

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS MIMO MULTIBANDA**

**Autor: Jesús Pastor Martínez**

**Tutor: Bazil Taha Ahmed**

**JUNIO 2021**



# **IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS MIMO MULTIBANDA**

**AUTOR: Jesús Pastor Martínez**

**TUTOR: Bazil Taha Ahmed**



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

**Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones**

**Escuela Politécnica Superior**

**Universidad Autónoma de Madrid**

**Junio 2021**





# Resumen

Este Trabajo Fin de Grado (TFG), tiene como objetivo el diseño de antenas MIMO (multiple input multiple output) multibanda, analizaremos dos tipos de antenas, la primera de ellas una antena MIMO multibanda que trabaja en el rango de los tera Hertzios, por tanto esta miniaturizada, posee una radiación omnidireccional y que se caracteriza por ser también una antena SWB (Super-Wideband), la segunda antena que diseñaremos y para la cual también llevaremos a cabo su construcción y medida de antenas se trata de una antena MIMO microstrip multibanda, en este caso radia de forma direccional, trabaja en el rango de los GHz, y las bandas principales de nuestro interés estarán centradas en 2.445 GHz, 3.4 GHz y 5.4 GHz.

Los criterios de diseño de ambas antenas que nos permitan obtener unos buenos resultados y poder pasar a las siguientes fases serán, obtener un valor igual o inferior a -10dB para el parámetro  $S_{ii}$  (nos referiremos a él a lo largo de este documento como  $S_{11}$  puesto que para el análisis de puertos se obtiene el mismo resultado dada la simetría de los diseños), y un valor igual o inferior a -20 dB en los parámetros  $S_{ij}$  de la antena omnidireccional que trabaja en THz y de -27dB para la antena directiva.

Una vez establecidos los requisitos a cumplir para cada antena empezamos con la etapa de diseño, para ambas se seguirá el mismo procedimiento, comenzamos con el diseño de nuestra antena de un elemento, analizamos los resultados y comprobamos si cumplen los requisitos previamente establecidos, en caso de no hacerlo será necesario introducir una serie de modificaciones tanto en la propia antena como añadiendo elementos adicionales que permitan lograrlos tales como barreras, filtros u otros.

Cuando hayamos conseguido los objetivos para nuestra antena de un elemento, la duplicaremos para obtener nuestra antena MIMO de dos elementos y seguiremos de igual manera el proceso descrito en el párrafo anterior hasta conseguir no solo los objetivos si no mejorarlos lo máximo posible.

Por último, llevaremos a cabo la construcción de nuestra antena, lo cual es posible gracias al taller de la Escuela Politécnica Superior (EPS), para medir los resultados y compararlos con los obtenidos en la etapa de diseño.

## Palabras clave

Antena, parámetros S, MIMO, super banda ancha, multibanda, microstrip, antena en miniatura, parche, aislamiento, directividad, impedancia.

# Abstract

This Final Degree Project (TFG), aims to design MIMO multiband antennas (multiple input multiple output), we will analyse two types of antennas, the first is a multiband MIMO antenna that works in the range of tera Hertz, therefore this miniaturized, has an omnidirectional radiation and is also characterized by being a SWB antenna (Super-Wideband), The second antenna that we will design and for which we will also carry out its construction and measurement of antennas is a MIMO microstrip multiband antenna, in this case it radiates in a directional way, works in the GHz range, and the main bands of our interest will be centred in 2.445 GHz, 3.4 GHz, and 5.4 GHz.

The design criteria for both antennas that allow us to obtain good results and be able to move on to the next phases will be to obtain a value equal to or less than -10dB for the  $S_{ii}$  parameter (we will refer to it throughout this document as  $S_{11}$  since the same result is obtained for the port analysis given the symmetry of the designs), and a value equal to or less than -20 dB in the  $S_{ij}$  parameters of the omnidirectional antenna working at THz and -27dB for the directional antenna.

Once the requirements to be met for each antenna are established we start with the design stage, for both the same procedure will be followed, we start with the design of our single element antenna, we analyse the results and check if they meet the previously established requirements, if not it will be necessary to introduce a series of modifications both in the antenna itself and adding additional elements to achieve them such as barriers, filters or others.

When we have achieved the objectives for our one-element antenna, we will duplicate it to obtain our two-element MIMO antenna and we will follow in the same way the process described in the previous paragraph until we achieve not only the objectives but also improve them as much as possible.

Finally, we will carry out the construction of our antenna, which is possible thanks to the workshop of the Escuela Politécnica Superior (EPS), to measure the results and compare them with those obtained in the design stage.

## Keywords

Antenna, S-parameters, MIMO, super wideband, multiband, microstrip, miniature antenna, patch, isolation, directivity, impedance.

## *Agradecimientos*

*A mi familia, en especial a mi madre y mis abuelos, quienes han vivido conmigo cada paso de este largo viaje, sin excepción, gracias por la fuerza que me dais cada día, sin vosotros no podría estar donde estoy.*

*Junto a ti nada es imposible, gracias Laura, por dejarme formar parte de tu vida.*

*Una mención especial también merece mi tutor, Bazil, que tanto me ha ayudado a sacar adelante este proyecto, sin él, no solo habría sido más difícil si no más aburrido.*

*A mis amigos, grandes personas con los que he pasado momentos únicos tanto dentro como fuera de la universidad.*

*Nunca olvidare estos años.*

*Agradeceros a todos los que hayáis formado parte de esta etapa.*

*Jesús.*



## INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Conceptos teóricos de antenas.....	3
2.1	Visión global de las antenas.....	3
2.1.1	Impedancia de entrada y eficiencia de antena.....	3
2.1.2	Diagrama de radiación.....	5
2.1.3	Directividad.....	6
2.1.4	Polarización.....	8
2.2	Parámetros S.....	9
2.3	Antena de parche o microstrip.....	10
2.4	Tecnología SWB.....	11
2.5	Antenas MIMO.....	11
3	Criterios y diseño.....	13
3.1	Criterios de diseño.....	13
3.1.1	Antena MIMO SWB.....	13
3.1.2	Antena MIMO microstrip.....	13
3.2	Diseño de antenas.....	14
3.3	Antena MIMO SWB.....	14
3.3.1	Antena de un elemento.....	15
3.3.2	Diseño de antena MIMO de dos elementos.....	17
3.3.3	Mejora de diseño de antena MIMO de dos elementos.....	19
3.4	Antena MIMO multibanda.....	24
3.4.3	Antena básica de un elemento.....	25
3.4.4	Obtención de frecuencias requeridas.....	26
3.4.5	MIMO de dos elementos.....	28
3.4.6	MIMO DE 4 ELEMENTOS.....	31
4	IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS PRÁCTICOS.....	33
4.1	Antena MIMO microstrip multibanda.....	33
5	Conclusiones y trabajo futuro.....	39
	Referencias.....	41

## INDICE DE FIGURAS

<i>FIGURA 2.1 DIAGRAMA DE RADIACIÓN [2].</i> .....	5
<i>FIGURA 2.2 DIAGRAMA DE RADIACIÓN EN COORDENADAS POLARES.</i> .....	6
<i>FIGURA 2.3 DIAGRAMA DE RADIACIÓN ISOTRÓPICO, OMNIDIRECCIONAL Y DIRECCIONAL [2].</i> .....	6
<i>FIGURA 2.4 ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA DIRECTIVIDAD. [2].</i> .....	6
<i>FIGURA 2.5 DIAGRAMA DE RADIACIÓN REPRESENTATIVO DE DIRECTIVIDAD. [2].</i> .....	7
<i>FIGURA 2.6 IGUALACIÓN DE DIRECTIVIDAD CON SU VALOR MÁXIMO NORMALIZADO [2].</i> .....	7
<i>FIGURA 2.7 GANANCIA EXPRESADA EN FUNCIÓN DE LA EFICIENCIA Y LA DIRECTIVIDAD [2].</i> .....	7
<i>FIGURA 2.8 POLARIZACIÓN LINEAL, CIRCULAR Y ELÍPTICA [5].</i> .....	8
<i>FIGURA 2.9 ESQUEMA DE CUADRIPOLO [3].</i> .....	9
<i>FIGURA 2.10 CUADRIPOLO CON INTRODUCCIÓN A PARÁMETROS S.</i> .....	9
<i>FIGURA 2.11 MATRIZ Y DEFINICIÓN DE LA FÓRMULA DE PARÁMETROS S.</i> .....	9
<i>FIGURA 2.12 ALIMENTACIÓN POR SONDA COAXIAL Y POR LÍNEA MICROSTRIP[4].</i> .....	10
<i>FIGURA 3.1 CARA FRONTAL Y TRASERA DE ANTENA SWB DE UN ELEMENTO.</i> .....	15
<i>FIGURA 3.2 RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS <b>S<sub>11</sub></b> PARA LA ANTENA DE UN ELEMENTO.</i> .....	16
<i>FIGURA 3.3 ANTENA MIMO DE DOS ELEMENTOS CIRCULARES, CARA FRONTAL.</i> .....	17
<i>FIGURA 3.4 ANTENA MIMO DE DOS ELEMENTOS CIRCULARES, CARA POSTERIOR.</i> .....	18
<i>FIGURA 3.5 RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS <b>S<sub>11</sub></b> Y <b>S<sub>21</sub></b> DE LA ANTENA MIMO DE DOS ELEMENTOS CIRCULARES.</i> .....	19
<i>FIGURA 3.6 ANTENA MIMO DE DOS ELEMENTOS MODIFICADOS, CARA FRONTAL.</i> .....	19
<i>FIGURA 3.7 ANTENA MIMO DE DOS ELEMENTOS MODIFICADOS, CARA POSTERIOR.</i> .....	20
<i>FIGURA 3.8 RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS <b>S<sub>11</sub></b> Y <b>S<sub>21</sub></b> DE LA ANTENA MIMO DE DOS ELEMENTOS CIRCULARES.</i> .....	21
<i>FIGURA 3.9 ANTENA MIMO DE DOS ELEMENTOS MODIFICADOS, CARA POSTERIOR MODIFICADA.</i> .....	21
<i>FIGURA 3.10 RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS <b>S<sub>11</sub></b> Y <b>S<sub>21</sub></b> DE LA ANTENA MIMO DE DOS ELEMENTOS MODIFICADOS EN PARTE FRONTAL Y TRASERA.</i> .....	22
<i>FIGURA 3.11 FÓRMULA PARA EL CÁLCULO DEL PARÁMETRO ECC.</i> .....	23
<i>FIGURA 3.12 ECC DE LA ANTENA MIMO SWB DE DOS ELEMENTOS.</i> .....	23

<i>FIGURA 3.13 FÓRMULA PARA EL CÁLCULO DEL PARÁMETRO DIVERSITY GAIN.</i> .....	23
<i>FIGURA 3.14 DG DE LA ANTENA MIMO SWB DE DOS ELEMENTOS.</i> .....	24
<i>FIGURA 3.15 CÁLCULO DE ÉPSILON EFECTIVA [4]</i> .....	24
<i>FIGURA 3.16 CALCULO DE LA ANCHURA DE PARCHE [4].</i> .....	24
<i>FIGURA 3.17 FÓRMULAS NECESARIAS PARA EL CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA ANTENA DE PARCHE [4].</i> .....	25
<i>FIGURA 3.18 CARA FRONTAL Y TRASERA DE ANTENA MICROSTRIP MULTIBANDA DE UN ELEMENTO</i> .....	25
<i>FIGURA 3.19 RESULTADO DEL PARÁMETRO S11 PARA LA ANTENA MICROSTRIP MULTIBANDA DE UN ELEMENTO.</i> .....	26
<i>FIGURA 3.20 CARA FRONTAL Y TRASERA DE ANTENA MICROSTRIP MULTIBANDA DE UN ELEMENTO MODIFICADA.</i> .....	27
<i>FIGURA 3.21 RESULTADO DEL PARÁMETRO S11 PARA LA ANTENA MICROSTRIP MULTIBANDA MODIFICADA DE UN ELEMENTO.</i> .....	28
<i>FIGURA 3.22 CARA FRONTAL DE ANTENA MIMO MULTIBANDA DE DOS ELEMENTOS.</i> .....	29
<i>FIGURA 3.23 CARA POSTERIOR DE ANTENA MIMO MULTIBANDA DE DOS ELEMENTOS.</i> .....	29
<i>FIGURA 3.24 RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS S11 Y S21 PARA ANTENA MIMO MULTIBANDA DE DOS ELEMENTOS.</i> .....	30
<i>FIGURA 3.25 CARA FRONTAL Y POSTERIOR DE NUESTRA ANTENA MIMO MULTIBANDA DE CUATRO ELEMENTOS.</i> .....	31
<i>FIGURA 3.26 RESULTADO DE LOS PARÁMETROS S11, S21, S31 Y S41 DE LA ANTENA MIMO DE 4 ELEMENTOS.</i> .....	32
<i>FIGURA 4.1 CARA FRONTAL Y TRASERA DE ANTENA MICROSTRIP DE UN ELEMENTO.</i> .....	33
<i>FIGURA 4.2 RESULTADO EN SIMULACIÓN REAL DE LA ANTENA MICROSTRIP DE UN ELEMENTO.</i> .....	34
<i>FIGURA 4.3 CARA FRONTAL Y TRASERA DE ANTENA MIMO DE DOS ELEMENTOS.</i> .....	34
<i>FIGURA 4.4 RESULTADOS S21 DE LA ANTENA MIMO MULTIBANDA DE DOS ELEMENTOS.</i> .....	35
<i>FIGURA 4.5 RESULTADOS S21 DE LA ANTENA MIMO MULTIBANDA DE DOS ELEMENTOS.</i> .....	35
<i>FIGURA 4.6 ECC DE ANTENA MIMO MULTIBANDA DE DOS ELEMENTOS.</i> .....	36
<i>FIGURA 4.7 CARA FRONTAL Y TRASERA DE ANTENA MIMO MULTIBANDA DE CUATRO ELEMENTOS.</i> .....	37
<i>FIGURA 4.8 RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS S11, S21, S31 Y S41 PARA ANTENA MIMO MULTIBANDA DE CUATRO ELEMENTOS.</i> .....	37

