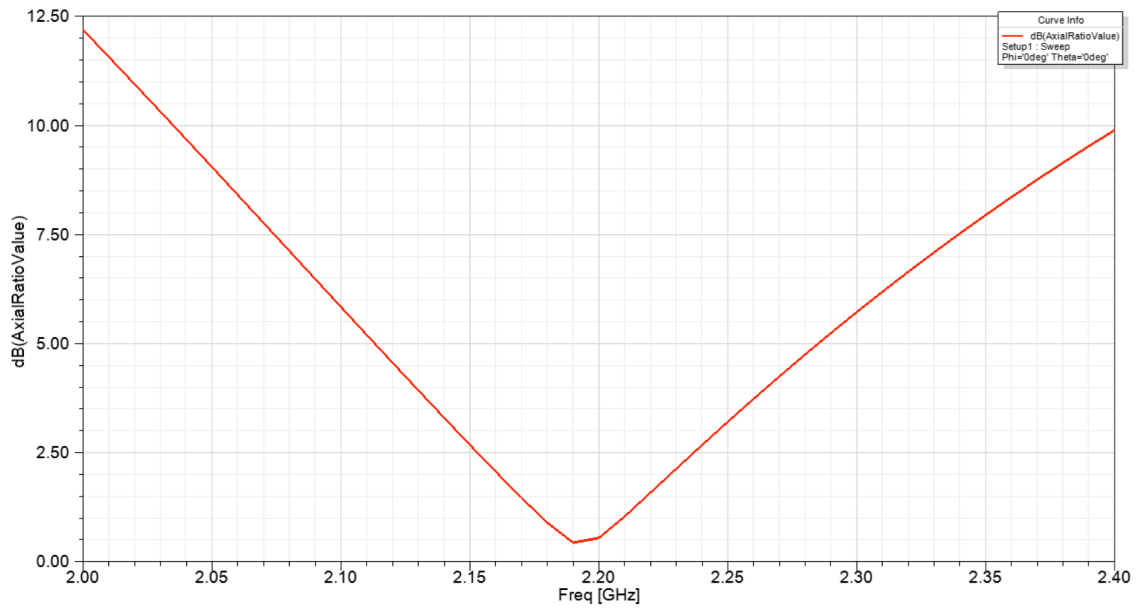


Figura 7.3.6.2: Resultado del axial ratio para el caso de una antena parche con slot sobre substrato Ro5880 de  $h=6.35\text{mm}$

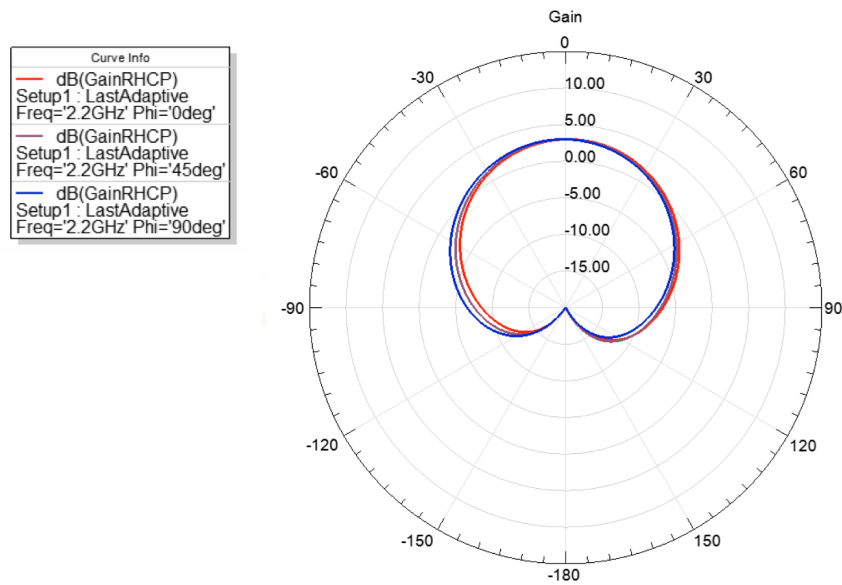
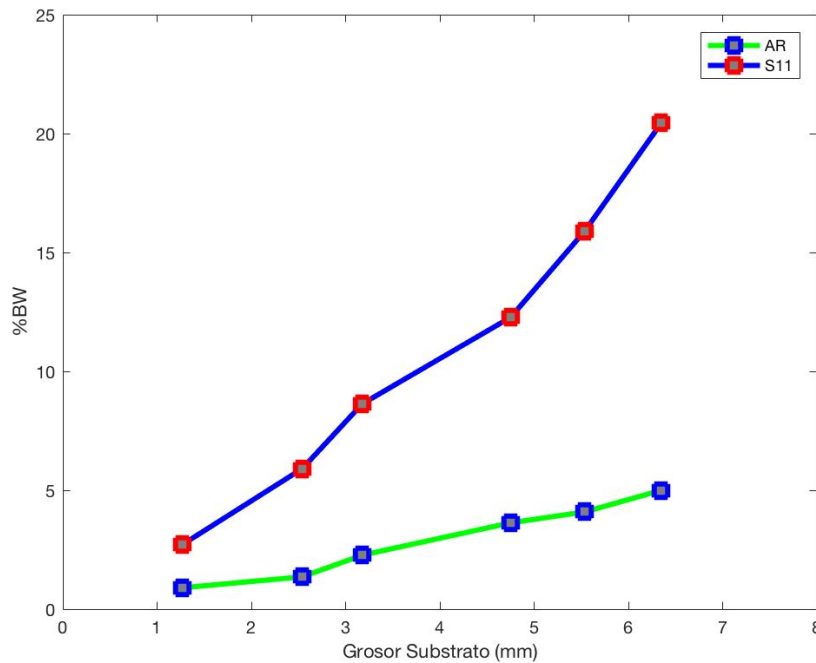


Figura 7.3.6.3: Diagrama de radiación de la antena parche sobre substrato Ro5880 de  $h=6.35\text{mm}$  a la frecuencia de 2.2GHz

### 7.3.7 RESUMEN DEL ANCHO DE BANDA

La *Figura 7.4.6.1* muestra la variación del ancho de banda de impedancia y de polarización en función de la altura de sustrato.



*Figura 7.3.7.1: Mejora de ancho de banda en función del grosor del sustrato*

Se ve que el ancho de banda de impedancia crece de manera exponencial, mientras que el ancho de banda de polarización crece de manera lineal con un aumento de aproximadamente **0.836%** de ancho de banda por cada mm de grosor.

### 7.3.8 RESUMEN GANANCIA

Aun y todo, como se ve en la siguiente tabla, la ganancia resultante de cada diseño anterior no cumple con las condiciones mínimas de 6.5 dBi de ganancia mínima.

Grosor del substrato (mm)	Ganancia (dBi)
1.27	4.32
2.54	4.49
3.175	4.32
4.75	3.86
5.537	3.45
6.35	2.98

*Tabla 7.3.8.1: Valores de ganancia en función del grosor del substrato*

Por tanto, y con el objetivo de llegar a una ganancia mínima de 6.5 dBi se ha llevado a cabo el diseño de **arrays** de parches 2 x 2 con las mismas dimensiones anteriormente configuradas que han aportado el funcionamiento deseado. Como ya se ha comentado, el array proporciona una mayor área de radiación y por tanto una mayor ganancia.

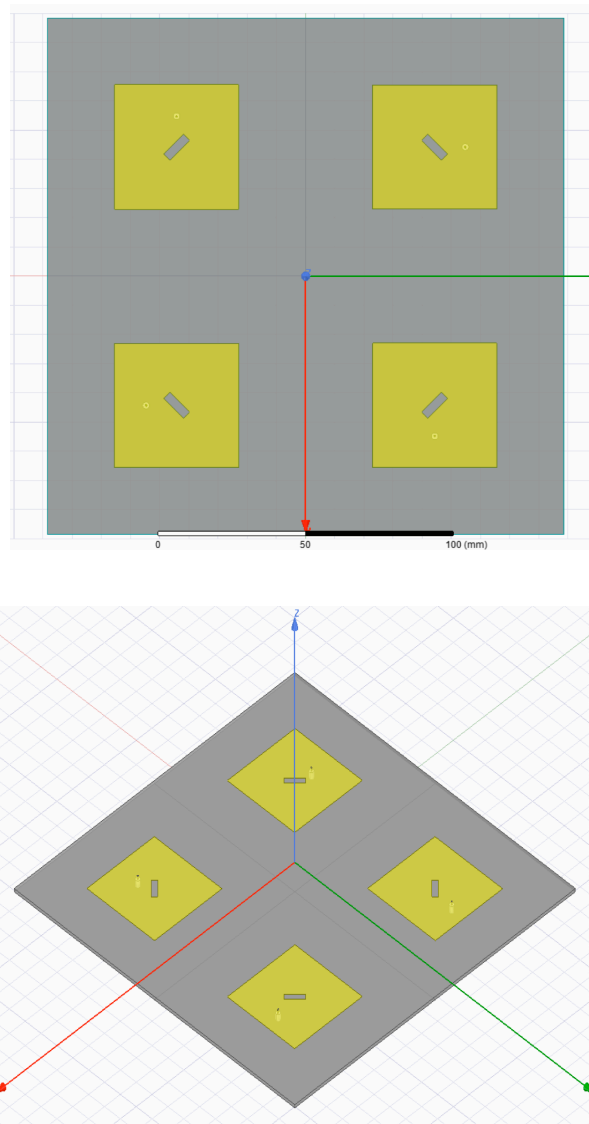
## 7.4 DISEÑO DE ARRAY 2X2 DE ANTENA PARCHÉ

A continuación se llevara a cabo el diseño de arrays de 2x2 de antenas parche microstrip, replicando los parámetros de los diseños anteriores.

### 7.4.1 OBTENCIÓN DE POLARIZACIÓN CIRCULAR EN LOS ARRAYS

Para lograr la polarización circular se ha utilizado la técnica de subarrays síncronos. Como ya se ha detallado en el apartado 4.4, esta técnica ofrece el mayor ancho de banda de polarización y el valor de *axial ratio* más bajo, por lo que nos aseguraremos mediante este método cumplir con creces la condición de ancho de banda.

Cabe destacar que los puntos de alimentación y los parches se han ido rotando secuencialmente con un ángulo de  $90^\circ$  y un desfase de  $90^\circ$  entre los puertos de alimentación. La *Figura 8.1.1* muestra el diseño del array  $2 \times 2$  de antenas parche microstrip, con polarización circular mediante subarray síncrono y un grosor de substrato de 1.27mm.



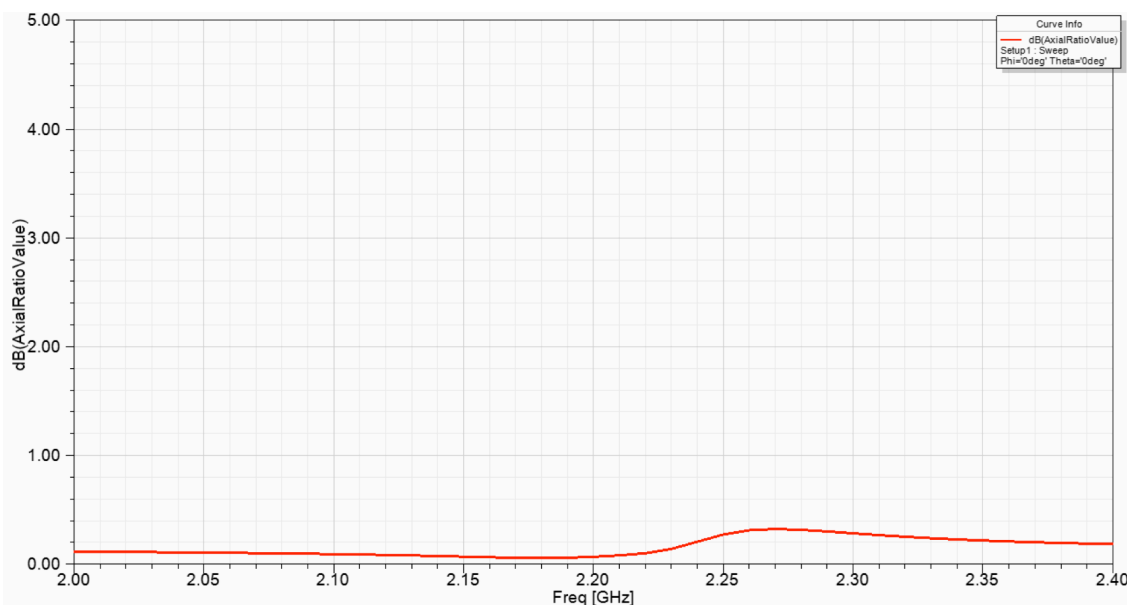
*Figura 7.4.1.1: Diseño del array  $2 \times 2$  de antenas parche*

La separación teórica que debe haber entre elementos es de  $0.6\lambda$  para maximizar la ganancia del conjunto. Manteniendo las dimensiones de grosores para las antenas diseñadas con un solo elemento, se cumple con esta condición.

Varios diseños de arrays han tenido problemas de mallado, por lo que se ha incrementado el número de pasadas previamente configurado en 15 y decrementado el máximo delta.

## 7.4.2 RESULTADOS DE ANCHO DE BANDA DE POLARIZACIÓN Y AXIAL RATIO

En todos los diseños de array, se observa un valor de *axial ratio* y ancho de banda similares. Se expone el ejemplo (*Figura 8.2.1*) del *axial ratio* con el grosor de 1.27mm para ilustrar de manera general el comportamiento del *axial ratio* de todos los diseños.



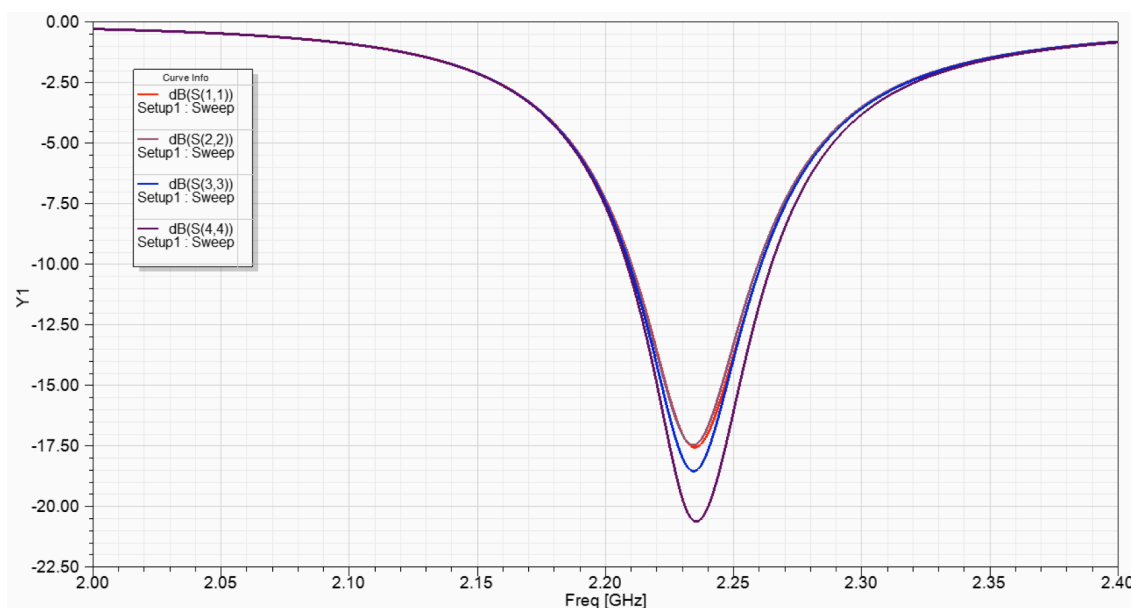
*Figura 7.4.2.1: Axial ratio para el caso de un array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$*

Como se puede ver, el axial ratio tiene un valor cercano a los 0dB en gran parte del espectro observado, por lo que el ancho de banda de polarización con una configuración en array y con la técnica de subarray sincrono, presenta unos valores excepcionales en todos los diseños, siendo mayor del 18%.

### 7.4.3 RESULTADOS DE $S_{11}$ Y GANANCIA

Los trazos del coeficiente de reflexión presentan en su mayoría una frecuencia de resonancia principal y otra resonancia secundaria debido a al efecto del slot, al igual que en la configuración con un solo elemento. En estas graficas aparecen los coeficientes de reflexión calculados en todos los puertos ( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{33}$  y  $S_{44}$ ). Si la malla es correcta debería dar como resultado la misma curva para los cuatro puertos. Sin embargo, hay diseños que no se ajustan las cuatro curvas y a pesar de configurar el diseño con un numero de 35 pasadas y con un error mínimo muy pequeño, no se han llegado a ajustar del todo.

#### 7.4.3.1 Resultados con un sustrato de grosor 1.27mm



*Figura 7.4.3.1.1: Resultado del  $S_{11}$  para el caso del array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$*

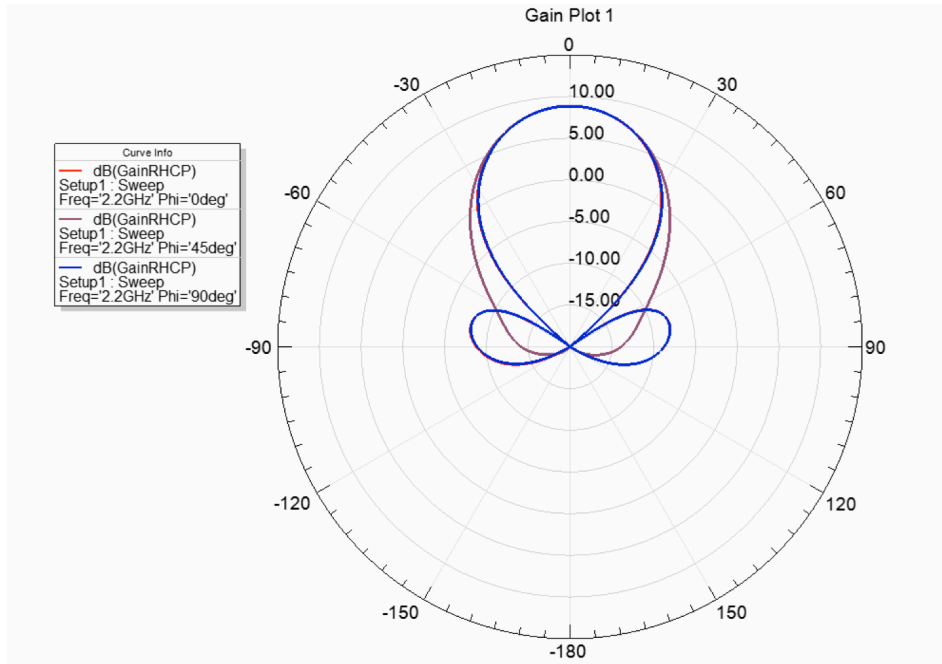


Figura 7.4.3.1.2: Resultado de la ganancia para el caso del array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$

### 7.4.3.2 Resultados con un grosor de 2.54mm

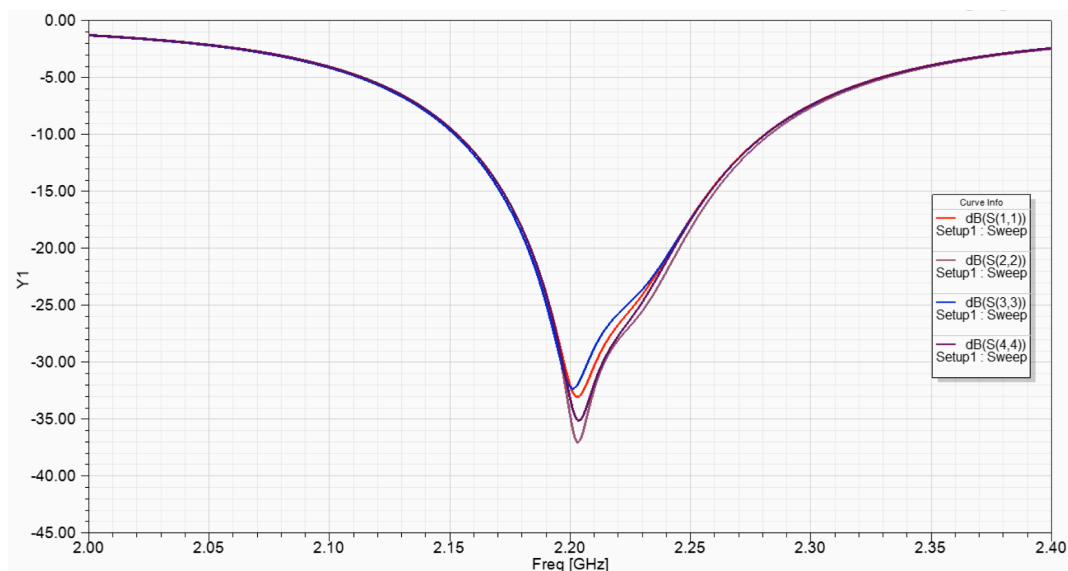


Figura 7.4.3.2.1: Resultado del  $S_{11}$  para el caso del array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre sustrato Ro5880 de  $h=2.54\text{mm}$

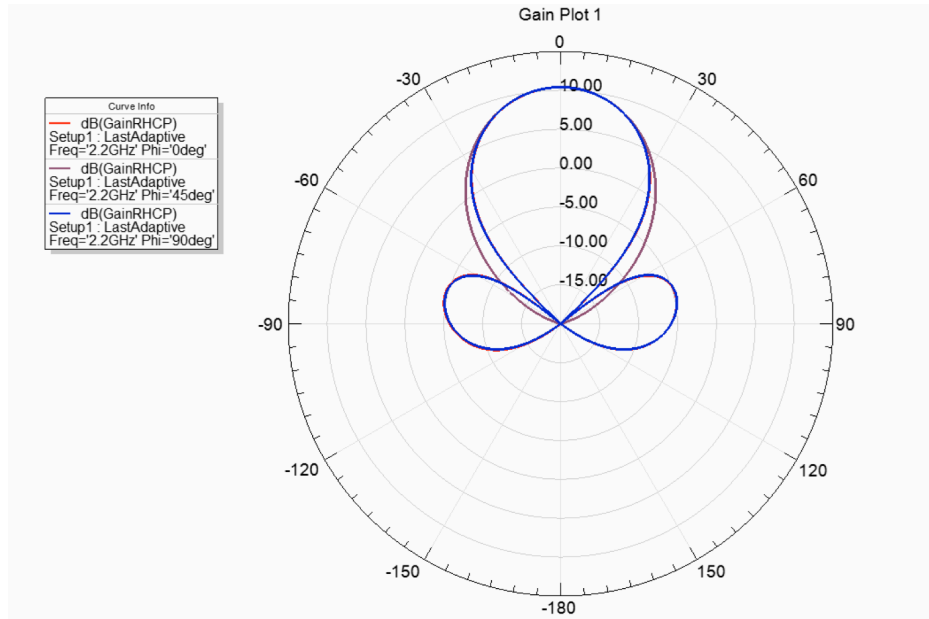


Figura 7.4.3.2.2: Resultado de la ganancia para el caso del array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre substrato Ro5880 de  $h=2.54\text{mm}$

### 7.4.3.3 Resultados con un grosor de 3.175mm

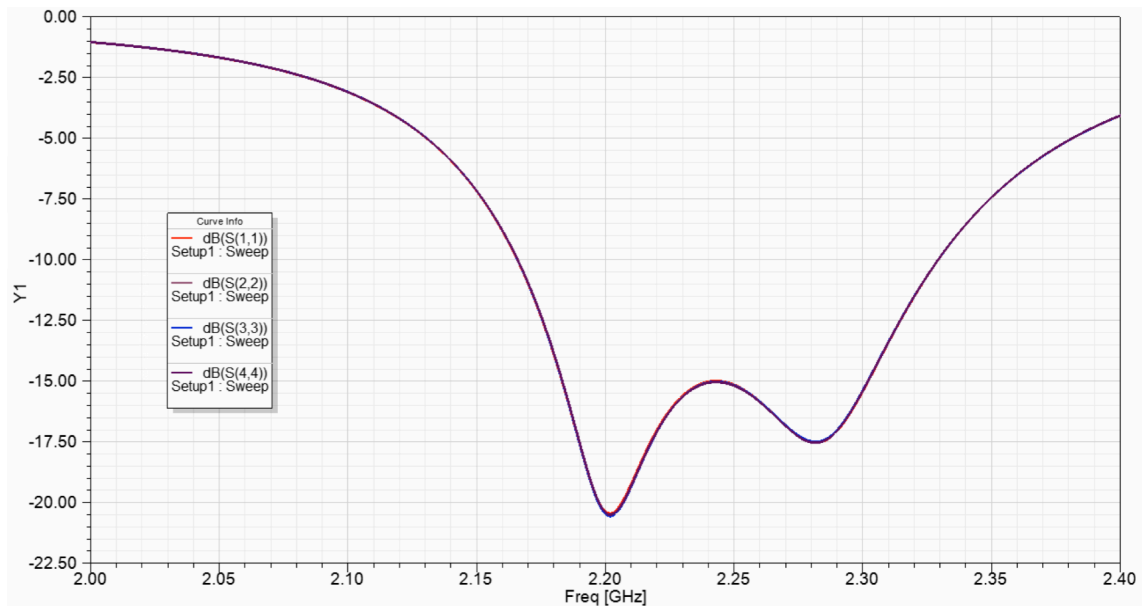


Figura 7.4.3.3.1: Resultado del  $S_{11}$  para el caso del array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre substrato Ro5880 de  $h=3.175\text{mm}$



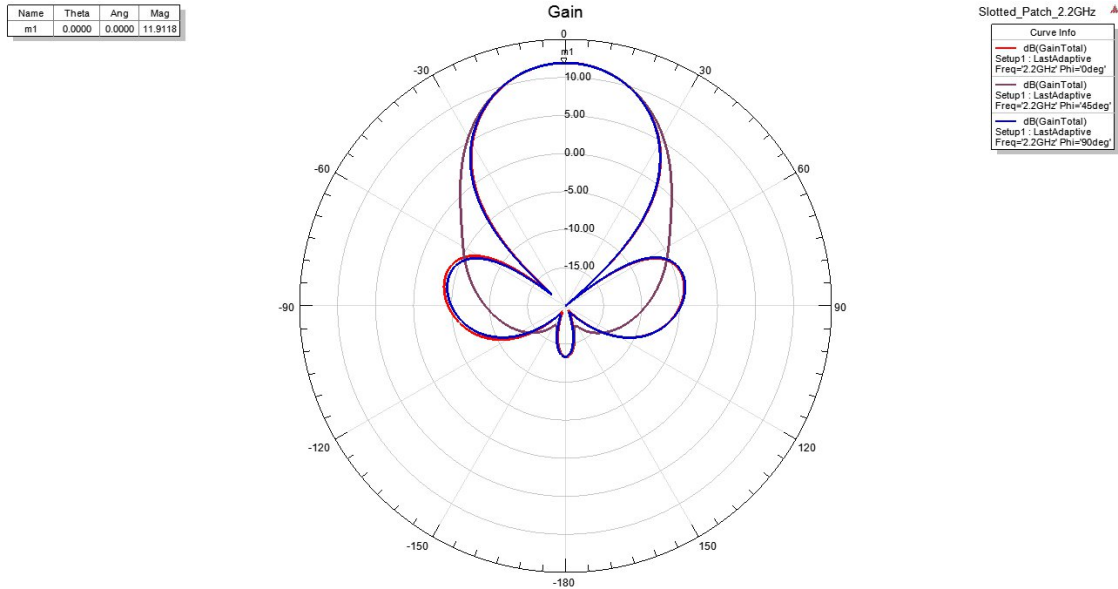


Figura 7.4.3.3.2: Resultado de la ganancia para el caso del array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre sustrato Ro5880 de  $h=3.175\text{mm}$