## INDICE DE TABLAS

TABLA 3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA 3.2 DIMENSIONES ANTENA SWB UN ELEMENTO.....	16
TABLA 3.3 DIMENSIONES ANTENA MIMO SWB DE DOS ELEMENTOS CIRCULARES. ....	18
TABLA 3.4 DIMENSIONES DE ANTENA MIMO DE DOS ELEMENTOS MODIFICADOS. ....	20
TABLA 3.5 DIMENSIONES ANTENA MULTIBANDA BÁSICA.....	26
TABLA 3.6 DIMENSIONES DE MODIFICACIONES DE ANTENA MULTIBANDA DE UN ELEMENTO.....	28
TABLA 3.7 DIRECTIVIDAD DE ANTENA MULTIBANDA DE UN ELEMENTO.....	28
TABLA 3.8 DIMENSIONES ANTENA MIMO MULTIBANDA DE DOS ELEMENTOS.....	30
TABLA 3.9 VALORES DE PARÁMETROS S11, S21 Y ANCHO DE BANDA. ....	30
TABLA 3.10 DIRECTIVIDAD ANTENA MIMO MULTIBANDA DE DOS ELEMENTOS.....	31
TABLA 3.11 DIMENSIONES ANTENA MIMO MULTIBANDA DE CUATRO ELEMENTOS. ....	32
TABLA 3.12 DIRECTIVIDAD ANTENA MIMO MULTIBANDA DE CUATRO ELEMENTOS. ....	33

# 1 Introducción

---

## 1.1 Motivación

No sorprende a nadie ya en nuestros días la alta conexión que existe entre toda la sociedad, ya no solo entre personas, con el uso de antenas más tradicionales las cuales tienen presencia allá donde miremos (router de nuestra casa, en lo alto de edificios, más recientemente en puntos móviles como pueden ser autobuses etc) si no la creciente necesidad de querer controlar todo lo que podamos desde nuestro dispositivo móvil, a que nos referimos con esto, al auge de la domótica a un nivel más “casero” integrando antenas en cualquier dispositivo que se nos ocurra para poder controlarlo desde cualquier parte del mundo.

Es precisamente este auge y esta necesidad lo que ha impulsado a reinventarse y crear cada vez más tipos de antenas con distintas formas y que funcionen muy bien a un coste relativamente bajo para poder introducirlo en otros elementos sin que esta incorporación dispare el precio y puedan ser competitivos en su mercado.

Pero las telecomunicaciones no son procesos ideales, es necesario tener en cuenta muchos factores y obtener unos buenos resultados en la etapa de diseño para que pese a las peores circunstancias las antenas puedan seguir siendo funcionales.

Como solución a esto y en relación con las necesidades de las telecomunicaciones actuales es donde entran en juego las tecnologías MIMO, capaces de mediante un array de antenas conseguir unos resultados mucho mejores sacrificando cierto tamaño extra en la misma, y la tecnología SWB que permite transmitir una gran cantidad de datos en un tiempo muy breve y sin prácticamente pérdidas.

## 1.2 Objetivos

Los objetivos que abordaremos a lo largo de este TFG consisten principalmente en el diseño, modelaje y posterior construcción y medida de resultados de dos antenas MIMO de tipo microstrip.

Para ambas el punto de partida será una antena de un elemento y a partir del cual en base al cumplimiento de los requisitos marcados posteriormente se irá modificando y optimizando hasta llegar a su fase final de antena MIMO.

La primera de ellas (la cual por medios técnicos no ha podido construirse dadas las limitaciones de las máquinas de impresión del taller de la EPS) al tratarse de una antena SWB ha de cumplir los requisitos de  $S_{ii}$  menor o igual a -10dB para el espectro de 0.2 a 10 [THz] y con respecto a los parámetros  $S_{ij}$  menor o igual a -20dB para el espectro de frecuencias comentado anteriormente.

Para la segunda antena, buscamos que tenga unas bandas de trabajo centradas en las frecuencias 2.445, 3.445 y 5.5 (GHz), en las cuales los parámetros  $S_{ii}$  sean inferiores a -10dB y los parámetros  $S_{ij}$  sean iguales o inferiores a -27dB. Una vez cumplidos dichos requisitos y tras las modificaciones necesarias obtendremos nuestra MIMO de cuatro

elementos la cual importaremos mediante ficheros gerbers y la herramienta ADS para poder construirla, medirla y comparar los resultados.

### **1.3 Organización de la memoria**

La memoria se organiza de la siguiente manera:

- **Introducción.**

Este apartado incluye la motivación que ha impulsado la realización del TFG y los objetivos que en él esperan lograrse, así como la organización de este documento.

- **Conceptos teóricos de antenas.**

Incluye un breve resumen acerca de los aspectos principales de las antenas, así como su forma de trabajo y los tipos de antenas que diseñaremos.

- **Criterios y diseño.**

Estableceremos una serie de criterios necesarios para poder continuar el proceso de diseño de nuestras antenas, dicho proceso ha sido documentado con una serie de imágenes y resultados donde se detallan las modificaciones que han sido necesarias para alcanzar los objetivos propuestos.

- **Implementación y resultados prácticos**

Una vez diseñada nuestra antena MIMO multibanda de cuatro elementos pasamos a su construcción y a la medida de resultados, al igual que en el punto anterior se ha documentado con diversas imágenes.

- **Conclusión y trabajo futuro.**

Discutiremos acerca del trabajo realizado, relacionando los resultados obtenidos en la etapa de diseño con los obtenidos en la etapa de construcción y medida, además de una serie de propuestas para los siguientes trabajos que se realicen siguiendo la temática que hemos abordado.

# 2 Conceptos teóricos de antenas

## 2.1 Visión global de las antenas

Según el estándar IEEE “una antena es aquella parte de un sistema de comunicaciones que está diseñada para radiar o recibir ondas electromagnéticas” [1]

La parte más importante de una antena es la gestión que realiza de la energía que recibe, según la definición vista anteriormente una antena es capaz de transmitir información a partir de la potencia que se le suministra por un cable o conector (línea de transmisión) para transformarla en una onda electromagnética y enviarla por el espacio libre.

Cuanto mejor sea esta gestión de la potencia que alimenta nuestra antena, más energía será capaz de radiar, y mejores resultados podremos obtener, pero no solo importa la directividad, otros parámetros, de los cuales hablaremos más adelante en los siguientes apartados, como la impedancia, la ganancia, la polarización y el ancho de banda juegan un papel crucial a la hora de determinar la utilidad específica que tendrá cada antena en un encuadre concreto.

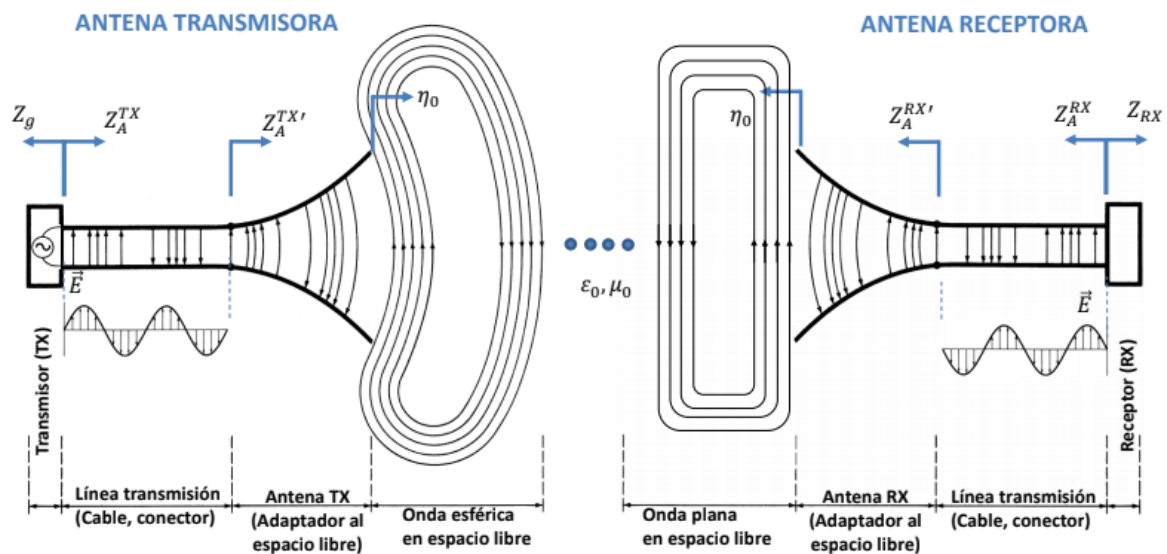


Ilustración 2-1 Esquema transmisor receptor [4].

### 2.1.1 Impedancia de entrada y eficiencia de antena

Tal y como hemos introducido en el punto 2.1, las antenas para funcionar necesitan ser alimentadas por una cierta tensión, dicha energía llega a ellas mediante una línea de transmisión.

En la mayoría de las ocasiones, la fuente de energía que alimenta una antena y el

punto de alimentación de la misma no están próximos en el espacio, por tanto, es necesario tener en consideración la longitud de la línea que alimenta la antena, la atenuación que se produce y su impedancia característica. [2]

La impedancia de entrada ( $Z_e$ ) está formada por la suma de una parte real (R) y una parte imaginaria X, donde ambas depende de la frecuencia.

Ahora hablaremos de la eficiencia de las antenas, atendiendo a la definición clásica de potencia:

$$P = I^2 * R$$

La potencia radiada por nuestra antena atenderá a la fórmula anterior pero aplicada a cada nuestro caso particular por tanto quedaría de la siguiente manera:

$$Pradiada = I^2 * Ze$$

Pero las antenas no son componentes ideales en los que no existan pérdidas, y están deben ser consideradas a la hora de analizar la eficiencia de la antena, por tanto, daremos una segunda definición de potencia, la potencia recibida por la antena que sí que tendrá en consideración las pérdidas:

$$Precibida = Pradiada + Ppérdidas$$

Cuando nuestra antena (en su parte imaginaria) no posee ningún tipo de reactividad a la frecuencia hablaremos entonces de antenas reactivas para las cuales despreciamos dicha parte y únicamente consideramos las resistencias de antena y de pérdidas, de esa manera, la eficiencia de nuestra antena queda de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{pérdidas}} = \frac{R_{real}}{R_{real} + R_{entrada}}$$

Por último, uno de los conceptos más importantes que no podemos dejar sin mencionar es el coeficiente de adaptación, un parámetro que nos indica la cantidad de potencia que le está llegando realmente a nuestra antena. Se consigue haciendo que la impedancia de entrada de la antena se asemeje lo máximo posible a la del generador conjugada.

De forma ideal, para transferencias de potencia máximas tiene un valor 0, y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\Gamma_{ant} = Z_{ant} - Z_{gen} * Z_{ant} + Z_{gen}$$

$Z_{ant}$  hace referencia a la impedancia de nuestra antena y  $Z_{gen}$  hace referencia a la impedancia del generador al que se conecta.



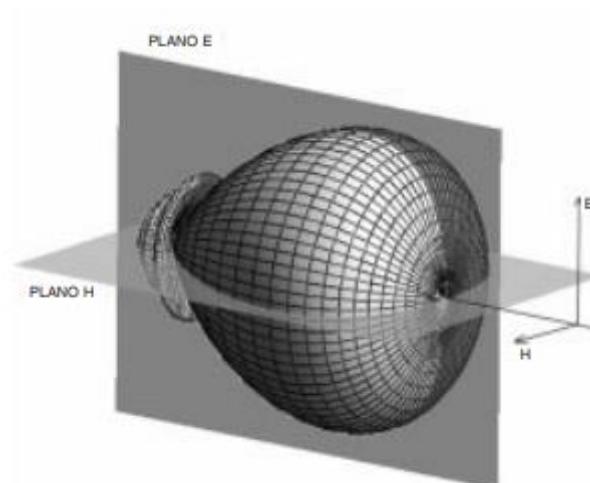
## 2.1.2 Diagrama de radiación

En el grueso de casos emplea el sistema de coordenadas esféricas para representar de forma gráfica la forma en la que está radiando nuestra antena. [2]

En dichas representaciones, que son tan variadas como los distintos puntos en el espacio desde los que se observe la misma, y su análisis se basa en el estudio de dos planos fundamentales:

- Plano E: La dirección de máxima radiación de nuestra antena y el campo eléctrico en esa misma dirección.
- Plano H: La dirección de máxima radiación de nuestra antena y el campo magnético en esa misma dirección.