#### 7.4.3.4 Resultados con un sustrato de grosor 4.75mm

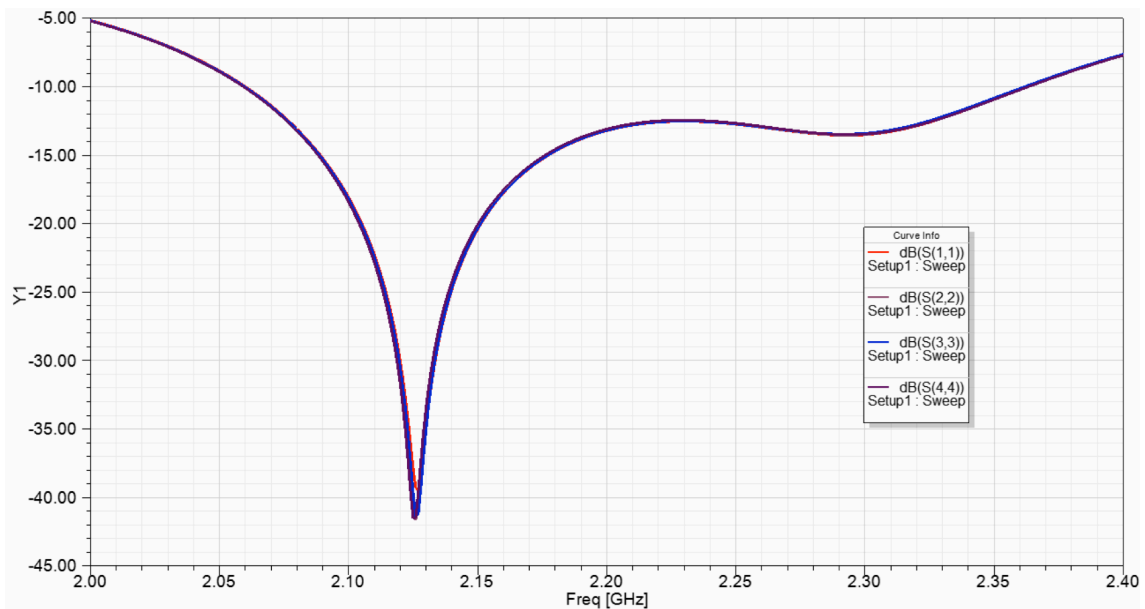


Figura 7.4.3.4.1: Resultado del  $S_{11}$  para el caso del array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre sustrato Ro5880 de  $h=4.75\text{mm}$

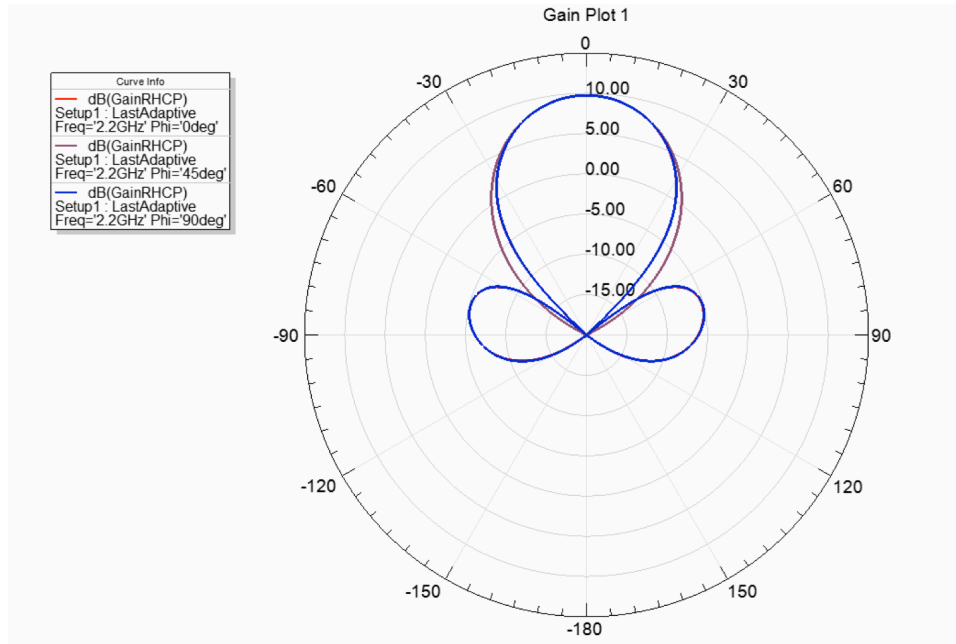


Figura 7.4.3.4.2: Resultado de la ganancia para el caso del array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre sustrato Ro5880 de  $h=4.75\text{mm}$

### 7.4.3.5 Resultados con un sustrato de grosor 5.537mm

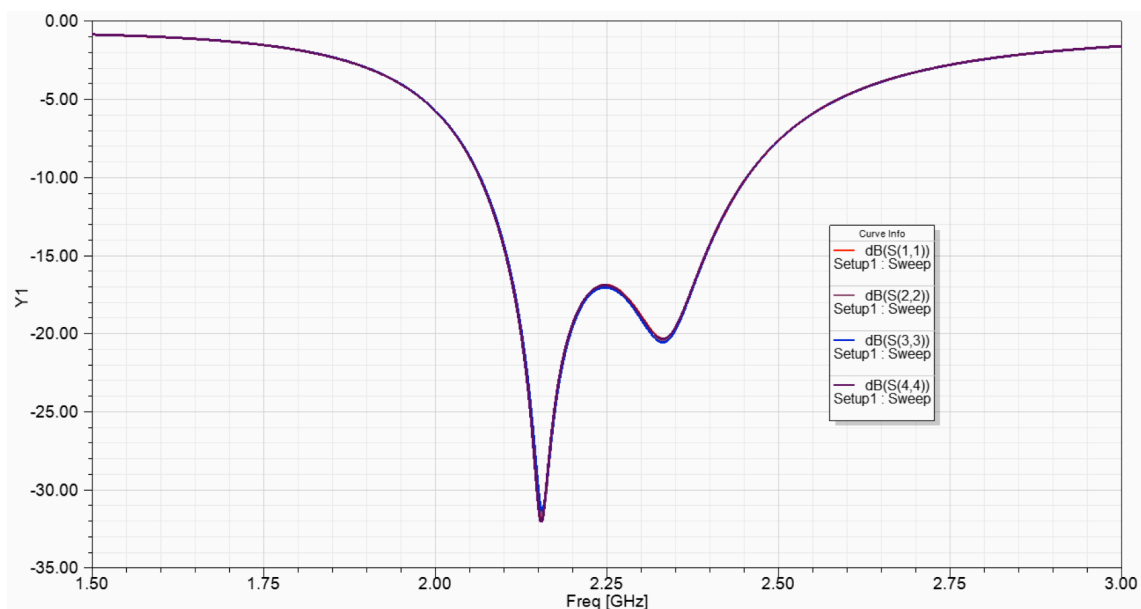


Figura 7.4.3.5.1: Resultado del  $S_{11}$  para el caso del array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre sustrato Ro5880 de  $h=5.537\text{mm}$

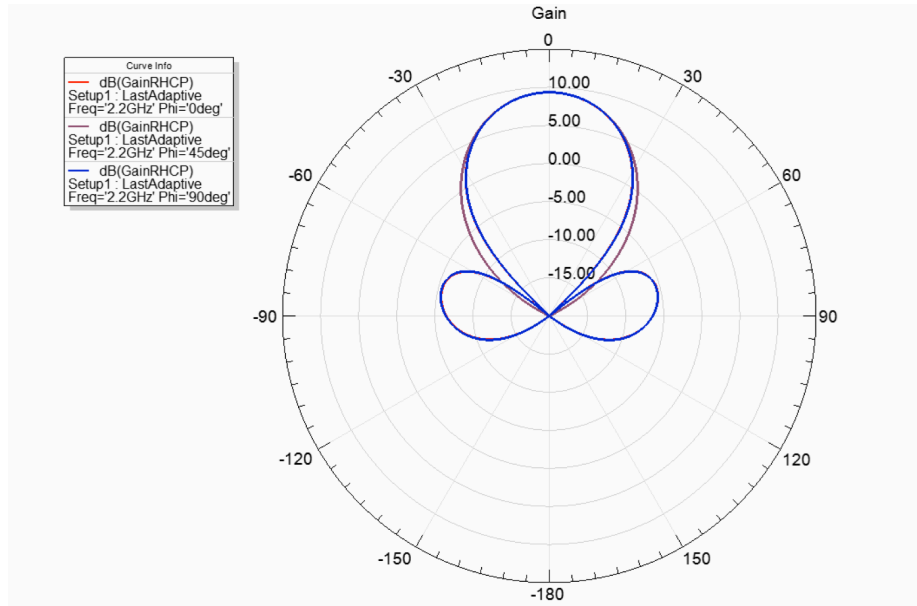


Figura 7.4.3.5.2: Resultado de la ganancia para el caso del array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre sustrato Ro5880 de  $h=5.537\text{mm}$

### 7.4.3.6 Resultados con un sustrato de grosor 6.35mm

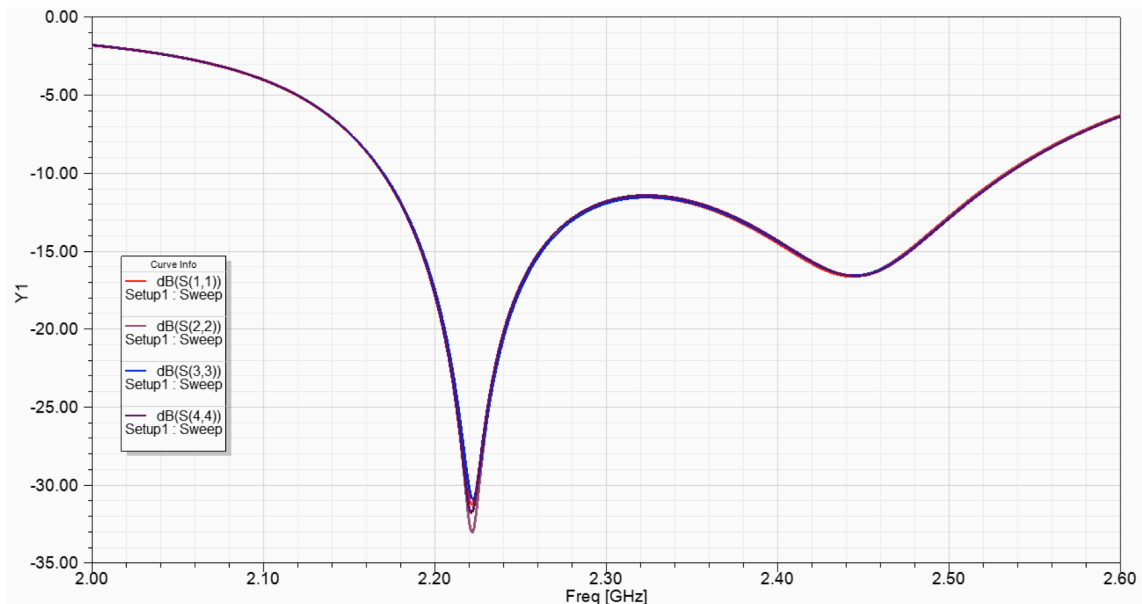


Figura 7.4.3.6.1: Resultado del  $S_{11}$  para el caso del array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre sustrato Ro5880 de  $h=6.35\text{mm}$

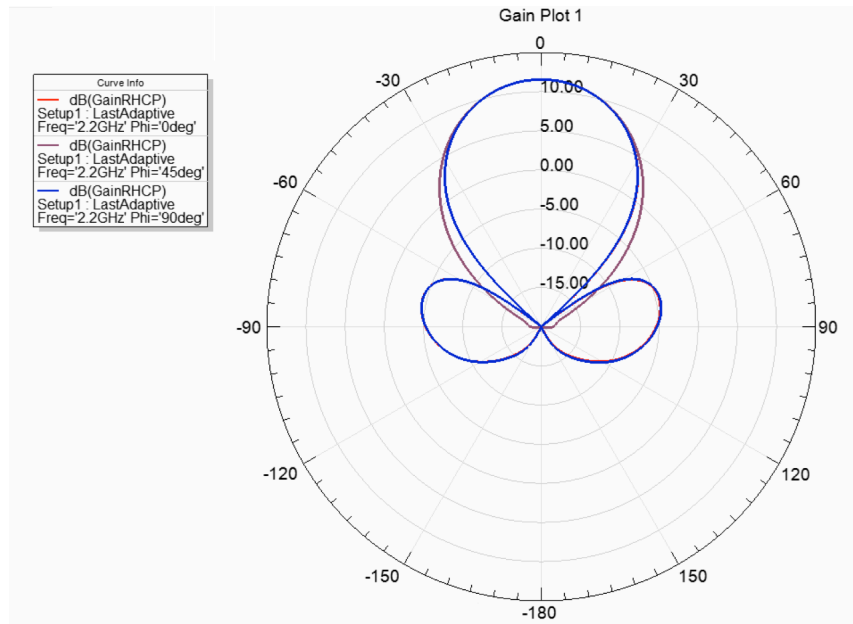


Figura 7.4.3.6.2: Resultado de la ganancia para el caso del array de 4 elementos de antenas parche con slot y técnica de subarray sincrono sobre sustrato Ro5880 de  $h=6.35\text{mm}$

#### 7.4.4 CONCLUSIONES

A la vista de los resultados, se aprecia cómo se obtiene una clara mejoría en cuanto a ganancia se refiere (Figura 7.4.4.1). Se cumple con el razonamiento teórico del funcionamiento del array de 4 elementos en comparación con el de 1 elemento. La ganancia se ve claramente mejorada al tener más área efectiva radiante, además con la ayuda del método de subarray síncrono se maximiza el funcionamiento de polarización circular (Figura 7.4.4.3).

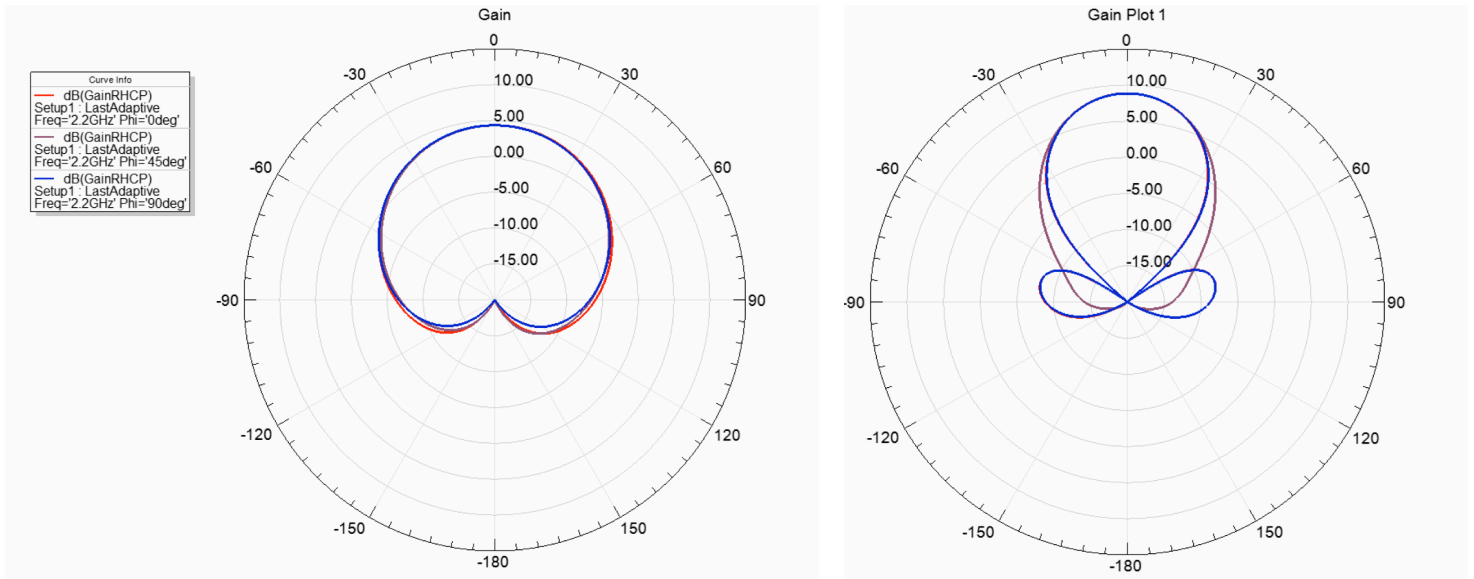


Figura 7.4.4.1: Comparación de ganancias con 1 y 4 elementos de antenas parche sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$

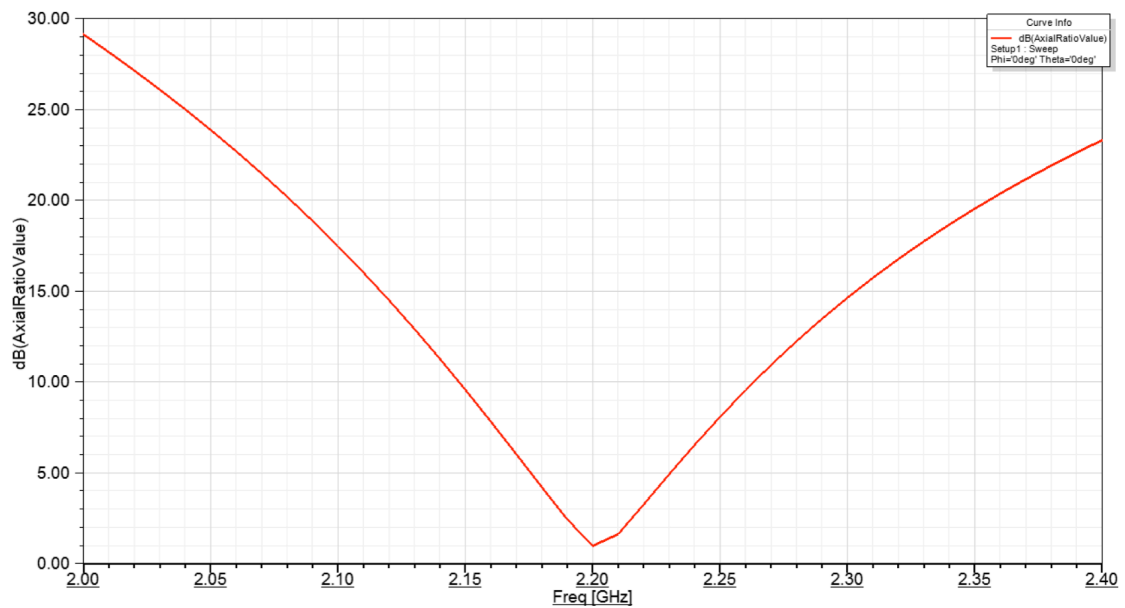
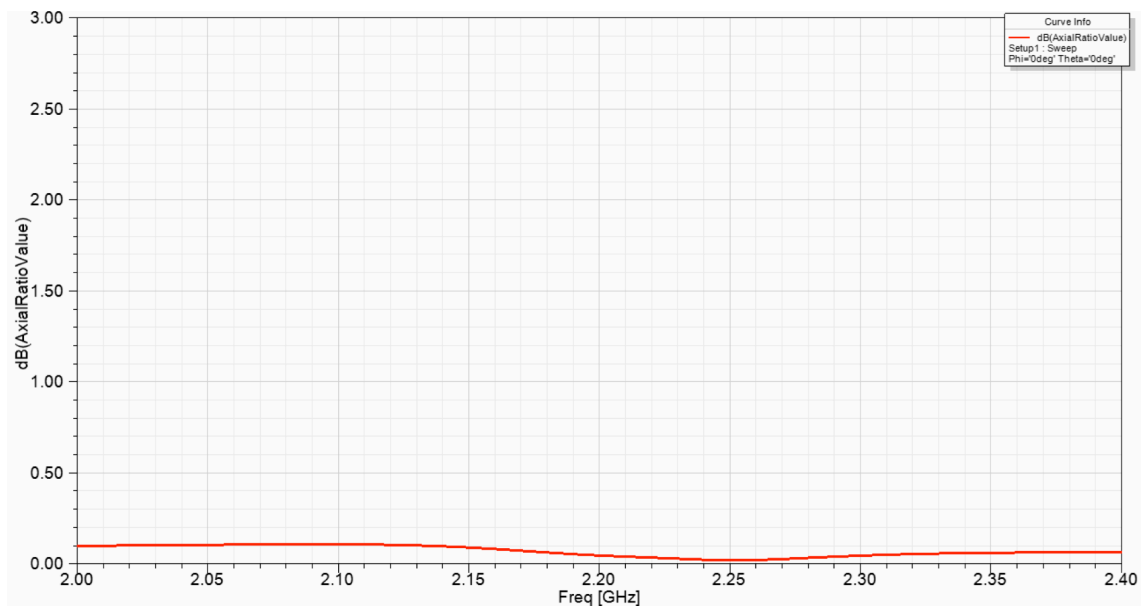


Figura 7.4.4.2: Resultado del axial ratio con 1 elemento sobre sustrato Ro5880 de  $h=2.54\text{mm}$



*Figura 7.4.4.3: Resultado del axial ratio con 4 elementos de antenas parche sobre substrato Ro5880 de h=2.54mm*

La tabla 7.4.4.4 muestra los valores finales tanto para la configuración de 1 elemento como para la de 4 elementos. En la gráfica 7.4.4.5 se muestra la mejoría de la ganancia en función del grosor utilizado, para 1 y 4 elementos.

Grosor substrato(mm)	1 Elemento			4 Elementos	
	BW (%)			BW (%)	
	S11	AR	G(dB)	AR*	G(dB)
1.27	2.72	0.9	4.32		8.85
2.54	5.909	1.36	4.49		10.39
3.175	8.63	2.27	4.32		11.91
4.75	12.27	3.63	3.86		9.74
5.537	15.9	4.09	3.45		9.35
6.35	20.45	5	2.98		11.54

\*Ancho de banda de polarización muy por encima del 4% para todos los diseños

*Tabla 7.4.4.4: Resumen de resultados*

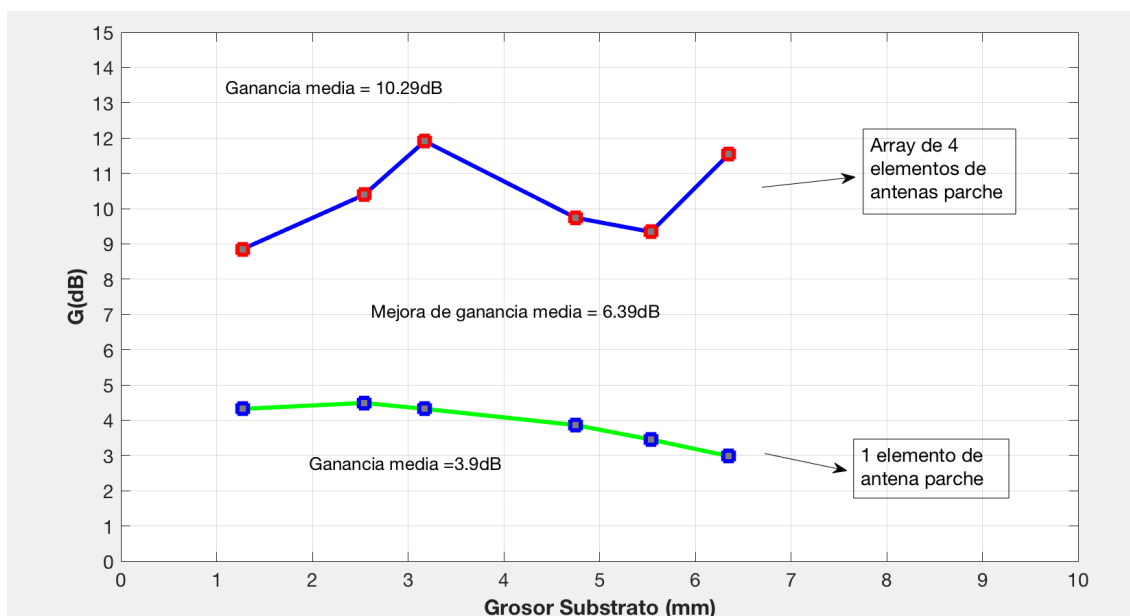


Figura 7.4.4.5: Mejora de ganancia en función del grosor del sustrato

Con la configuración de un solo elemento de parche, se logra una ganancia media de 3.9dB. Sin embargo, con el diseño de 4 elementos se consigue una ganancia media de 10.29dB, lo que supone una mejora en media de 6.39dB.

En conclusión, para satisfacer las especificaciones mínimas requeridas de diseño, a pesar de que la configuración de un solo elemento de parche logra superar el mínimo ancho de banda de un 4% con el grosor de 5.537mm, no es suficiente para llegar a una ganancia de 6.5dB. Por tanto, es necesario recurrir a la configuración del array 2x2 diseñado para cumplir con los requerimientos mínimos de diseño.

En concreto, esta es la configuración que cumple satisfactoriamente las condiciones exigidas para el substrato con el grosor más pequeño:

- Dimensiones del substrato:  
 $90(x2)x90(x2)x2.54(\text{mm}) = 180 \times 180 \times 2.54(\text{mm})$
- Dimensiones de los parches:  
 $41.825 \times 41.3 \text{ (mm)}$
- Dimensiones de los slots:  
 $14.5 \times 3.5 \text{ (mm)}$

Especificaciones requeridas		Resultados obtenidos
BW(%)	4%	5.909% (S11) / $\gg 10\%$ (AR)
G(dBi)	6.5dBi	10.39dB
AR(dB)	<4dB	<0.5dB

*Figura 7.3.1.1: Resultado mínimos requeridos con los obtenidos*



## CAPÍTULO 8: DISEÑO DE ANTENA SLOT A 2.2GHZ CON POLARIZACIÓN LINEAL

En el presente capítulo se pasa a explicar y detallar el diseño de la antena slot a 2.2GHz con polarización lineal. La razón de diseño de este tipo de antena se debe a la necesidad en ciertas aplicaciones TT&C de implementar una antena uniforme y conformable con su entorno cercano. En ciertos diseños puede interesar que la antena presente superficie metálica tanto en la cara superior como en la inferior. Esto sucede por ejemplo cuando la antena se debe colocar en entornos metálicos que pueden estar sometidos a rozamientos o cambios bruscos como sucede en antenas colocadas en lanzaderas. Por lo tanto se estudia en este capítulo el diseño de antenas slot alimentados mediante línea microstrip y stripline.