Al ser perpendiculares entre sí, dichos planos, los puntos donde se cruzan crean una recta que señala la dirección de máxima radiación del conjunto de la antena que estamos analizando.



*Figura 2.1 Diagrama de radiación [2].*

Tal y como comentábamos anteriormente, los puntos de observación de estos diagramas pueden ser muy diversos, por lo que es necesario establecer unos criterios de evaluación para unas determinadas coordenadas que permitan analizar de forma objetiva nuestra antena.

Dichas coordenadas nos permitirán analizar bidimensionalmente la radiación de nuestra antena en los puntos de interés empleando unos diagramas conocidos como diagramas de radiación en coordenadas polares.

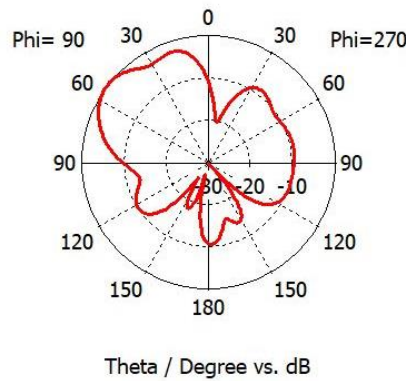


Figura 2.2 Diagrama de radiación en coordenadas polares.

En función de las distintas formas de los diagramas de radiación podemos diferenciar tres tipos principales de antenas:

- Isótropas: Son antenas ideales, aquellas que radian con la misma intensidad en todo el espacio.
- Omnidireccionales: Son aquellas que radian siguiendo una simetría de revolución entorno a un único eje.
- Directivas: Son aquellas en las que su intensidad de radiación es predominante en una determinada dirección con respecto al resto.

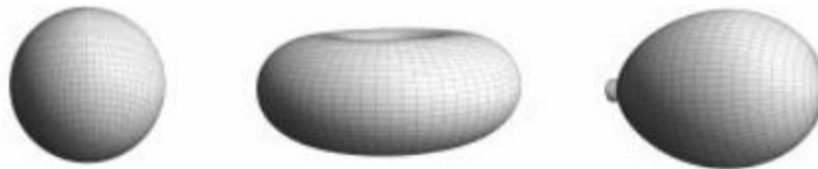


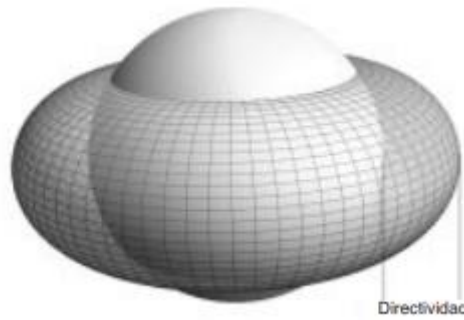
Figura 2.3 Diagrama de radiación isotrópico, omnidireccional y direccional [2].

### 2.1.3 Directividad

Podemos definir la directividad de una antena como el cociente entre la densidad de potencia que una antena es capaz de radiar en una dirección determinada y a una cierta distancia, y el mismo parámetro de una antena isótropa, es decir, la directividad nos permite medir cuanto se aleja la radiación real de nuestra antena del caso ideal.

$$D(\theta, \phi) = \frac{\mathcal{P}(\theta, \phi)}{P_r / (4\pi r^2)}$$

Figura 2.4 Ecuación para el cálculo de la directividad. [2].



*Figura 2.5 Diagrama de radiación representativo de directividad. [2].*

La directividad también puede obtenerse cuando conocemos el valor máximo de la misma, solo tendríamos que hacer el producto de este valor con el diagrama de radiación normalizado:

$$D(\theta, \phi) = D_r(\theta, \phi)$$

*Figura 2.6 Igualación de directividad con su valor máximo normalizado [2].*

No podemos acabar este punto sin definir una constante que está directamente ligada con la directividad, la ganancia.

Para obtener su valor, procederíamos de igual manera que para la directividad, pero en este caso no tendríamos que dividirla por la potencia que radiaría la antena si fuese ideal si no con la potencia que recibe nuestra antena, por tanto, la ganancia es una forma de cuantificar las pérdidas.

Además, es necesario reseñar puesto que lo veremos más adelante que a frecuencias de trabajo muy elevadas las pérdidas son prácticamente nulas.

$$G(\theta, \phi) = \frac{D(\theta, \phi)}{\frac{P_{entregada}}{4\pi r^2}} = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} \frac{D(\theta, \phi)}{\frac{P_{radiada}}{4\pi r^2}} = \eta_i D(\theta, \phi)$$

*Figura 2.7 Ganancia expresada en función de la eficiencia y la directividad [2].*

## 2.1.4 Polarización

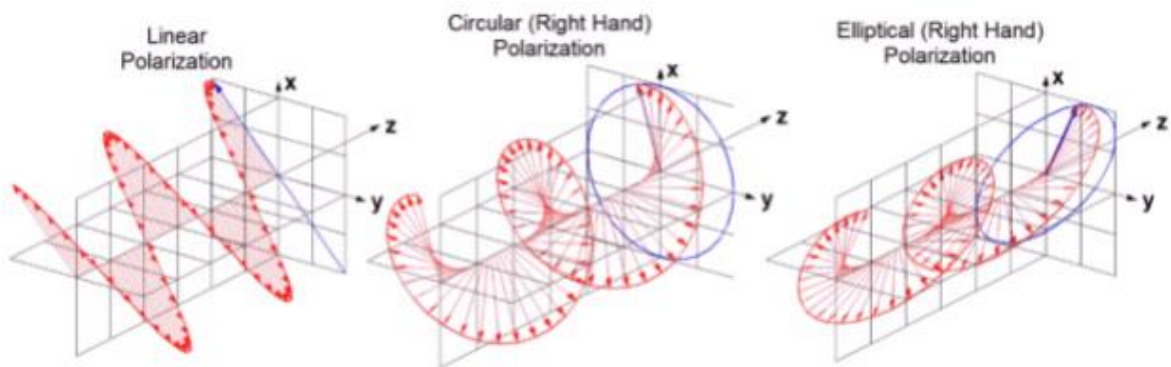
Para definir la polarización deberemos tener en cuenta si nos referimos a la polarización de una antena, o de forma más específica, a la polarización de una onda.

Para el caso de referirnos a la primera de ellas, la polarización en una determinada dirección es la de la propia onda que está radiando nuestra antena en dicha dirección, lo que nos lleva a preguntarnos por la polarización de dicha onda.

En este caso es más complejo ya que para saber la polarización de una onda tendremos que fijar el extremo del vector que define al campo eléctrico de forma perpendicular a la dirección en la que se propague la onda y observar que forma se construye al variar el tiempo. [5][2]

Dentro de estas formas que se construyen al pasar el tiempo podemos diferenciar tres principales:

- Elíptica: Suele producirse en aquellas ondas generadas a partir de variaciones temporales con forma sinusoidal.
- Circular: Aparece cuando las componentes de análisis tienen idéntica amplitud y sus fases aparecen desplazadas una respecto a otra en  $\pi/2$  o  $3\pi/2$  radianes.
- Lineal: Se produce cuando no existe diferencia entre las fases de las componentes del campo eléctrico o cuando la resta de ambas da una diferencia en función de números enteros de  $\pi$ .



*Figura 2.8 Polarización lineal, circular y elíptica [5].*

A su vez, estos tres tipos de polarizaciones podemos clasificarlos en copolares y contrapolares donde estas son la deseada y la indeseada respectivamente.

## 2.2 Parámetros S

Los parámetros S o de dispersión (Scattering), son un valor fundamental a la hora de evaluar el funcionamiento de cualquier antena. Hacen referencia a la relación que existe entre las potencias reflejadas e incidentes que actúan sobre los terminales o puertos de una antena (ya que es una relación de potencias, se miden en dB).

Las potencias definidas anteriormente que actúan sobre nuestros terminales las definiremos como  $a_i$  y  $b_i$  para las potencias incidente y reflejada respectivamente. En este caso veremos su efecto sobre el siguiente esquema que consiste en una red de dos terminales (puede aplicarse a cualquier red de N terminales) [3].

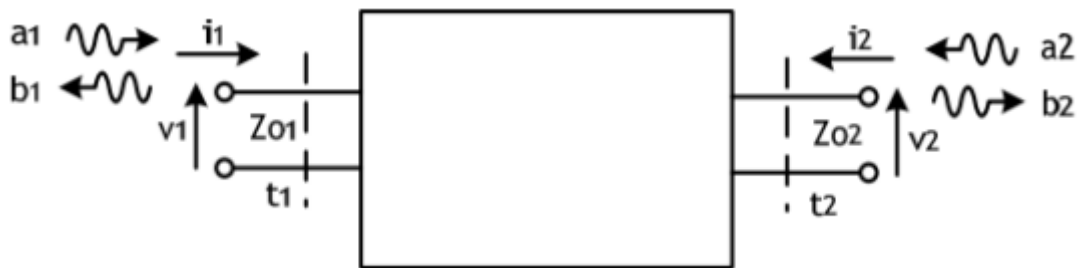


Figura 2.9 Esquema de cuadripolo [3].

El anterior diseño puede simplificarse al siguiente que es equivalente y de donde podemos deducir de forma sencilla las ecuaciones de los parámetros S que realmente deseamos.

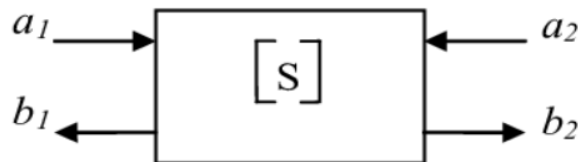


Figura 2.10 Cuadripolo con introducción a parámetros S.

Ahora si despejando la siguiente matriz obtenemos de forma directa la relación que existe para cada parámetro S con las potencias incidente y reflejada:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

$$S_{ji} = \left( \frac{b_j}{a_i} \right)_{a_k=0, \forall k \neq i}$$

Figura 2.11 Matriz y definición de la fórmula de parámetros S.

Como última condición dentro de este análisis tenemos que decir que, para poder aplicar la fórmula de obtención de los parámetros de dispersión, es necesario que  $a_i$  tenga un valor igual a 0, para anular la onda incidente del resto de terminales para que estos no afecten al que estamos calculando en ese momento.

Tabla 2.1 Definición de parámetros S.

Parámetro	Definición	Descripción
S11	Coefficiente de reflexión a la entrada.	Potencia reflejada sobre incidente en el puerto 1.
S12	Coefficiente de transmisión en forma inversa.	Potencia reflejada en el puerto 1 para la incidente desde el puerto 2.
S22	Coefficiente de transmisión en forma directa.	Potencia reflejada en el puerto 2 sobre la incidente del mismo puerto.
S21	Coefficiente de reflexión a la salida.	Potencia reflejada en el puerto 2 sobre la incidente desde el puerto 1.

## 2.3 Antena de parche o microstrip

Las antenas de parche o microstrip llevan el mismo nombre de la tecnología mediante la cual radian energía, consiste en una línea fina de metal que es colocado sobre un material dieléctrico (sustrato), el cual a su vez está situado sobre el plano de masa de dicha antena [4].

Los espesores empleados para dichas antenas están en el rango de  $0.005$  a  $0.2 \lambda_0$

En general las antenas de parche son antenas con un ancho de banda muy pequeño, pero con una gran directividad, pueden tener formas tan diversas como el diseñador quiera, siendo las más habituales las de parche cuadrado, rectangular, circular y también elíptico, triangular o de anillo.

Las formas más habituales de llevar la energía a una antena microstrip son las siguientes:

- Alimentación por sonda coaxial y mediante línea microstrip.

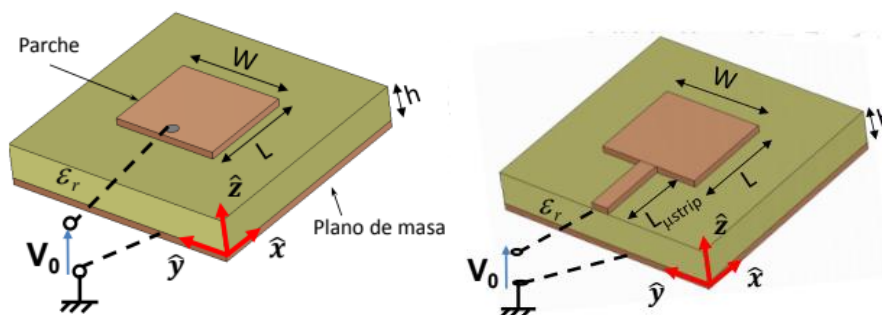


Figura 2.12 Alimentación por sonda coaxial y por línea microstrip[4].

Ambas tienen un ancho de banda inferior a 2% y la alimentación mediante sonda coaxial presenta dificultades cuando no encontramos con sustratos más gruesos de  $0.2 \lambda_0$ .

## **2.4 Tecnología SWB**

En la actualidad nos encontramos ante la creciente demanda de velocidades cada vez más rápidas, así como un mayor ancho de banda de forma simultánea y todo ello por supuesto sin perder el componente inalámbrico.

Es de esta necesidad de la que surge la tecnología SWB (Super wide-band), pero primero pongámonos un poco en contexto, la antecesora de la tecnología SWB, es la tecnología UWB (ultra wide band), la cual estaba revolucionando el mundo tecnológico gracias a su modo de operación multibanda, alta velocidad a la hora de la transmisión de datos y todo ello sumado a una cantidad de energía mínima para poder operar.

Para que una antena pueda considerarse de tipo UWB propiamente dicho necesita proporcionar como mínimo un ancho de banda de 500 MHz o un ancho de banda relativo superior al 20%. [6].

Uno de los principales inconvenientes de esta tecnología es su falta de capacidad a la hora de transmitir potencia en las señales, lo que provoca que su uso quede restringido únicamente a zonas interiores o de un realmente corto alcance, y es precisamente esta desventaja la que se ve aprovechada por la tecnología SWB.

La tecnología Super Wide-band, mejora mucho las tasas de la tecnología UWB tanto de ancho de banda (puesto que como veremos a continuación en este documento se consiguen tasas de ancho de banda prácticamente tan grandes como espectro de frecuencias sea capaz de radiar nuestra antena), como en velocidades de transmisión.

Por último, otras ventajas adicionales del SWB es que no posee un rango definido de frecuencias para el que trabajar y sus pérdidas son prácticamente nulas.

## **2.5 Antenas MIMO**

Las antenas MIMO que emplean la tecnología que les da nombre (multiple-input multiple-output), son aquellas que nos permiten aumentar muy notablemente la tasa de transmisión de una antena, así como su alcance efectivo incluso para receptores dinámicos [7].

Para poder utilizar esta tecnología es necesario la actuación de varias entradas (y salidas) en un mismo canal de comunicación, llevando a cabo esta tarea mediante la multiplexación y diversificación espaciales.

La importancia de la multiplexación se ve reflejada en la capacidad de aumentar las tasas de transmisión de nuestro sistema de telecomunicaciones ya que nos dota de la posibilidad de, sobre una misma frecuencia, enviar distintos flujos de información.

La diversificación por otro lado es lo que le da fiabilidad y un mayor alcance a nuestro sistema, ampliando el número de antenas que están emitiendo y recibiendo datos.

Tal es su importancia que los sistemas MIMO están presentes en múltiples estándares actuales y en desarrollo (IEEE 802.16 Wimax, IEEE 802.20, 3GPP, IEEE 802.11n, 4G)[8].



## 3 Criterios y diseño

---

### 3.1 Criterios de diseño

A lo largo de todo este apartado a partir de ahora, por simplicidad, nos referiremos en los resultados obtenidos en los parámetros  $S_{ii}$  y  $S_{ij}$  como  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  y en el caso de la antena multibanda también haremos referencia a  $S_{31}$ ,  $S_{41}$ , puesto que todas las antenas realizadas guardan una simetría total y por tanto unos resultados idénticos para cada uno de sus puertos.

#### 3.1.1 Antena MIMO SWB

Recordemos que las antenas SWB se caracterizan por un ancho de banda con una relación fractal de 1:10 con respecto a la frecuencia [6].

Los requisitos para el correcto diseño de esta antena, que nos permitiesen pasar a las siguientes fases del diseño (permitir replicarla y convertirla en MIMO), han sido los siguientes:

- Para nuestra antena de un elemento, conseguir una adaptación a la frecuencia de resonancia tal que sus parámetros de scattering en referencia al coeficiente de reflexión en el puerto de entrada tuviesen un valor igual o inferior a -10 dB.
- Una vez logrado el punto anterior, realizar una duplicación de la antena para poder aplicar la tecnología MIMO, en este punto además de ser necesario seguir cumpliendo con el punto anterior, añadimos la condición indispensable de que las ganancias de tensión directa e inversa, referida a la relación entre los puertos de las antenas debe tener un valor igual o inferior a -20 dB.

El objetivo además de no solo cumplir los requisitos anteriores, si no, mejorarlos lo máximo junto con el interés de obtener a su vez el mayor ancho de banda que fuese posible dentro del espectro en el que estamos simulando han sido los motivos de los distintos cambios y modificaciones en las antenas a lo largo de nuestro proceso de diseño.

#### 3.1.2 Antena MIMO microstrip

Recordemos que estamos buscando una antena funcional acorde a los protocolos WiMax y Wlan, por lo tanto, necesitamos una antena multibanda que trabaje correctamente para 2.445 GHz, 3.5 GHz y 5.5 GHz.

Los requisitos para el correcto diseño de esta antena, que nos permitiesen pasar a las siguientes fases del diseño (permitir replicarla y convertirla en MIMO), han sido los siguientes:

- Para nuestra antena de un elemento, conseguir una adaptación a la frecuencia de resonancia tal que sus parámetros de scattering en referencia al coeficiente de reflexión en el puerto de entrada ( $S_{ii}$ ) tuviesen un valor igual o inferior a -10 dB.

- Una vez conseguido el punto anterior para la frecuencia de referencia, procedemos a añadir una serie de elementos radiantes en la parte superior de la antena para obtener el resto de frecuencias de interés, las cuales también deben cumplir el primer criterio.
- Cumpliendo con los dos primeros criterios procedemos a aplicar la tecnología MIMO, puesto que son antenas con una gran directividad, para poder considerarlas realmente funcionales, las ganancias de tensión directa e inversa de la antena ( $S_{ij}S_{ji}$ ) deben tener un valor igual o inferior a -27 dB.

El objetivo además de cumplir los requisitos anteriores será, mejorarlos lo máximo posible.

### 3.2 Diseño de antenas

Dentro de esta sección hablaremos de como se ha llevado a cabo todo el proceso de diseño de ambas antenas.

Ha sido un proceso incremental, donde desde la antena en su forma más básica se han ido sumando modificaciones de distinta índole, siempre cumpliendo los criterios de diseño, hasta alcanzar el objetivo de lograr antenas funcionales y competitivas.

Para este proceso se ha empleado la herramienta CST para la parte relacionada con el modelaje de las antenas, ajustes de impedancias de entrada, simulaciones e interpretación de resultados.

A continuación, se muestran dos tablas que especifican las características, así como las medidas de los materiales que se han utilizado para el modelaje de estas antenas.

*Tabla 3.1 Características de los materiales.*

Parámetro	Antena SWB	Antena microstrip
Espesor del sustrato: E	16 ( $\mu\text{m}$ )	1.6 (mm)
Espesor del cobre: Cu	5 ( $\mu\text{m}$ )	0.03(mm)
Cte. dieléctrica: $\epsilon_r$	4.4	4.4
Permeabilidad: $\mu_r$	1	1

### 3.3 Antena MIMO SWB

Para conseguir nuestra antena MIMO de tecnología SWB partiremos de una antena plana o impresa, que tendrá una forma circular en su elemento radiante. Dicho elemento radiante será alimentado utilizando un taper con la zona de entrada al elemento más estrecha que la base de la propia alimentación (conectada a la energía) para poder reducir así la impedancia de entrada.

En nuestro caso, el rango de frecuencias sobre el que queremos trabajar se encuentra en la banda de [0-10] THz, por lo tanto, para frecuencias tan elevadas y mediante la fórmula

de longitud de onda que ya conocemos,  $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ , siendo  $f$  nuestra frecuencia de diseño en THz, vemos que las dimensiones de nuestra antena serán  $\mu\text{m}$ .

Como comentábamos anteriormente, nos interesa que nuestra antena sea operativa en el rango de los 0 a los 10 THz, para ello necesitamos saber el radio necesario que tendrá nuestro elemento radiante para tener su inicio (zona donde el coeficiente de reflexión sea igual o inferior a -10 dB).

Para realizar los cálculos y obtener los valores de cada elemento que compone nuestra antena, hemos recurrido a la siguiente fórmula utilizándola en conjunto con otras mediante los programas LineCalc y Matlab.

$$(2R + GAP) * 4 * 1.06 = \lambda_0$$

### 3.3.1 Antena de un elemento

Este primer diseño de nuestra antena circular en miniatura es el primero y original, el cual hemos construido basándonos en las medidas obtenidas en la fórmula anterior.

Se ha colocado la antena sobre un sustrato lo más ajustado posible en relación al tamaño de la misma ya que este tipo de antenas miniaturizadas tienen como objetivo su colocación en dispositivos integrados a nivel circuital para transmitir grandes flujos de datos de forma muy rápida y a unas frecuencias tan elevadas que los cables tradicionales no son capaces de soportar.

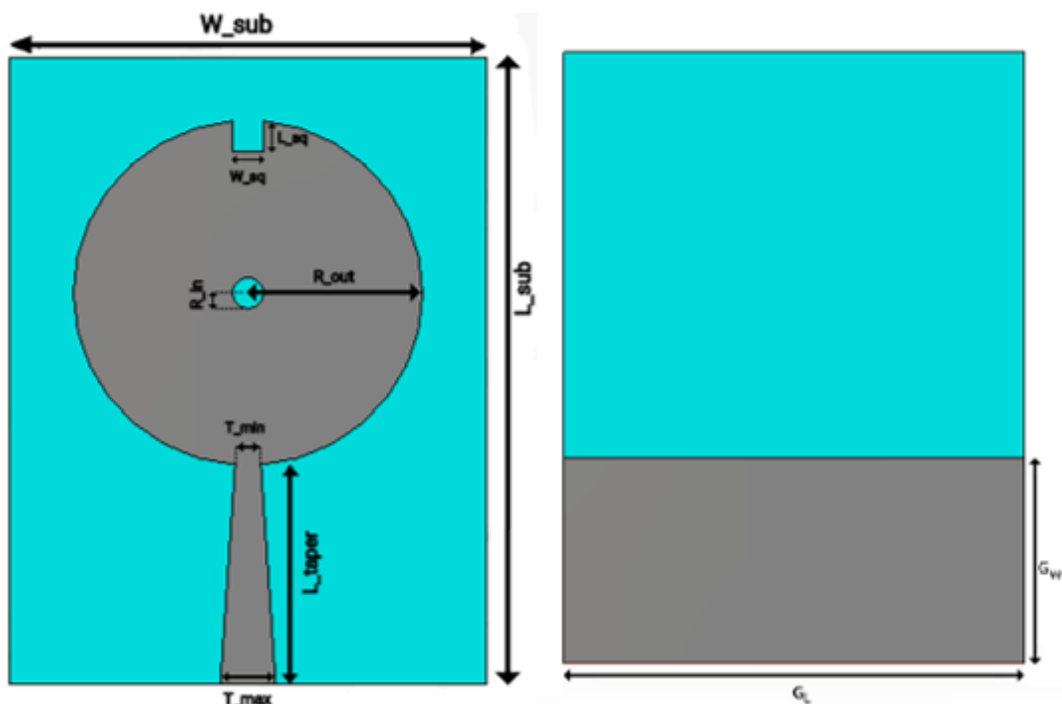


Figura 3.1 Cara frontal y trasera de antena SWB de un elemento

Tabla 3.2 Dimensiones antena SWB un elemento.

Parameter list	Value ( $\mu\text{m}$ )
<b>W_sub</b>	<b>300</b>
<b>L_sub</b>	<b>400</b>
<b>R_out</b>	<b>110</b>
<b>R_in</b>	<b>10</b>
<b>W_sq</b>	<b>20</b>
<b>L_sq</b>	<b>20</b>
<b>L_taper</b>	<b>142</b>
<b>T_max</b>	<b>35</b>
<b>T_min</b>	<b>16.5</b>
<b>Gw</b>	<b>134</b>
<b>GL</b>	<b>300</b>
<b>GAP</b>	<b>8</b>

Como podemos observar en la siguiente imagen, nos encontramos unos resultados prácticamente inmejorables para ser nuestra primera aproximación a la hora de diseñar esta antena, tal y como comentamos en los apartados de “criterios de diseño” y como se puede apreciar en la imagen, nuestra antena cumple con el requisito de tener un parámetro  $S_{11}$  menor a -10 dB y en ningún momento hasta llegar a las 10THz llega a retornar a una zona de peligro muy próxima a -10 dB que cortase nuestro ancho de banda.

Además, el ancho de banda empieza a ser efectivo a partir de 0.3 THz, lo cual encaja con nuestros cálculos para ese tamaño de radio de la zona radiante de la antena.

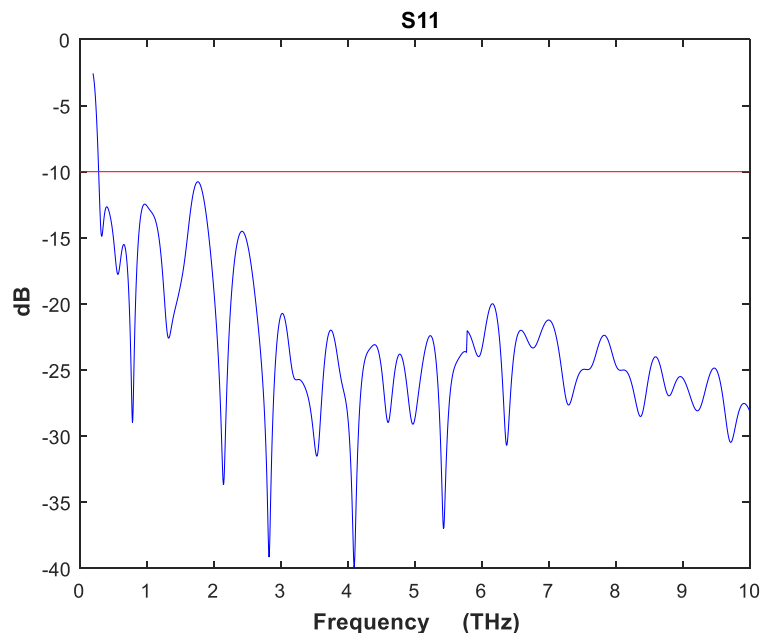


Figura 3.2 Resultados de los parámetros  $S_{11}$  para la antena de un elemento.