### 8.1 DISEÑO DE ANTENA SLOT CON LÍNEA MICROSTRIP

En este primer diseño se plantea una antena slot alimentada por una línea microstrip y con polarización lineal. El objetivo es por tanto lograr un correcto funcionamiento de la antena en términos de coeficiente de reflexión y diagrama de radiación.

El substrato utilizado es el Rogers 5800 con un grosor de 1.27mm y  $\epsilon_r = 2.2$ . La capa superior del substrato estará formada por una capa metálica y un slot rectangular mientras que en la capa inferior se sitúa la línea microstrip centrada. La siguiente figura muestra la antena slot con la línea microstrip.

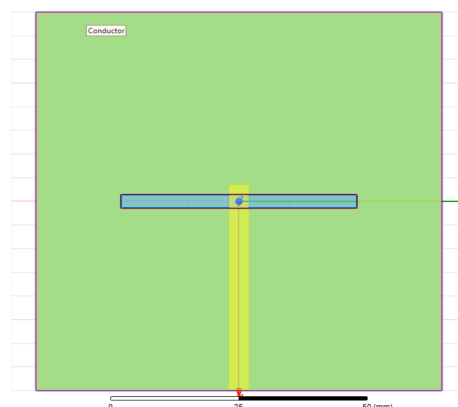


Figura 9.1.1: Antena Slot con línea microstrip

### 8.1.1 CÁLCULO DE DIMENSIONES

En este diseño se tiene en cuenta las dimensiones del sustrato, las dimensiones del slot y las dimensiones de la línea microstrip para lograr un funcionamiento adecuado.

Inicialmente se calculará la longitud del slot a lo largo del eje y, para así después dejar cierta distancia con el sustrato. Teóricamente, la longitud del slot debe ser de  $\lambda/2$ , por tanto:

$$\lambda = \lambda_0 / (\epsilon_{\text{eff}})^{0.5}$$

$$\lambda_0 = c / f = 3 \times 10^8 / 2.2 \times 10^9 = 136.36 \text{mm}$$

$$\lambda = 93.65 \text{mm}$$

$$\lambda/2 = 46.825 \text{mm}$$

Teniendo esta longitud de slot se decide implementar un sustrato de 80mm de lado (80x80). Tanto la anchura del slot como la longitud de la línea microstrip se parametrizarán para observar cómo se comporta la antena.

La anchura de la línea microstrip está calculada a través de la herramienta web [11]. Para su cálculo son necesarios los siguientes parámetros.

<b>Frecuencia</b>	2.2GHz
<b>Grosor del sustrato</b>	1.27mm
$\epsilon_r$	2.2
<b>Z<sub>0</sub></b>	50Ω

*Tabla 9.1.1.1: Parámetros para calcular la anchura Microstrip*

Con estos datos, la anchura de la línea microstrip es de **3.91mm**. Esta anchura teórica se mantendrá constante en el diseño.

Para empezar a analizar el comportamiento de esta antena se ha realizado un barrido paramétrico de la longitud de la línea microstrip y se ha puesto arbitrariamente un valor de anchura de slot de 3mm. La *Figura 8.1.1.1* muestra como varía el comportamiento de S<sub>11</sub>.

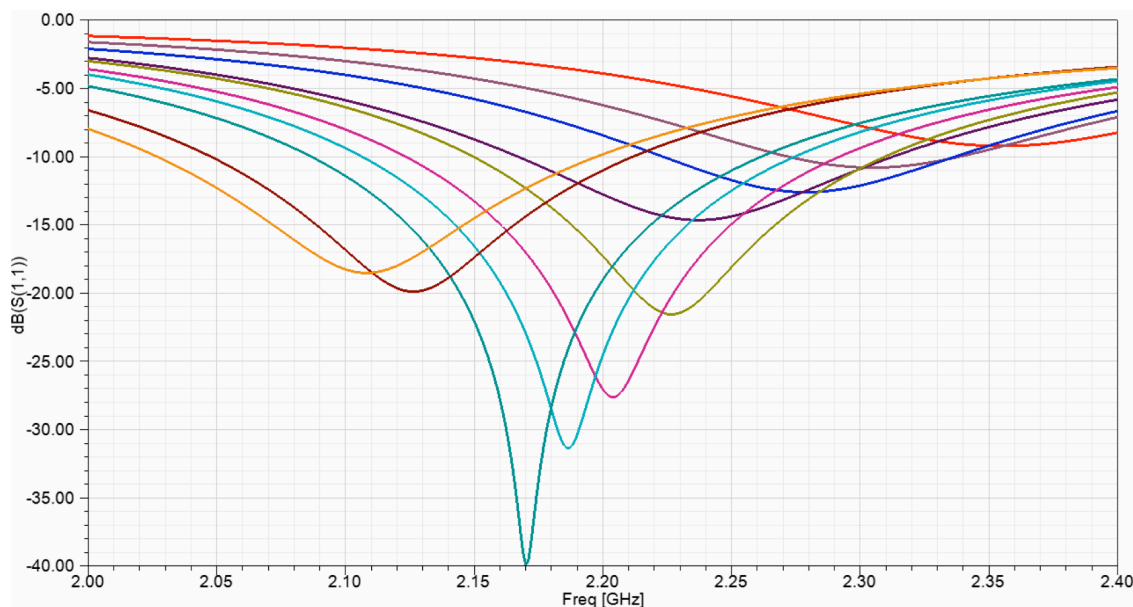


Figura 8.1.1.1: Barrido paramétrico de la longitud de línea microstrip para una antena slot sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$

Como se puede ver, uno de los parámetros que se ve claramente afectado es la frecuencia de resonancia. La longitud de línea que cumple con la frecuencia de resonancia de 2.2GHz es la de **43.65mm**. A pesar de que con esta longitud se obtiene un valor de  $S_{11}$  más que aceptable de -27dB y un BW de 7.72%, se tratará de mejorarlo variando esta vez la anchura del slot y haciendo un pequeño ajuste en la longitud teórica del slot. La Figura 8.1.1.2 simboliza la variación de la anchura del slot.

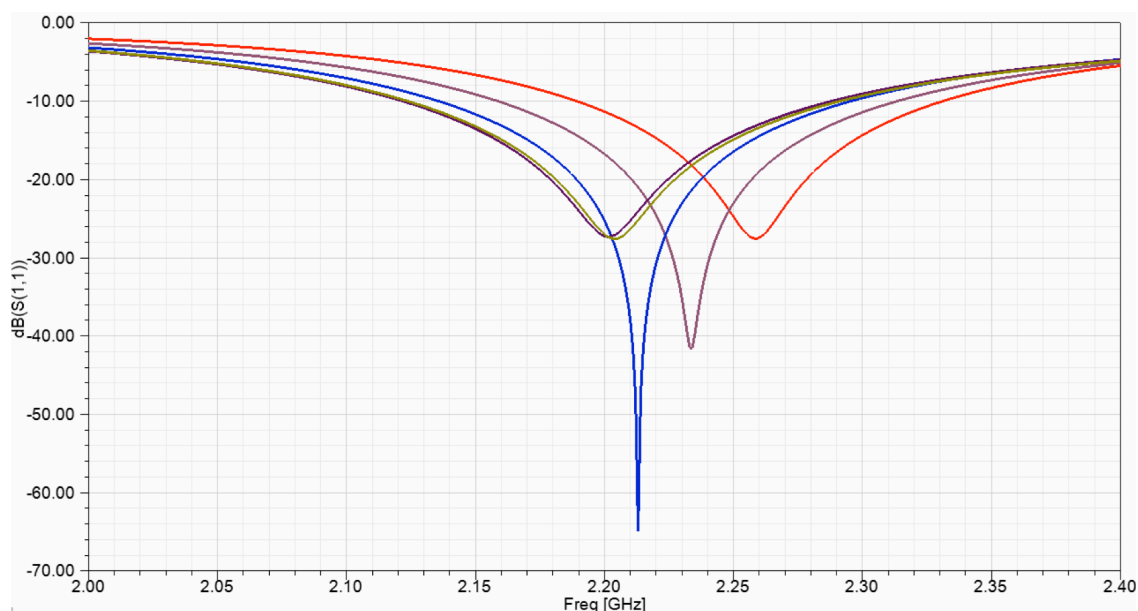


Figura 8.1.1.2: Barrido paramétrico de la anchura del slot para una antena slot sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$

Como se puede comprobar, con un slot de **2mm** de anchura se logra un excelente valor de **-64.95dB** a una frecuencia de **2.213GHz**, con un ancho de banda de **7.72%**. Este resultado se obtiene también gracias al pequeño ajuste en la longitud teórica del slot, siendo esta de **46.57mm**.

## 8.1.2 RESULTADOS

La *Tabla 8.1.2.1* detalla las dimensiones finales de la antena con las que se consigue un funcionamiento correcto de la misma.

<b>Substrato</b>	80mm x 80mm x 1.27mm
<b>Longitud del slot</b>	46.57mm
<b>Anchura del slot</b>	2mm
<b>Longitud de línea microstrip</b>	43.65mm
<b>Anchura de línea microstrip</b>	3.91mm

*Tabla 8.1.2.1: Dimensiones finales*

Con estas medidas de diseño se obtiene la ya mencionada grafica de  $S_{11}$  (*Figura 8.1.2.2*) y la ganancia (*Figura 8.1.2.3*). El ancho de banda de impedancia medido a -10dB es de **7.72%** mientras que la ganancia no supera los **2dB**.

Como ya se suponía, el slot también radia hacia abajo como se ve en el diagrama de ganancia con el lóbulo trasero. Esto hace que no sea aconsejable esta antena en entornos con dispositivos electrónicos cercanos debido a interferencias.

Para mejorar la ganancia, como ya se ha planteado, se va a tratar de suprimir el lóbulo trasero. Por tanto, en el caso de lograrlo toda la ganancia disponible estaría confinada en el lóbulo principal.

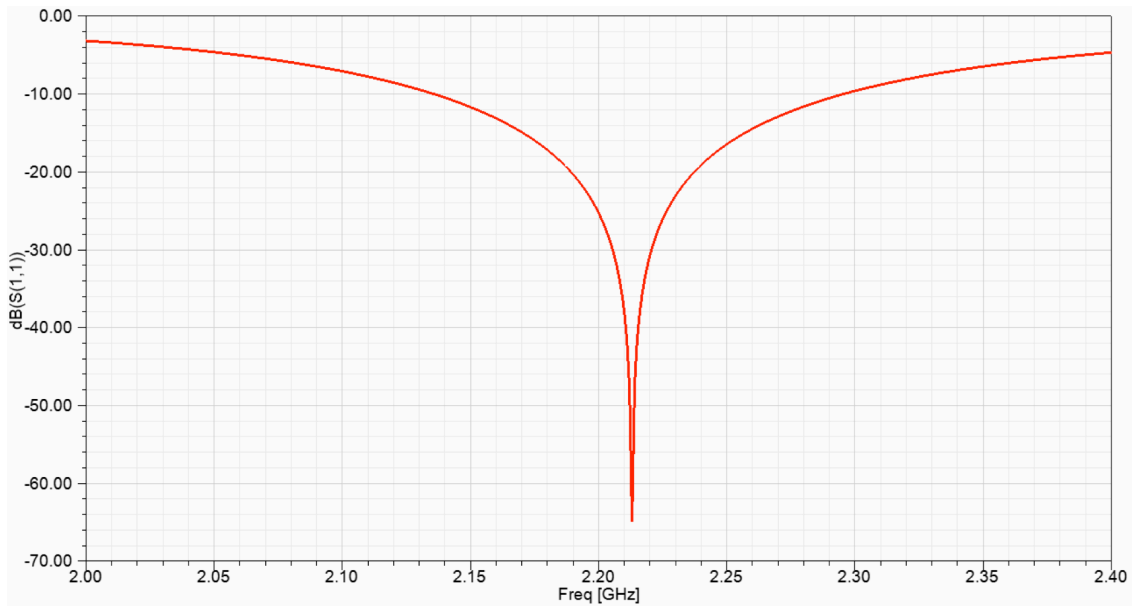


Figura 8.1.2.2: Resultado de  $S_{11}$  para una antena slot con línea microstrip sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$