Con todos los criterios de diseño cumplidos correctamente para nuestra antena de un elemento pasamos a diseñar la antena MIMO de dos elementos.

### 3.3.2 Diseño de antena MIMO de dos elementos

A continuación, tenemos la primera aproximación realizada de cara a conseguir nuestra antena MIMO de dos elementos, tal y como se puede apreciar en la imagen, utilizando una de las propiedades de la herramienta principal utilizada para el diseño de éstas (CST), hemos realizado un mirror de nuestra antena original de un solo elemento.

Una vez obtenidas las dos antenas era necesario aumentar el aislamiento entre ellas para evitar que la radiación de una afectase a la otra y viceversa.

Para conseguir mejorar ese aislamiento lo primero que hicimos fue alejarlas en direcciones opuestas, concretamente  $20\ \mu\text{m}$  en cada dirección, lo que hace un aumento total de  $40\ \mu\text{m}$  en el ancho global de la antena.

Adicionalmente a esta separación, se ha añadido una barrera vertical en la cara delantera que tiene forma de I a nivel global y forma de L tanto en la parte superior como como inferior de las caras internas de cada antena.

Cabe resaltar las modificaciones en la parte trasera de nuestra antena de dos elementos, donde la separación entre los planos de masa pasa a ser algo necesario, así como la colocación de una barrera vertical y de dos barreras adicionales en forma de “L” que aumentan más aun el aislamiento.

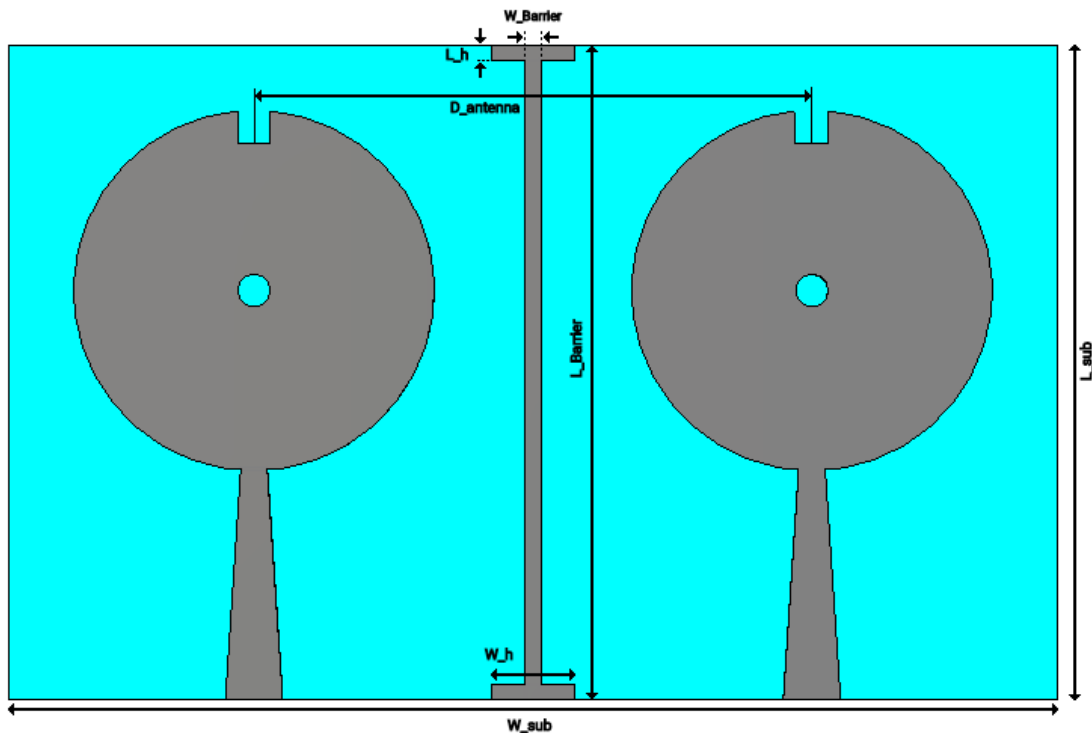


Figura 3.3 Antena MIMO de dos elementos circulares, cara frontal.

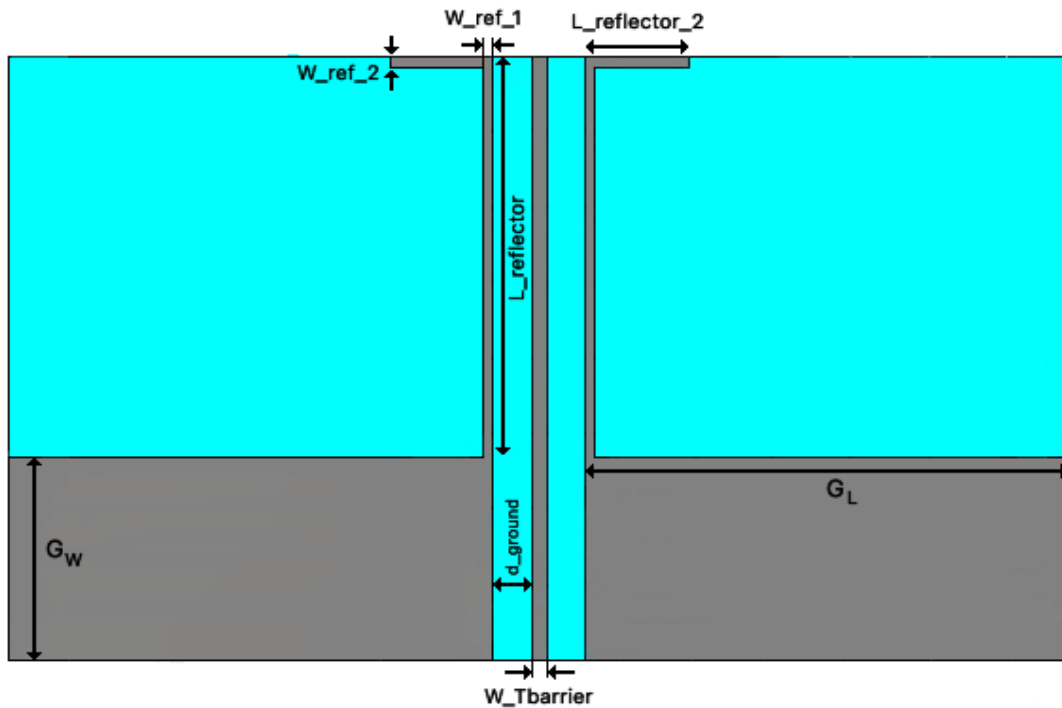
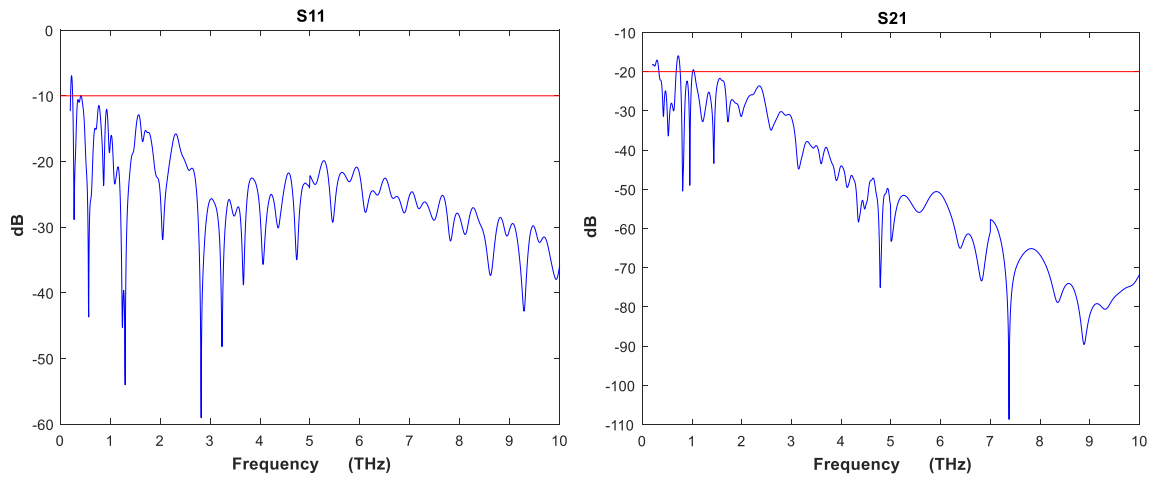


Figura 3.4 Antena MIMO de dos elementos circulares, cara posterior.

Tabla 3.3 Dimensiones antena MIMO SWB de dos elementos circulares.

Parameter List	Value ( $\mu\text{m}$ )
<b>W_sub</b>	<b>640</b>
<b>L_sub</b>	<b>400</b>
<b>L_Barrier</b>	<b>400</b>
<b>W_Barrier</b>	<b>10</b>
<b>D_antennas</b>	<b>340</b>
<b>W_h</b>	<b>50</b>
<b>L_h</b>	<b>10</b>
<b>GL</b>	<b>300</b>
<b>GW</b>	<b>134</b>
<b>W_barr_1</b>	<b>6</b>
<b>W_barr_2</b>	<b>8</b>
<b>L_barr_1</b>	<b>268</b>
<b>L_barr_2</b>	<b>64</b>
<b>D_ground</b>	<b>25</b>
<b>W_Tbarrier</b>	<b>10</b>

Pese a estas modificaciones y como se puede observar en la siguiente imagen referente a los parámetros  $S_{11}$ , la antena ha sufrido un empeoramiento, pasando ahora no solo a estar más cerca de la zona de riesgo de -10dB si no que llega a tocarla en 0.42 THz acortando así el ancho de banda.



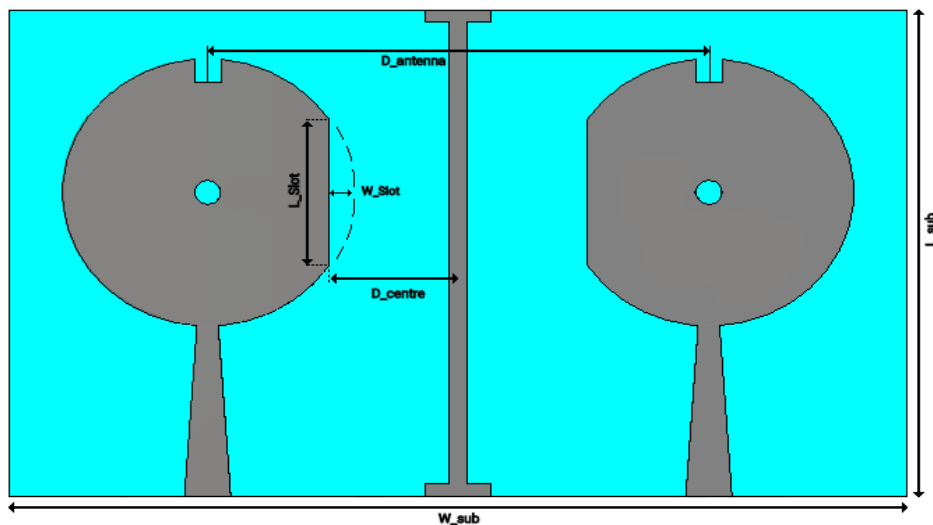
*Figura 3.5 Resultados de los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  de la antena MIMO de dos elementos circulares.*

Además del ligero acortamiento en el ancho de banda reflejado en los parámetros  $S_{11}$ , tenemos que comentar el acortamiento también en el ancho de banda que se produce en los  $S_{21}$ , donde realmente nuestra banda puede considerarse como tal a partir de 1 THz.

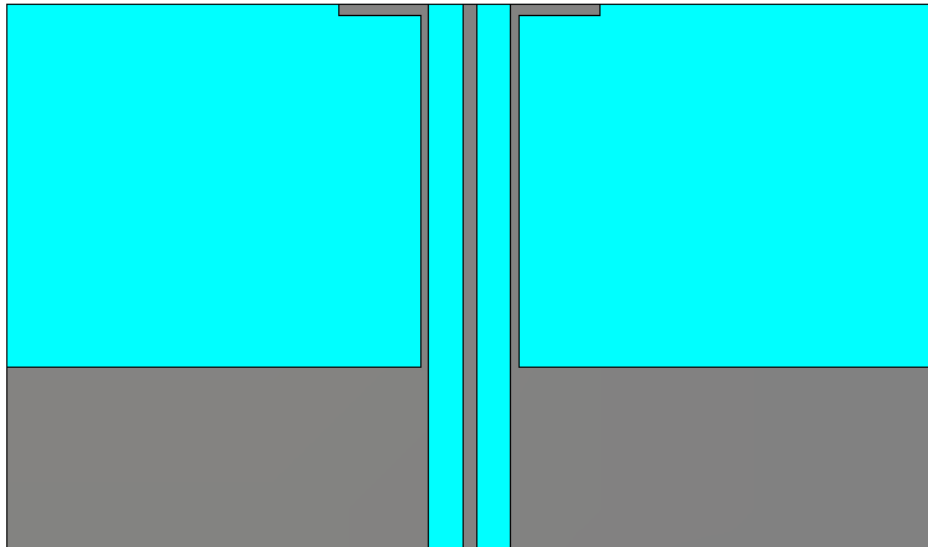
### 3.3.3 Mejora de diseño de antena MIMO de dos elementos.