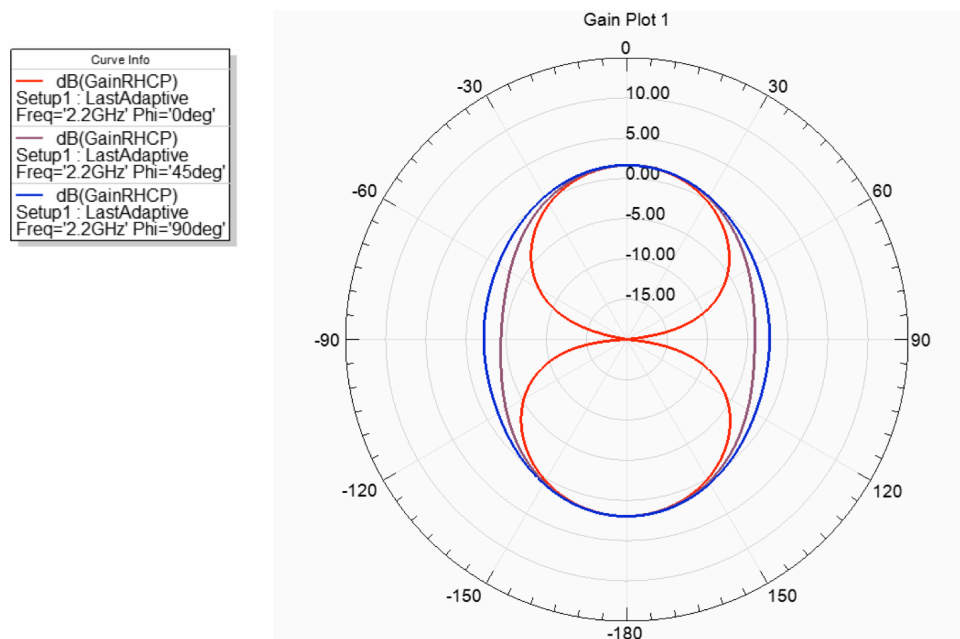
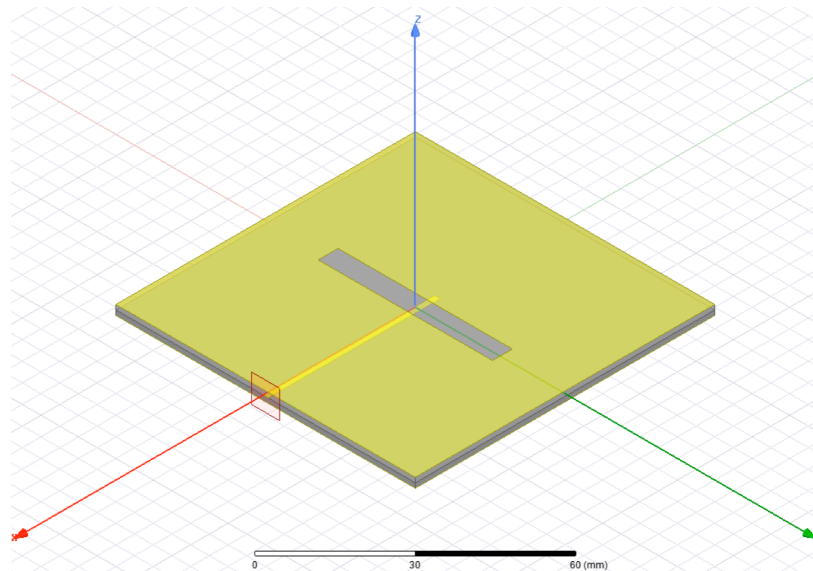


Figura 8.1.2.3: Diagrama de radiación para una antena slot con línea microstrip sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$

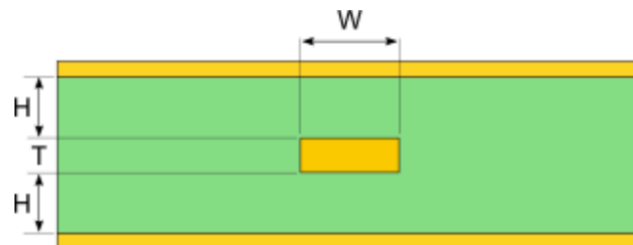
## 8.2 DISEÑO DE ANTENA SLOT CON STRIPLINE

Con el objetivo de eliminar el lóbulo trasero anteriormente dado, se parte de aislar la capa inferior del substrato para que no radie la antena en  $-180^\circ$ . Para ello se ha incluido una capa metálica a lo largo de toda la capa inferior.

Con esta configuración no es posible mantener la línea microstrip anteriormente diseñada en la capa inferior del substrato, por lo que se implementará un stripline simétrico (*Figura 8.2.2*) en el substrato. Este tipo de stripline cuenta con la misma separación de la línea hacia la capa superior e inferior del substrato. Esta vez se utilizarán dos substratos de las mismas características que el diseño anterior, teniendo así la línea stripline ubicada entre ambos substratos.



*Figura 8.2.1: Antena slot con stripline*



*Figura 8.2.2: Stripline simétrico [12]*

## 8.2.1 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES

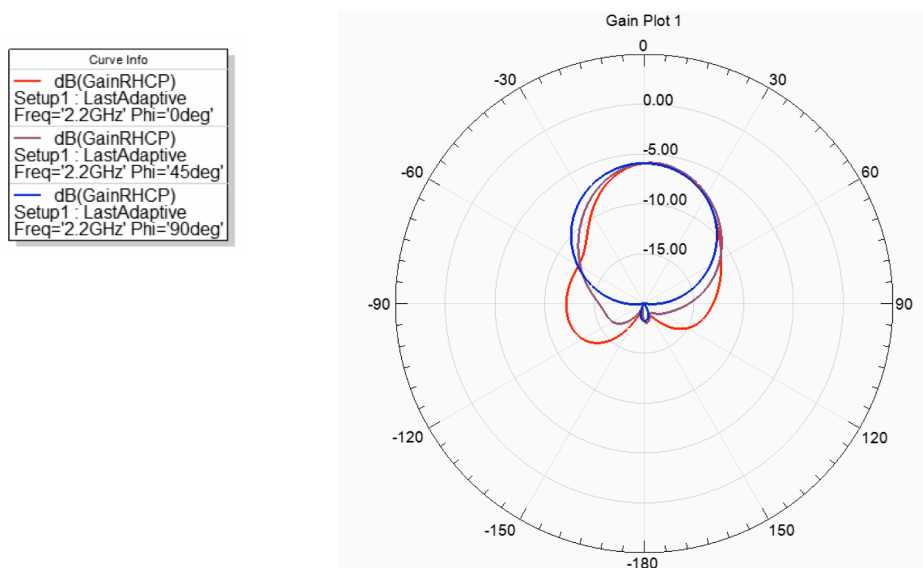
Para el cálculo de la línea stripline se aplican las ecuaciones mostradas en [12] teniendo en cuenta las características del sustrato que le rodea y el tipo de stripline a emplear (stripline simétrico). Con los parámetros de la *Tabla 8.2.1.1* se puede obtener el valor de la anchura teórica de la stripline.

<b>Grosor de Stripline* (T)</b>	0.00000001mm
<b>Altura del sustrato (H)</b>	1.27mm
$\epsilon_r$	2.2
<b>Impedancia</b>	50 $\Omega$

\*Se considera que el grosor Stripline es infinitesimal

*Tabla 8.2.1.1: Parametros de cálculo Stripline simétrico*

La anchura teórica de la línea stripline simétrica da un valor de **1.88mm**. Para un primer acercamiento se ha escogido el mismo slot utilizado para el diseño anterior (*Tabla 8.1.2.1*) y también se ha elegido como longitud de stripline la longitud de línea anterior (*Tabla 8.1.2.1*). Con todo ello, el resultado del diagrama de radiación es el siguiente.



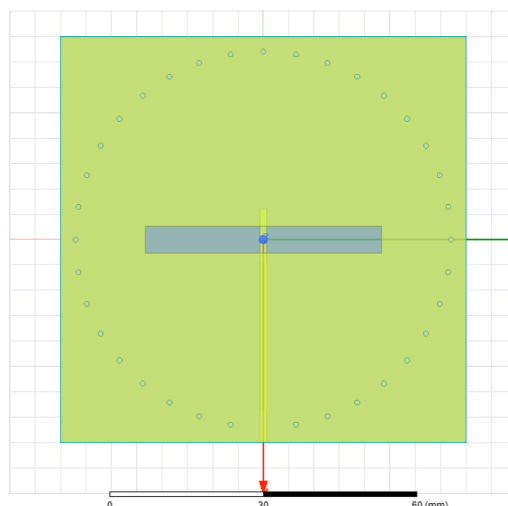
*Figura 8.2.1.2: Diagrama de radiación para una antena slot con stripline sobre dos sustratos Ro5880 de h=1.27mm*

La *Figura 8.2.1.2* muestra una ganancia negativa para el diseño realizado. A través de este resultado podemos deducir que la antena puede estar perdiendo potencia a través del sustrato por las ondas de sustrato, y que el campo se esté propagando entre la guía de placas paralelas. Por otra parte, se ve como se ha minimizado el lóbulo trasero en el diagrama de radiación, por lo que la capa inferior metálica está teniendo efecto.

El siguiente paso será minimizar el efecto de las ondas de sustrato en este diseño. Una de las posibles soluciones para enfrentarse a este problema sería la implantación de unos postes cilíndricos metálicos alrededor del slot con objeto de frenar la propagación a través del sustrato. Esta medida resulta conocida en aplicaciones de esta índole.

### 8.3 DISEÑO DE ANTENA SLOT CON STRIPLINE Y POSTES CILÍNDRICOS

Por simplicidad en el diseño, se ha optado por añadir postes cilíndricos alrededor del slot de forma circular. Los postes atraviesan tanto el sustrato como las dos capas metálicas. La *Figura 8.3.1* muestra la antena slot con los postes incluidos.



*Figura 8.3.1: Antena slot con postes*



### 8.3.1 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES

Para lograr un rendimiento adecuado de este diseño, se tendrá que tener en cuenta el número de postes empleados, las dimensiones del slot y de la línea stripline. Por tanto se han realizado barridos paramétricos para observar el comportamiento y llegar al resultado deseado.

Tras varias pasadas, se ha visto como a menor número de postes, mayor seguirá siendo el efecto de la propagación por el sustrato. Por tanto ha sido necesario implementar una cantidad de postes tal que la distancia entre ellos sea de  $10^\circ$ , teniendo así un total de **35 postes** de **0.5mm** cada uno y a una distancia del centro de **37mm**. Esta distancia al centro también se ha tenido en cuenta al realizar el barrido paramétrico. Se ha deducido que al estar más cerca los postes del slot, las ondas reflejadas pueden llegar a destruir las ondas radiadas por el slot, así que se ha tratado de buscar un compromiso con ese parámetro, siendo 37mm una distancia suficiente para salvar este problema.

La longitud teórica del slot de  $\lambda/2$  se ha mantenido en este diseño. Sin embargo se ha tenido que variar la anchura del slot para lograr una correcta adaptación a la frecuencia de resonancia. La *Tabla 8.3.1.1* muestra las dimensiones finales de la antena slot con stripline y postes cilíndricos.

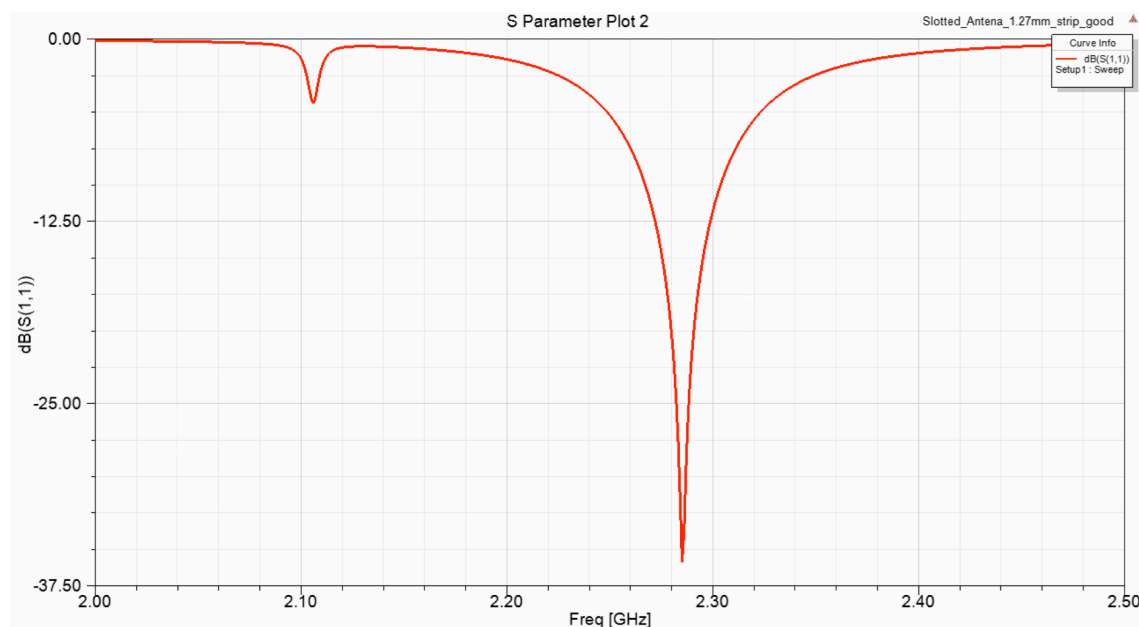
Las dimensiones de la línea stripline se han vuelto a ajustar para lograr un buen resultado acorde con los nuevos elementos incluidos. La longitud stripline será de 46mm, mientras que la anchura será de 1.5mm.

Dimensiones del sustrato superior	80mm x 80mm x 1.27mm
Dimensiones del sustrato inferior	80mm x 80mm x 1.27mm
Longitud stripline	46mm
Anchura stripline	1.5mm
Longitud del slot	46.57mm
Anchura del slot	5.3mm
Numero de postes cilíndricos	35
Radio de los postes	0.5mm
Distancia entre postes	$10^\circ$
Distancia de los postes al centro del sustrato	37mm

*Tabla 8.3.1.1: Dimensiones finales del diseño*

## 8.3.2 RESULTADOS

Con las dimensiones utilizadas en la *Tabla 8.3.1.1*, se obtienen los siguientes resultados.



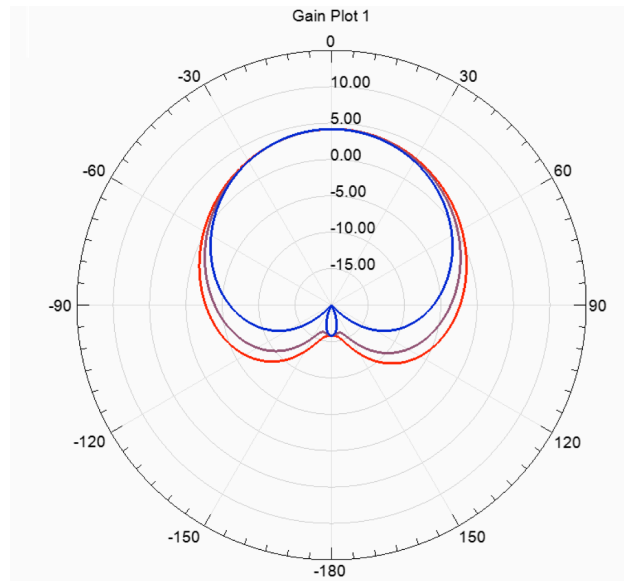
*Figura 8.3.2.1: Resultado de  $S_{11}$  para una antena slot con stripline y postes cilindricos sobre dos substratos Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$*

Con estos parámetros se logra una correcta adaptación a la frecuencia de resonancia (*Figura 8.3.2.1*), que en este caso es de **2.285 GHz**. El valor del coeficiente de reflexión a esa frecuencia es de **-35.84dB** con lo que resulta suficientemente satisfactorio. En este caso, el ancho de banda obtenido es de **1.36%**, lo que resulta inferior al diseño de la antena slot con línea microstrip.

La *Figura 8.3.2.2* muestra la ganancia obtenida. Lo importante de este diagrama de radiación se ve en la ausencia del lóbulo trasero. A pesar de que se observa un pequeño lóbulo a  $-180^\circ$ , la ganancia de ese lóbulo resulta prácticamente despreciable comparado con el lóbulo principal en la dirección de máxima radiación. El valor de la ganancia en la dirección de máxima radiación es de **4.16dB**.

Por tanto, el objetivo de suprimir el lóbulo trasero radiado por la antena slot con línea microstrip se ha conseguido con este diseño de antena slot con stripline, capa metálica inferior y postes cilíndricos atravesando ambos substratos.

Curve Info	
—	dB(GainRHCP) Setup1 : LastAdaptive Freq=2.2GHz' Phi='0deg'
—	dB(GainRHCP) Setup1 : LastAdaptive Freq=2.2GHz' Phi='45deg'
—	dB(GainRHCP) Setup1 : LastAdaptive Freq=2.2GHz' Phi='90deg'



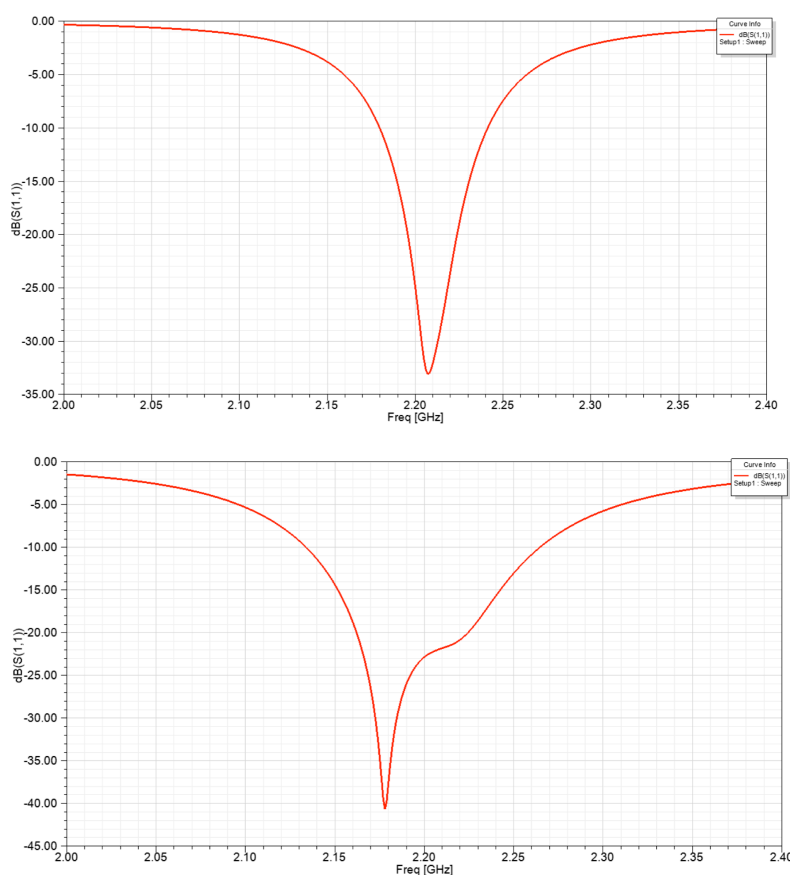
*Figura 8.3.2.2: Diagrama de radiación para una antena slot con stripline y postes cilíndricos sobre dos substratos Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$*

## CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Tras haber diseñado varias antenas en tecnología plana buscando cumplir las especificaciones típicas de aplicaciones TT&C, se ha llegado a una serie de conclusiones útiles. En este último capítulo se detallarán y compararán todos los diseños realizados.

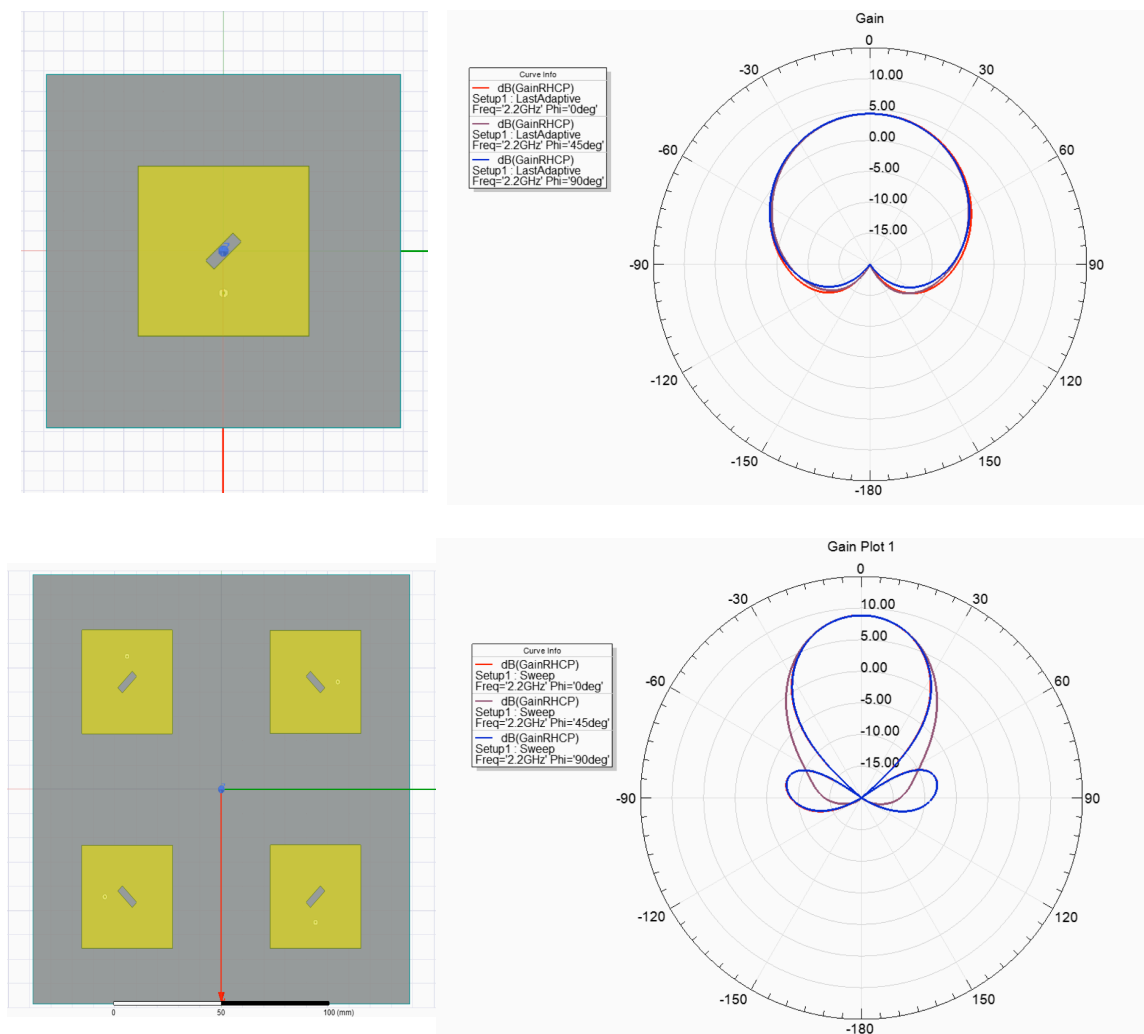
El diseño de antenas parche alimentadas mediante conector y con slot diagonal para la polarización circular nos ha proporcionado resultados útiles en cuanto a la mejora de tan limitados parámetros de antenas parche como son el ancho de banda y la ganancia.

El valor de ancho de banda se consiguió mejorar analizando la variación del grosor del sustrato, con todo lo que ello conlleva, y así logrando el objetivo de ancho de banda puesto en un **4%**. La *Figura 9.1* muestra esa mejora del ancho de banda gráficamente.



*Figura 9.1: Comparación de BW para grosores de 1.27mm y 2.54mm*

Aun y todo, a pesar de mejorar exponencialmente el ancho de banda de impedancia, el ancho de banda de polarización se incrementa lentamente. Para ello, y junto al objetivo de mejora de ganancia, se ha utilizado la configuración en array de 4 elementos y además con la técnica de subarray síncrono se ha logrado mejorar tanto la ganancia como el valor del *axial ratio*. La *Figura 9.2* muestra esa mejoría de ganancia, mientras que la *Figura 9.3* ilustra la mejora en el *axial ratio*.



*Figura 9.2: Mejora de ganancia entre una antena parche sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$  y Array de 4 elementos de antenas parche sobre sustrato Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$*