Si bien es cierto que nuestra primera antena MIMO de dos elementos que describíamos en el apartado anterior cumplía los criterios de diseño especificados, hemos decidido introducir una serie de mejoras que realmente convirtiesen nuestra MIMO en una antena prácticamente óptima en términos de ganancia y ancho de banda.

La forma de conseguirlo ha sido aumentar lo máximo posible el aislamiento entre ambas antenas pero sin llegar a que esto sea contraproducente, para ello, tal y como se puede observar en la imagen siguiente, hemos recortado las zonas más próximas entre sí de los elementos radiantes de nuestra antena, aumentando así más aun la distancia efectiva entre ellas.



*Figura 3.6 Antena MIMO de dos elementos modificados, cara frontal.*



*Figura 3.7 Antena MIMO de dos elementos modificados, cara posterior.*

*Tabla 3.4 Dimensiones de antena MIMO de dos elementos modificados.*

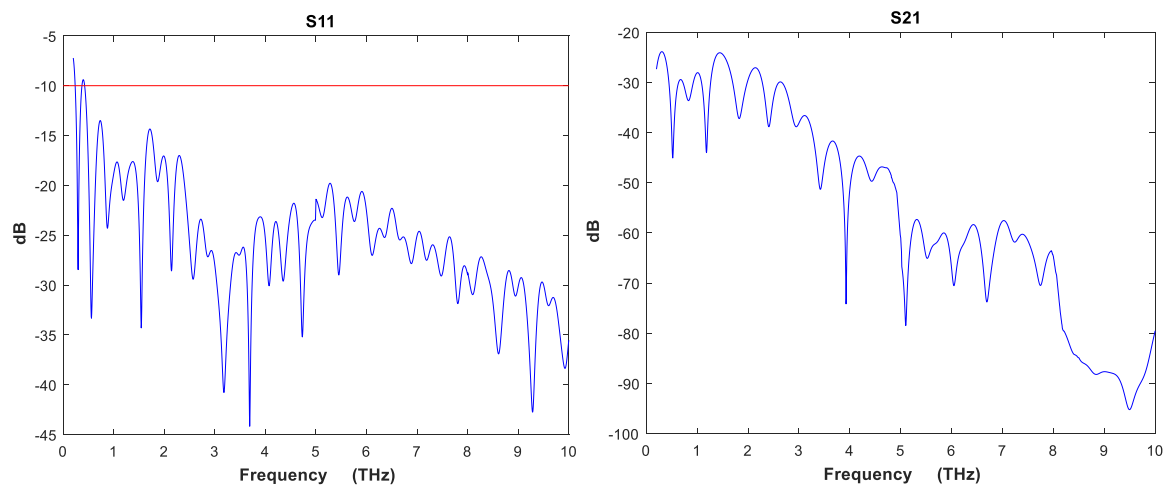
Parameter list	Value ( $\mu\text{m}$ )
<b>D_antenna</b>	<b>380</b>
<b>W_Slot</b>	<b>18</b>
<b>L_Slot</b>	<b>120.6</b>
<b>D_centre</b>	<b>98</b>
<b>W_sub</b>	<b>680</b>
<b>L_sub</b>	<b>400</b>
<b>W_barrier</b>	<b>14</b>

Además de recortar la zona radiante de nuestra antena, hemos aumentado ligeramente la distancia entre ellas, valor que se detalla en la tabla superior y que en total supone un aumento de  $40 \mu\text{m}$  con respecto a la primera MIMO de dos elementos que diseñamos.

Si nos fijamos en los resultados obtenidos apreciaremos, como era de esperar, un empeoramiento en el parámetro  $S_{11}$ , puesto que al tratarse de los parámetros que hacen referencia a la radiación del puerto de entrada sobre sí mismo y haber reducido la zona radiante de los mismos la frecuencia a la que empieza a ser efectiva nuestra antena ha aumentado y por tanto los resultados han empeorado.

Pero el objetivo de estas modificaciones era mejorar el parámetro  $S_{21}$ , el cual en nuestra primera aproximación a la antena MIMO se desviaba unos  $0.8 \text{ THz}$  de la frecuencia deseada en la cual queríamos que cumplierse el requisito de tener un valor a  $-20 \text{ dB}$ .



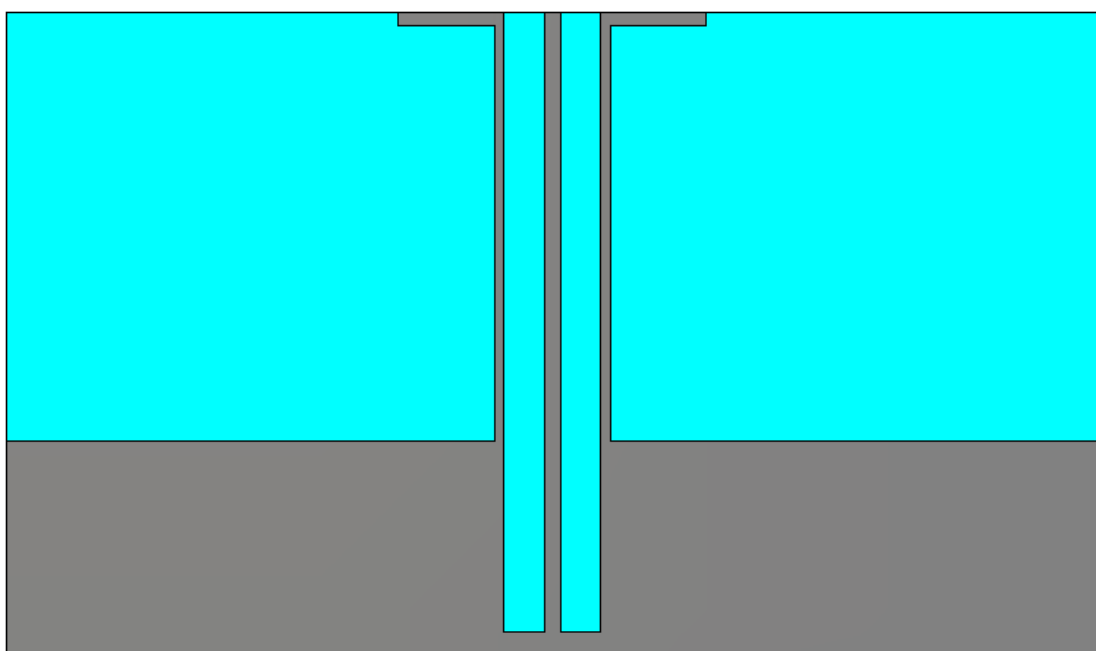


**Figura 3.8 Resultados de los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  de la antena MIMO de dos elementos circulares.**

Una vez conseguida una  $S_{21}$  óptima que posee un valor inferior a -20 dB en todo el espectro de radiación propuesto, es necesario realizar nuevas modificaciones en nuestra nueva MIMO de dos elementos que consiguiesen que los parámetros  $S_{11}$  mejorasen tanto o más como los  $S_{21}$  sin perjudicar a estos mismos.

Para ello, y en vista a los buenos resultados para los ya comentados parámetros  $S_{21}$ , decidimos no realizar ninguna modificación en los elementos radiantes.

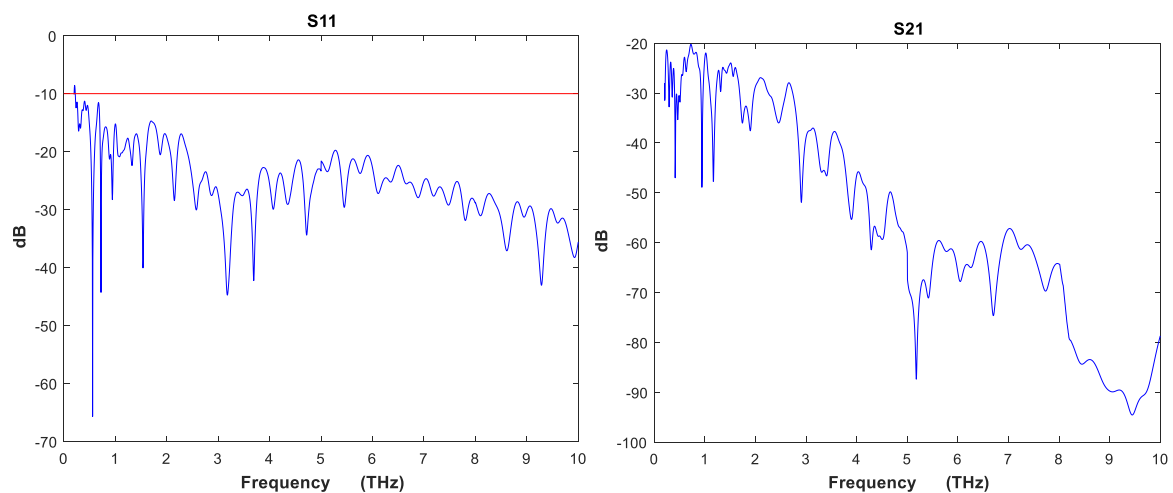
La modificación en este caso se realizó sobre el plano de masa, añadimos uno slot de 15  $\mu\text{m}$  de altura que conectase los planos de masa de cada una de las antenas dando lugar así realmente a un único plano de masa continuo que mejorase la radiación de cada puerto sobre sí mismo.



**Figura 3.9 Antena MIMO de dos elementos modificados, cara posterior modificada.**

Tal y como esperábamos los resultados del parámetro  $S_{11}$  han mejorado notablemente, empezando ahora su zona efectiva de valor igual o inferior a -10 dB en la frecuencia de 0.224 THz, lo cual mejora el resultado de nuestra MIMO anterior que tenía su inicio en 0.426 THz.

Además de mejorar nuestros parámetros  $S_{11}$ , hemos conseguido mantener los buenos resultados de la antenna anterior en los  $S_{21}$ , que pese a haber sufrido un ligero empeoramiento en las zonas de las frecuencias más bajas (entre 0 y 1.2 THz), en ningún momento llegan a superar el valor de -20 dB y por tanto se mantiene la continuidad de ancho de banda para todo el espectro de frecuencias simulado.



**Figura 3.10** Resultados de los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  de la antenna MIMO de dos elementos modificados en parte frontal y trasera.

A continuación, tenemos una tabla con información acerca de la directividad que posee nuestra antenna MIMO de dos elementos modificados, a la vista de los valores puede apreciarse que crecen de manera exponencial para estabilizarse de igual manera que lo hacen los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  según aumenta la frecuencia y las pérdidas van siendo prácticamente inexistentes.

**Tabla 3.5** Directividad antenna MIMO SWB de dos elementos.

Freq(THz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Directividad (dBi)	4.18	5.96	8.37	10.23	10.61	10.99	11.02	11.19	11.71	11.85

De esta manera, una vez cumplidos los requisitos iniciales de forma satisfactoria y posteriormente mejorados en todo lo posible para optimizar el funcionamiento de la antenna sin perder la coherencia en aprovechamiento de espacio y recursos, podemos dar por concluida nuestra antenna MIMO de dos elementos en miniatura que trabaja en tecnología de SWB para frecuencias en el rango de los THz.

Por otra parte, una vez obtenida nuestra antenna MIMO de dos elementos definitiva, vamos a realizar un análisis acerca de la independencia que tienen entre sí los diagramas de radiación de nuestra antenna MIMO de dos elementos, dicha característica se mide mediante el Coeficiente de Correlación Envolvente, ECC (Envelope Correlation Coefficient).

Dicho parámetro en caso de ser ideal tiene un valor igual a 0, ya que esto indicaría un aislamiento total entre las distintas antenas que componen nuestra MIMO, en nuestro caso en ningún momento supera el valor 0.002 por lo que sus diagramas de radiación podrían considerarse completamente independientes.

$$ECC = \frac{|S_{11} * S_{12} + S_{21} * S_{22}|^2}{[1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)] * [1 - (|S_{12}|^2 + |S_{22}|^2)]}$$

Figura 3.11 Fórmula para el cálculo del parámetro ECC.

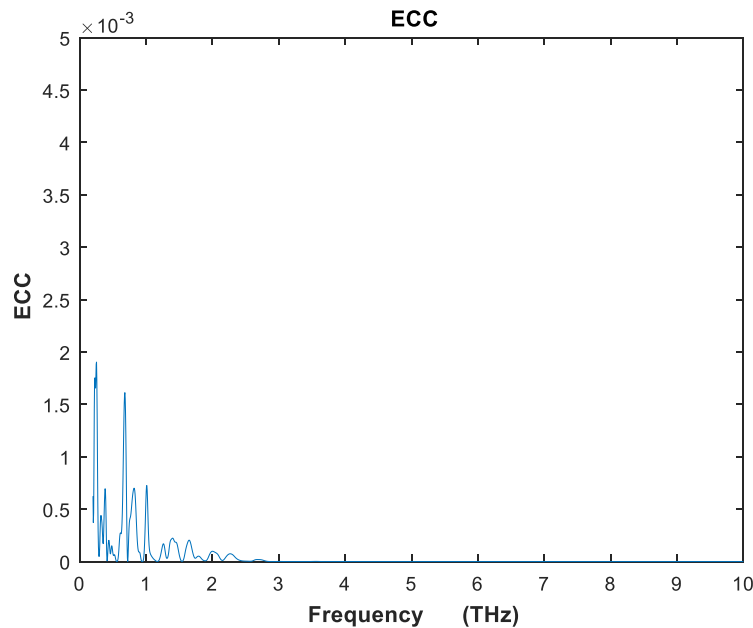


Figura 3.12 ECC de la antena MIMO SWB de dos elementos.