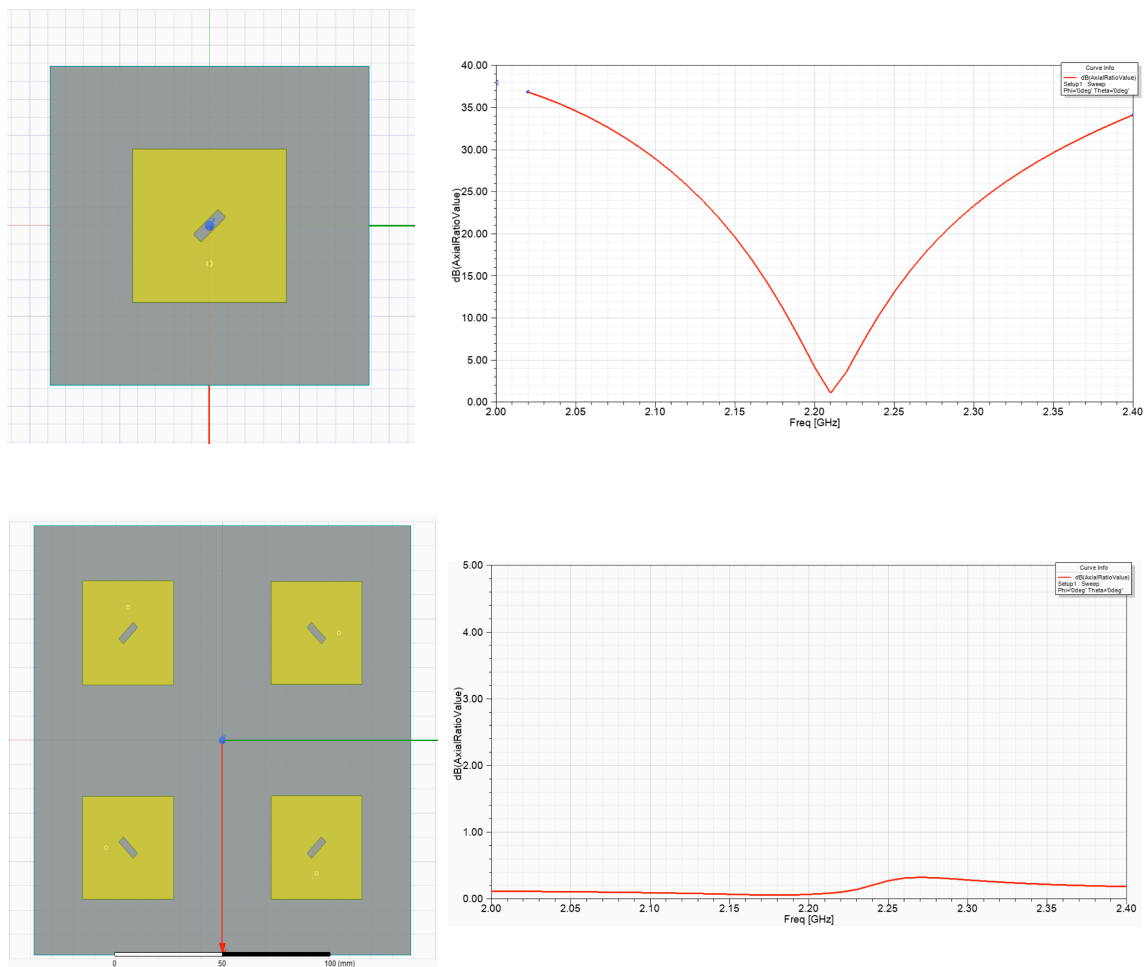


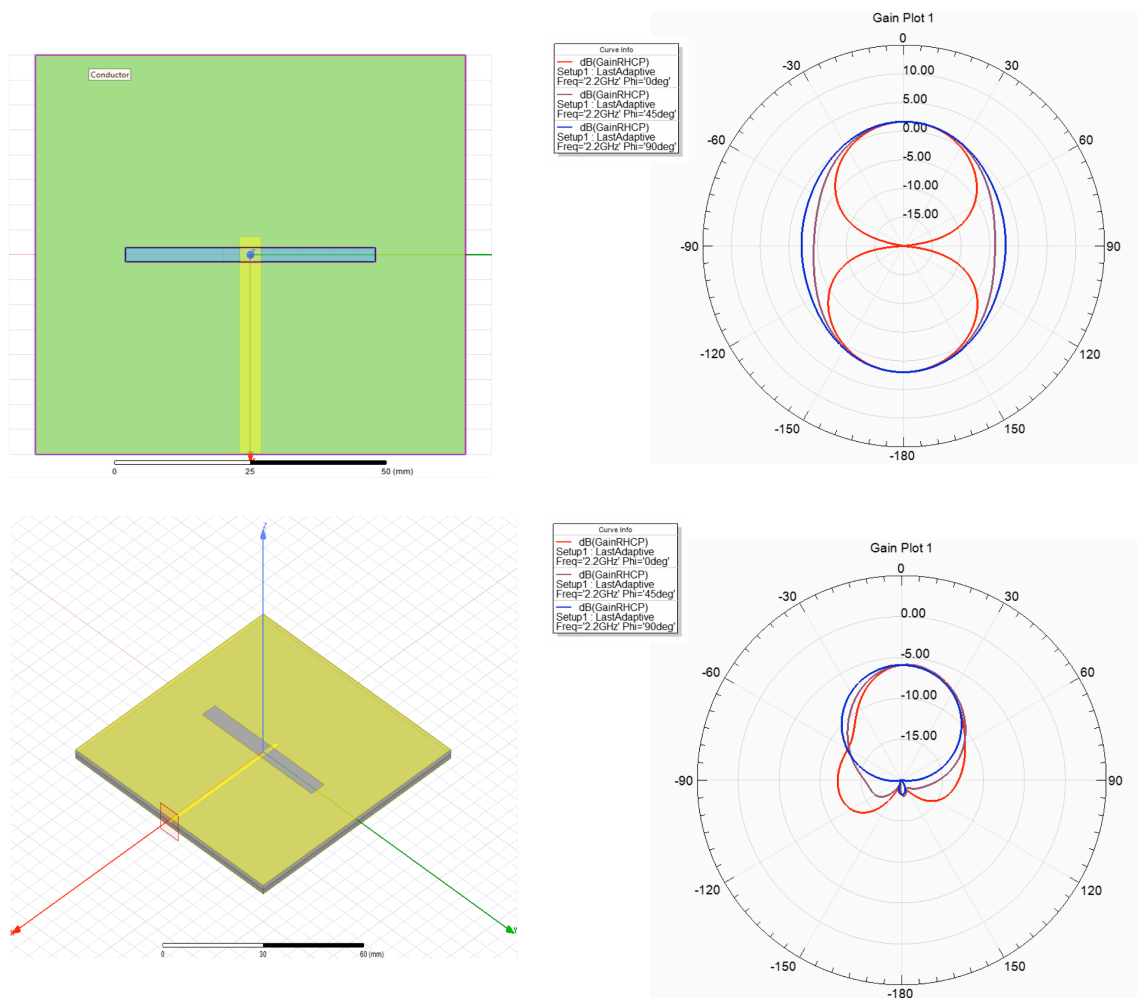
Figura 9.3: Mejora de axial ratio

Con estos resultados se llega a la conclusión que para lograr un buen ancho de banda y ganancia en una antena parche con polarización circular a 2.2GHz se ve necesario recurrir a la configuración en array con un grosor de substrato lo suficientemente alto para que cumpla con las condiciones de ancho de banda exigidas. En cuanto al *axial ratio*, se ha propuesto utilizar la técnica de subarray síncrono para maximizar el comportamiento del *axial ratio*. Sin embargo, existen otras técnicas que pueden alcanzar los resultados de axial ratio deseados. Con la técnica de subarray síncrono se ha asegurado que la polarización circular y por tanto el *axial ratio* tenga el mejor valor posible.

Por otra parte, existen casos propios de aplicaciones TT&C en los que la conformidad con el entorno es un elemento imprescindible. Esa conformidad nos la puede proporcionar la antena slot con toda una capa superior metálica. Se ha

propuesto un diseño de antena slot con línea microstrip de alimentación. Este diseño se caracteriza por lograr un buen ancho de banda, sin embargo el slot se comporta también como un elemento radiante en esa dirección posterior a  $-180^\circ$ . De ahí que aparezca un lóbulo trasero. Esta potencia radiada dirigida hacia atrás, y por tanto en la parte contraria a la dirección de máxima radiación puede afectar negativamente a dispositivos cercanos por la aparición de interferencia. Es por esto que se ha llevado a cabo otro diseño con el fin de eliminar ese lóbulo y lograr así un funcionamiento adecuado para una aplicación de estas características.

Las siguiente figuras muestran ese cambio en el diagrama de radiación tras pasar de un diseño con línea microstrip hasta llegar a un diseño con stripline simétrica y postes cilíndricos.



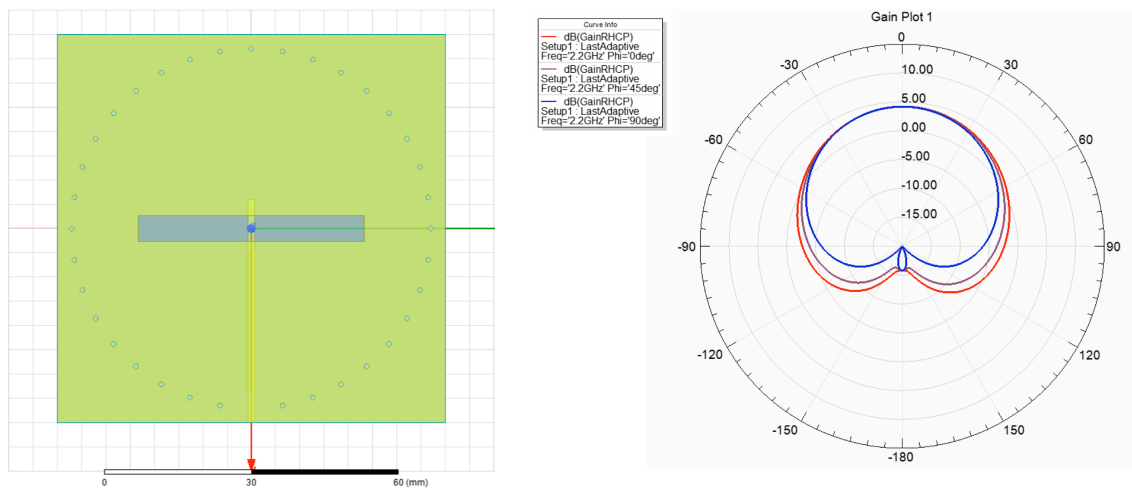


Figura 9.4: Proceso de mejora de ganancia

Este proceso de mejora de ganancia ha requerido de un par de elementos que consigan frenar la propagación de las ondas de substrato a lo largo del substrato y la eliminación del lóbulo trasero. Para ello se ha propuesto la inclusión de un substrato con capa inferior metálica al diseño ya existente de antena slot con línea microstrip. En este nuevo diseño la implementación de este nuevo substrato hace que la línea microstrip pase a ser una stripline simétrica lo que consigue eliminar el lóbulo trasero satisfactoriamente. Por otra parte, las ondas de substrato se han conseguido frenar gracias a los postes cilíndricos orientados circularmente en torno al centro de la antena slot. Como se ve en el diagrama de radiación del último diseño, los postes consiguen frenar las ondas de superficie y por tanto la antena radia de manera adecuada hacia la dirección de máxima radiación.

La *Tabla 9.5* y *9.6* muestran los resultados finales de todos los diseños del presente proyecto.



Grosor substrato(mm)	Antena Parche				
	1 Elemento			4 Elementos	
	BW (%)		G(dB)	BW (%)	
	S11	AR		AR*	G(dB)
1.27	2.72	0.9	4.32		8.85
2.54	5.909	1.36	4.49		10.39
3.175	8.63	2.27	4.32		11.91
4.75	12.27	3.63	3.86		9.74
5.537	15.9	4.09	3.45		9.35
6.35	20.45	5	2.98		11.54

\*Ancho de banda de polarización muy por encima del 4% para todos los diseños

*Tabla 9.5: Resumen de resultados de Antenas Parche*

Grosor substrato(mm)	Antena Slot			
	Línea Microstrip		Stripline simétrica con postes	
	BW <sub>S11</sub> (%)	G(dB)	BW <sub>S11</sub> (%)	G(dB)
1.27mm	7.72	1.64	1.36	4.16

*Tabla 9.6: Resumen de resultados de Antenas Slot*

Como se puede observar en las tablas de resumen de resultados, la antena slot en su versión microstrip ofrece un mejor resultado en ancho de banda comparada con la antena parche del mismo grosor. Sin embargo, esta versión de antena slot no aporta el mejor valor de ganancia por el fenómeno del lóbulo trasero.

La antena slot en su versión stripline con postes sí que ofrece una ganancia aceptable al haber eliminado los problemas que surgían del diseño en la versión microstrip y en la versión stripline sin postes. Sin embargo, el ancho de banda de impedancia obtenido resulta insuficiente.

Como ya se ha detallado en la primera parte, es posible mejorar el ancho de banda incrementando el grosor del substrato empleado. Por tanto, y como línea futura, aumentando el grosor de ambos substratos en el diseño stripline sería posible mejorar el valor de ancho de banda.

Por otra parte, la ganancia obtenida con la antena slot en su versión stripline con postes no alcanzaría los requerimientos comerciales impuestos en el apartado 7, lo que nos lleva a proponer como línea futura el diseño de esta versión de antena slot en configuración de array de 4 elementos para ver mejorada la ganancia. No obstante, se ha incluido un factor de array de una agrupación 2x2 en el último diseño de antena slot con stripline y postes cilíndricos para observar como aproximación el resultado del diagrama de radiación. La figura 9.7 muestra el diagrama de radiación obtenido tras haber añadido el factor de array. Alcanza un valor de 10dB de ganancia.

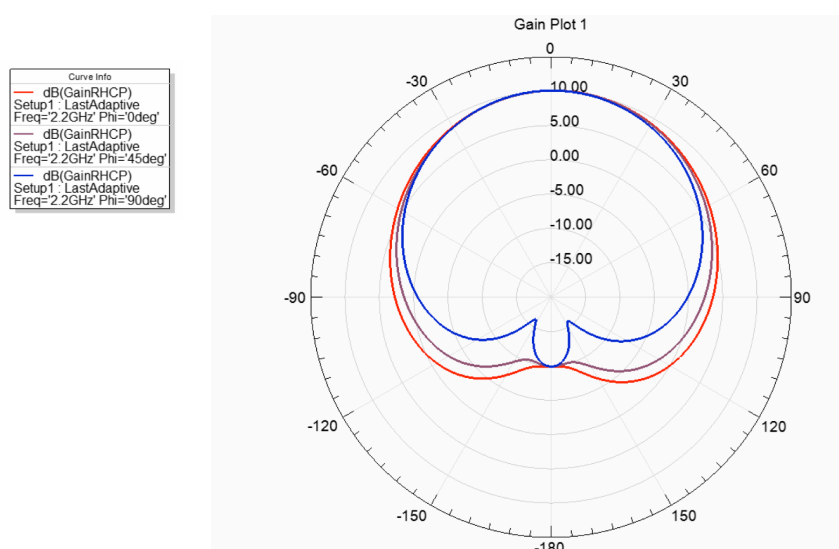


Tabla 9.7: Diagrama de radiación para una antena slot con stripline y postes cilíndricos sobre dos substratos Ro5880 de  $h=1.27\text{mm}$  y un factor de array 2x2

Las antenas slot diseñadas están configuradas para polarización lineal. En el caso de querer cumplir también con este aspecto en relación a las especificaciones comerciales, sería necesario configurar la antena para polarización circular. Existen diversas técnicas, como la implementación de un slot con forma de “T” que ayudaría a lograr la polarización circular.

Actualmente se están fabricando los diseños realizados, con lo que faltará la medida de las mismas que queda pendiente como línea futura.

En conclusión, se pueden cumplir las especificaciones requeridas al inicio del proyecto mediante antenas parche en configuraciones relativamente sencillas y los resultados obtenidos en tecnología slot son prometedores para llegar a alcanzar las especificaciones mencionadas si bien se necesitan trabajos futuros para completar estos diseños.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] R. B. Waterhouse, Microstrip patch antennas : a designer's guide / [edited by] R. B. Waterhouse. 2003.
- [2] I.Ederra, UPNA, "Tema 8: antenas de apertura"
- [3] Joseph N. Pelton, Scott Madry, Sergio Camacho Lara," Handbook of Satellite Applications"
- [4] "Harris Corporation Receives NSA and DAMA Certification for Falcon II Multiband/Multimission Radios"
- [5] "<http://amitec.co/home/antenna-positioner-transmission-line/rf-microwave-antenna>"
- [6] "<http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss/hfss-capabilities#5>"
- [7] D. M. Pozar, "A review of aperture coupled microstrip antennas: History, operation, development, and applications," Univ. Massachusetts Amherst, no. May, pp. 1–9, 1996.
- [8] Balduz, "Diseño de dos arrays de antenas en tecnología plana con polarización lineal y circular a 60 GHz," 2017.
- [9] A. Orbaiceta, "Diseño y caracterización de un array de antenas en tecnología plana en la banda de 8GHz con polarización circular" 2017
- [10] "<http://www.emtalk.com/mpacalc.php>"
- [11] "<http://www.emtalk.com/mscalc.php>"
- [12] "<https://www.eeweb.com/tools/symmetric-stripline-impedance>"