En la siguiente imagen podemos observar la ganancia de diversidad (diversity gain), un parámetro directamente relacionado con la independencia de los diagramas de radiación de nuestra MIMO (ECC) que indica cómo de óptimo está siendo el funcionamiento de una antena.

Para ser ideal debe tener un valor de 10dB en las bandas de funcionamiento de nuestra antena y en nuestro caso el valor más lejano al ideal se produce en 9.9905 lo cual es como en el caso del ECC un rendimiento casi óptimo. Esta se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$DG = 10 * \log_{10}(10 * \sqrt{1 - ECC})$$

Figura 3.13 Fórmula para el cálculo del parámetro diversity gain.

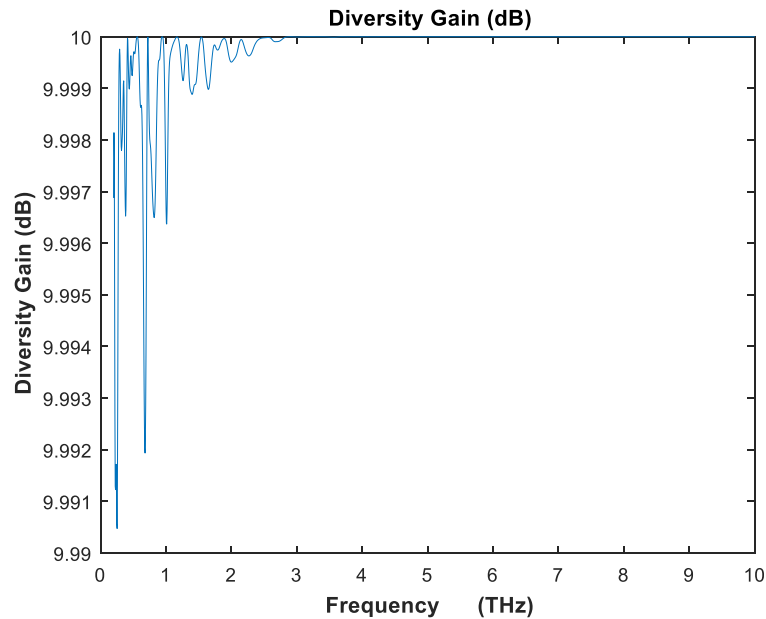


Figura 3.14 DG de la antena MIMO SWB de dos elementos.

### 3.4 Antena MIMO multibanda

Sabemos que en una antena microstrip, el sustrato no envuelve toda la estructura, ya que este solo representa la base sobre la que se apoya, por tanto, deberemos tener en cuenta no solo la constante dieléctrica del mismo si no también la constante dieléctrica del aire que rodea la parte superior de nuestra antena [4].

Si definimos las constantes dieléctricas de sustrato y aire como  $\epsilon_r$  y  $\epsilon_0$  respectivamente, h como el espesor de nuestro sustrato y W la anchura de la antena podremos obtener la constante dieléctrica efectiva necesaria  $\epsilon_{r,efec}$  mediante la siguiente fórmula.

$$\epsilon_{r,efec} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-0.5}$$

Figura 3.15 Cálculo de epsilon efectiva [4]

En la cual previamente tendremos que haber calculado nuestra W mediante esta otra ecuación que relaciona ya nuestra antena con la constante  $\lambda_0$  que a su vez esta relacionada con la frecuencia de diseño que queremos obtener.

$$W = \frac{\lambda_0}{2} * \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

Figura 3.16 Calculo de la anchura de parche [4].

Al igual que para cualquier constante necesaria de calcular en este tipo de antenas es necesario tener en cuenta que el sustrato no cubre por completo nuestra antena, y eso también es necesario tenerlo en cuenta en el cálculo de la longitud de esta.

Por tanto, empezaremos calculando nuestra  $L_{efectiva}$  que tiene en consideración la  $\epsilon_{r,efect}$  y nuestra frecuencia de diseño, para luego con dicha  $L_{efectiva}$  conseguir nuestra longitud real de antena (L).

$$L_{efec} = \frac{c_0}{2f_{diseño}\sqrt{\epsilon_{r,efec}}} = \frac{\lambda_{diseño}}{2}$$

$$L = L_{efec} - 2\Delta L$$

$$\Delta L = 0.412 \cdot h \cdot \frac{(\epsilon_{r,efec} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{r,efec} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$$

Figura 3.17 Fórmulas necesarias para el cálculo de las dimensiones de la antena de parche [4].

Por último, para poder obtener una impedancia de entrada lo más próxima a la impedancia de carga y así tener la mayor transferencia de potencia posible, se ha utilizado una alimentación con una longitud para la misma de  $\frac{\lambda_0}{2}$ .

### 3.4.1 Antena básica de un elemento

Para el diseño de nuestra antena microstrip multibanda, comenzaremos con un diseño básico de una antena microstrip cuadrada, cuyas dimensiones han sido calculadas utilizando las fórmulas del apartado anterior, mediante las cuales una vez obtenida la longitud de onda que es necesaria para nuestra frecuencia de diseño (2.445 GHz) podemos saber de forma orientativa el resto de los valores para comenzar el diseño de nuestro parche.

Para lo anterior al igual que en la antena en miniatura para SWB hemos utilizado para la obtención de medidas las herramientas LineCalc y Matlab y para el diseño y optimización de este la herramienta CST.

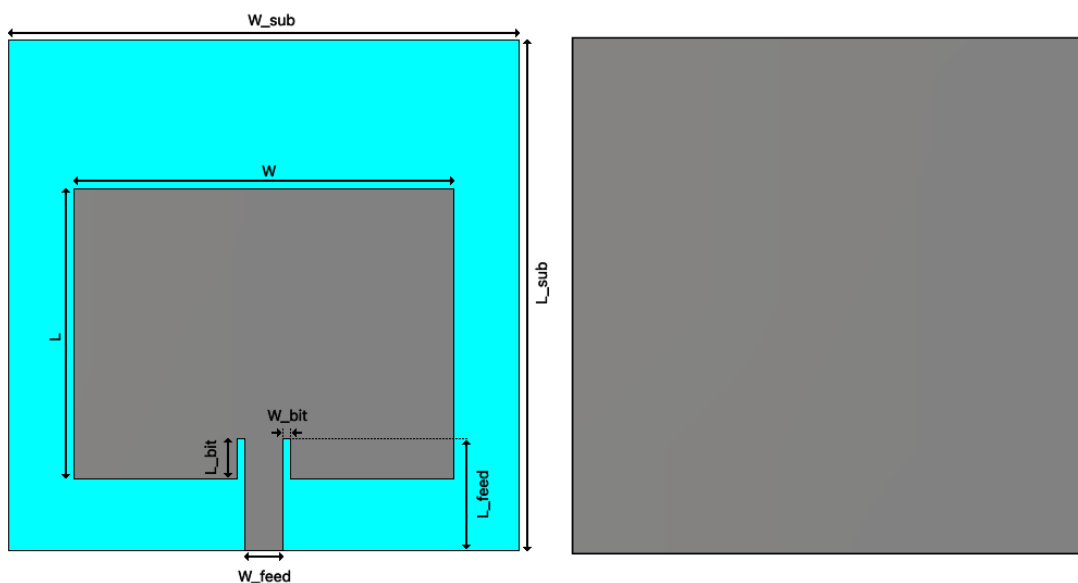


Figura 3.18 Cara frontal y trasera de antena microstrip multibanda de un elemento

Tabla 3.6 Dimensiones antena multibanda básica.

Parameter list	Value (mm)
<b>W_sub</b>	<b>50</b>
<b>L_sub</b>	<b>50</b>
<b>W</b>	<b>37.20</b>
<b>L</b>	<b>28.50</b>
<b>W_bit</b>	<b>0.75</b>
<b>L_bit</b>	<b>4</b>
<b>W_feed</b>	<b>3.65</b>
<b>L_feed</b>	<b>7</b>

En la siguiente imagen podemos observar la primera de nuestras bandas de interés, la frecuencia de operación, centrada en 2.245 GHz, que posee un ancho de banda de 78.4 MHz y cumple los criterios de diseño establecidos en el punto 3.1.2 puesto que su valor es de -43.722 dB.

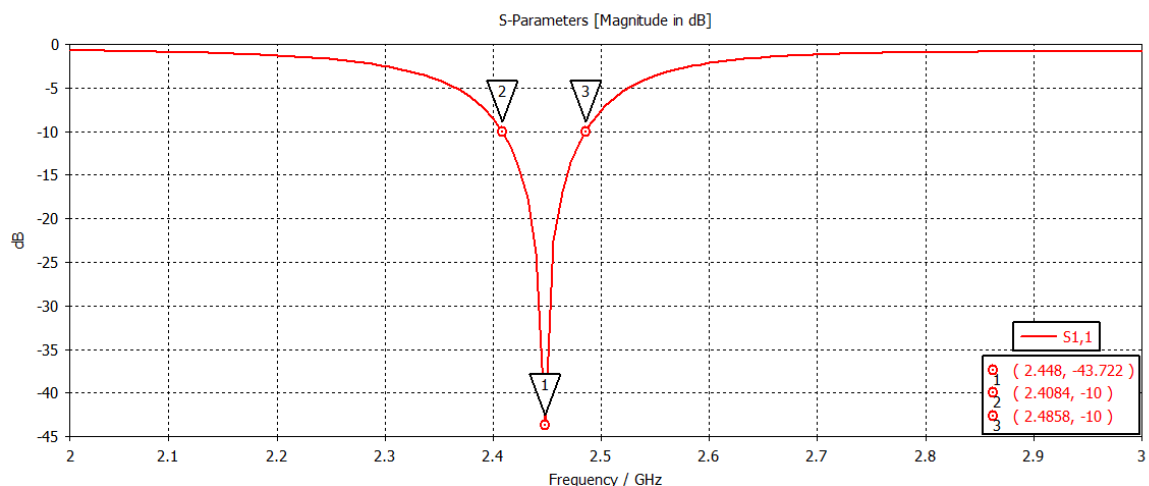


Figura 3.19 Resultado del parámetro S11 para la antena microstrip multibanda de un elemento.

Para esta antena no solo debemos tener en cuenta el valor del parámetro S11, también tenemos que fijarnos en su directividad, la cual en este caso se encuentra en 6.187 dBi, lo cual es un valor estándar para las antenas de esta categoría.

Una vez hemos cumplido los criterios de diseño podemos pasar al siguiente punto del proceso que tiene como objetivo obtener una antena que opere en modo multibanda, para las frecuencias 2.445 GHz, 3.5GHz y 5.5 GHz.

### 3.4.2 Obtención de frecuencias requeridas

Una vez obtenida nuestra antena de aproximación que cumple los requisitos para la frecuencia de operación, necesitamos obtener el resto de las bandas.

Para ello hemos llevado a cabo un estudio sobre cómo reacciona nuestra antena ante la colocación de elementos adicionales en la parte superior de nuestro parche.

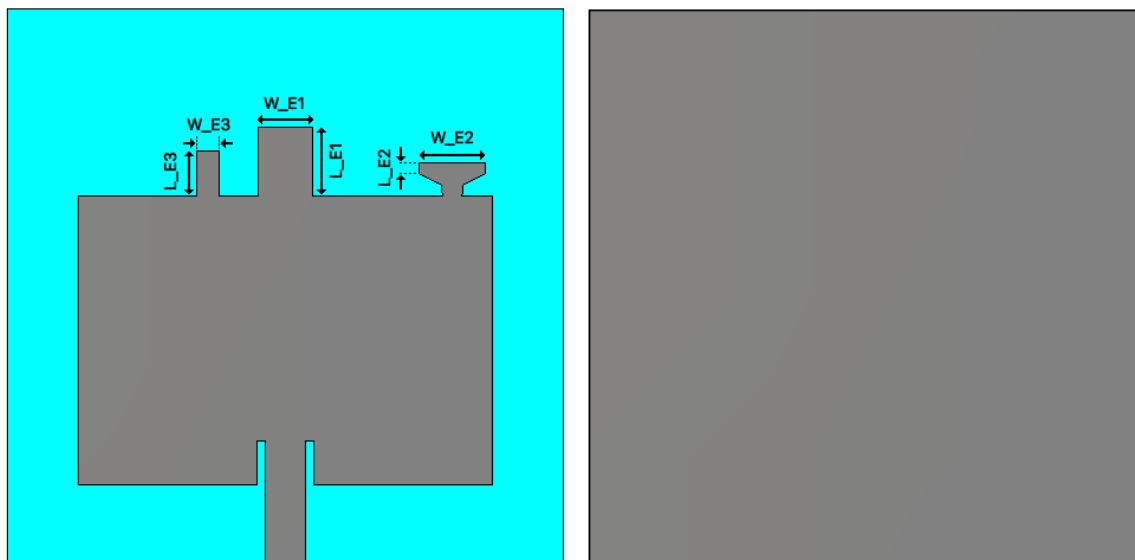
En un primer momento, se intentó conseguir que nuestra antena radiase en las frecuencias objetivo mediante la colocación de un solo elemento adicional, aumentando y reduciendo su tamaño, probando con diversas formas (circulares, rectangulares, triangulares), y el principal problema lo encontrábamos a la hora de conseguir la banda que está centrada en 5.5 GHz.

Tras muchas pruebas, decidimos dejar el elemento central con la forma y en las posiciones actuales puesto que pese a no encontrar la frecuencia problemática de 5.5GHz, era con la cual se obtenían los mejores resultados para el resto de las bandas, y empezamos a realizar pruebas con otros elementos colocados a ambos lados del elemento principal.

Al añadir otro elemento a la derecha del elemento principal, empezábamos a observar la aparición de la banda de 5.5GHz en zonas próximas, concretamente entre 5 y 6, pero no llegaba a centrarse donde queríamos, pensábamos que podía ser por la forma ya que, al probar con formas cuadradas o rectangulares, estas eran demasiado invasivas con el elemento central y las formas circulares no presentaban buena radiación y la banda no llegaba nunca a bajar de -10 dB.

Finalmente, tras muchos diseños y variaciones de posición a lo largo del eje x pero siempre en la zona de las x positivas (era donde se obtenían los mejores resultados), se decidió crear una forma con un taper inverso, y que fuese expandiéndose para finalmente acabar plano en la parte superior, esa forma no es trivial ya que permite que la corriente llegue mejor al elemento radiante central pero a su vez no es tan invasivo con los otros elementos y por tanto no empeora las otras bandas lo cual era un problema.

Por último, fue necesario añadir un tercer elemento, a la izquierda del elemento central, de forma similar al mismo, este elemento fue necesario ya que al incluir el elemento que nos permitió obtener la frecuencia centrada en 5.5 GHz, las otras frecuencias se habían visto afectadas y los parámetros S11 estaban relativamente próximos a -10 dB.



*Figura 3.20 Cara frontal y trasera de antena microstrip multibanda de un elemento modificada.*

Tabla 3.7 Dimensiones de modificaciones de antena multibanda de un elemento.

Parameter list	Value (mm)
W_E1	4.80
L_E1	6.20
W_E2	6
L_E2	1
W_E3	2
L_E3	4
W_feed	3.65
L_feed	7
T_min	1
T_max	1.2

Los resultados obtenidos para esta propuesta de diseño de antena han sido los siguientes, con respecto a nuestra frecuencia de operación tenemos que ahora se encuentra en 2.456 GHz,

Tabla 3.8 Directividad de antena multibanda de un elemento.

Parámetro	2.456 GHz	3.536 GHz	4.1917 GHz	5.4468 GHz
Directividad	6.184 dBi	5.687 dBi	5.042 dBi	6.135 dBi

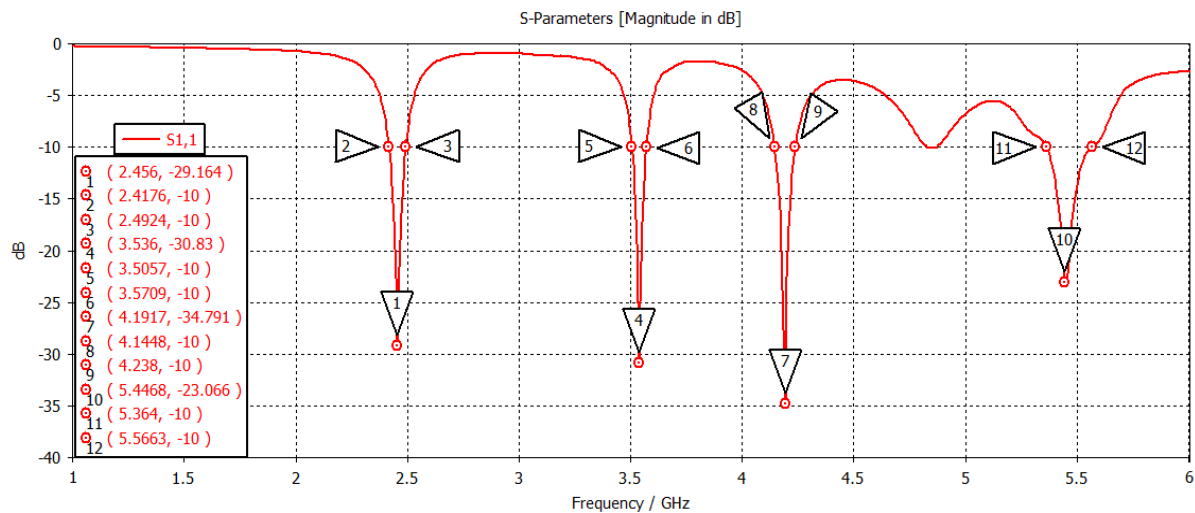


Figura 3.21 Resultado del parámetro S11 para la antena microstrip multibanda modificada de un elemento.

Podemos concluir con que hemos resuelto satisfactoriamente el problema de la banda centrada en 5.5 GHz y cumplimos los requisitos de diseño del punto 3.1.2, por tanto, podemos pasar a la siguiente fase de diseño de antena MIMO multibanda de dos elementos.

### 3.4.3 MIMO de dos elementos

Para realizar nuestra antena MIMO de dos elementos partimos del elemento final del apartado anterior que cumplía de forma satisfactoria los criterios de diseño impuestos al comienzo.



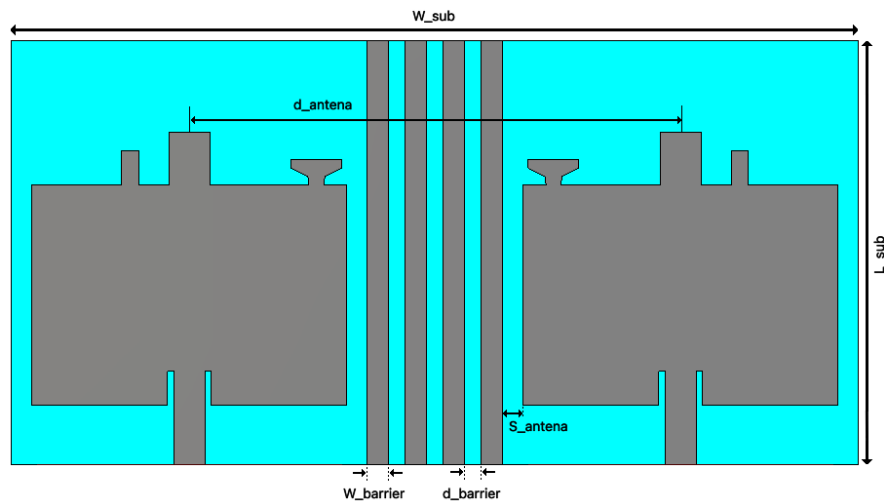
Haciendo uso de una de las propiedades de la herramienta de diseño (CST), hemos duplicado nuestra antena sobre su eje X tal y como puede apreciarse más abajo en las imágenes referentes a nuestra antena.

En una primera aproximación (sin ningún tipo de barreras), los resultados obtenidos no cumplían los criterios de diseño, era necesario aislar lo máximo posible una antena de otra para conseguir unos buenos resultados en los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$ .

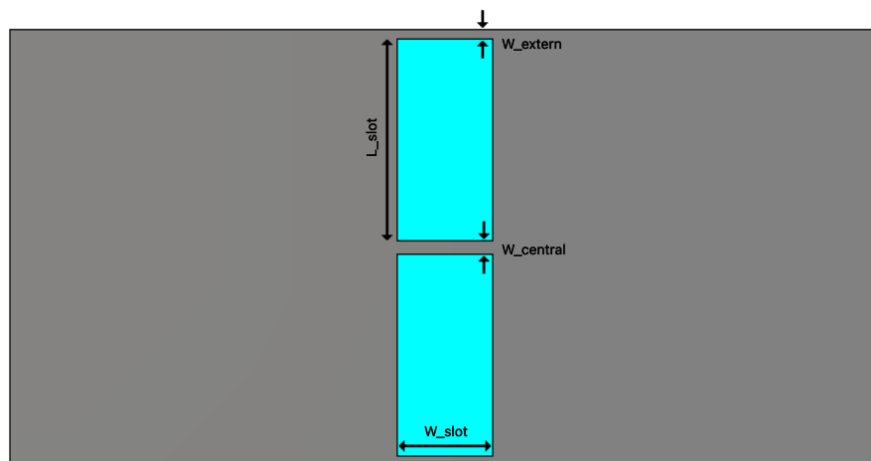
Para conseguir lo anterior se realizaron las siguientes modificaciones, en primer lugar, se aumentó la distancia entre ambas en sentidos opuestos, al no ser suficiente era necesario crear una barrera que aumentase ese aislamiento que buscábamos para obtener los resultados.

Tras muchas variaciones y pruebas, los mejores resultados se obtuvieron con la barrera formada por esa agrupación de cuatro barreras verticales de la misma longitud que el sustrato y a una determinada distancia de nuestra antena.

Además de estas modificaciones en la estética de la parte delantera, para la parte trasera se realizaron slots en el plano de masa en la zona coincidente con la barrera para mejorar más aun los resultados.



*Figura 3.22 Cara frontal de antena MIMO multibanda de dos elementos.*



*Figura 3.23 Cara posterior de antena MIMO multibanda de dos elementos*

Tabla 3.9 Dimensiones antena MIMO multibanda de dos elementos.

Parameter list	Value(mm)
<b>W_sub</b>	<b>100</b>
<b>L_sub</b>	<b>50</b>
<b>d_antena</b>	<b>58</b>
<b>S_antena</b>	<b>2</b>
<b>W_barrier</b>	<b>2.5</b>
<b>d_barrier</b>	<b>2</b>
<b>L_slot</b>	<b>23.25</b>
<b>W_slot</b>	<b>11</b>
<b>W_extern</b>	<b>1</b>
<b>W_central</b>	<b>1.5</b>

Como se puede observar en las sucesivas imágenes donde aparecen los resultados de S11 Y S21, se cumplen satisfactoriamente los criterios de diseño y ya podemos realizar el MIMO de 4 elementos de nuestra antena.

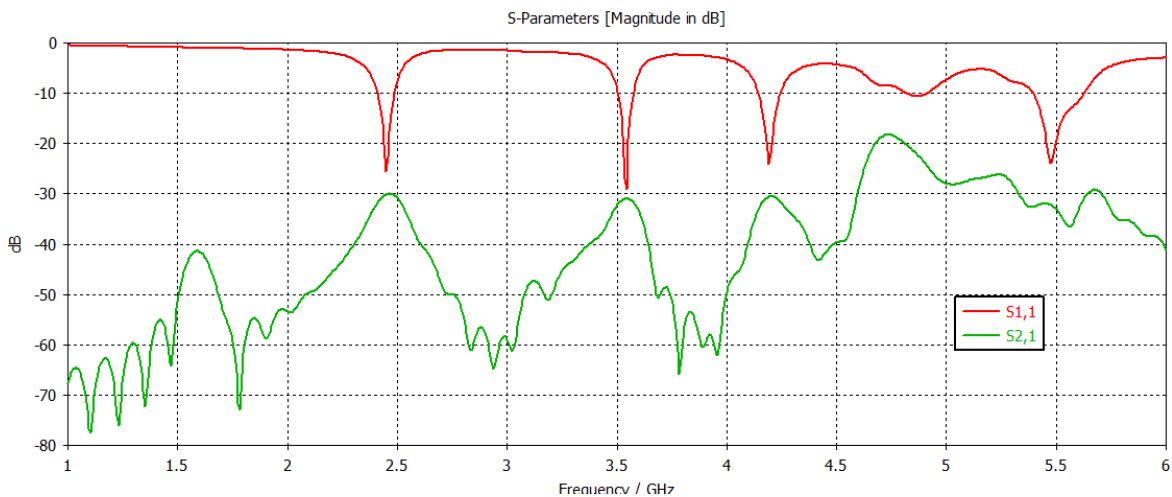


Figura 3.24 Resultados de los parámetros S11 y S21 para antena MIMO multibanda de dos elementos.

Para una mejor resolución de los resultados hemos decidido no poner marcadores en los puntos clave de las gráficas de los parámetros S11 y S21, en su lugar se incorpora a continuación una tabla con dichos resultados.

En dicha tabla, identificamos las bandas como 1, 2 3 y 4 que corresponden a las bandas vistas desde el origen (1GHz), hasta la frecuencia más alta (6GHz).

Tabla 3.10 Valores de parámetros S11, S21 y ancho de banda.

Parameter list (GHz)	S11 (dB)	BW(MHz)	S21(dB)
<b>Banda 1 (2.448)</b>	<b>-25.505</b>	<b>77.3</b>	<b>-29.989</b>
<b>Banda 2 (3.544)</b>	<b>-28.97</b>	<b>70</b>	<b>-30.908</b>
<b>Banda 3 (4.192)</b>	<b>-24.168</b>	<b>100.3</b>	<b>-30.499</b>
<b>Banda 4 (5.480)</b>	<b>-23.825</b>	<b>232</b>	<b>-32.471</b>

Tabla 3.11 Directividad antena MIMO multibanda de dos elementos.

Parameter list (GHz)	2.448	3.544	4.192	5.48
Directividad(dBi)	5.504	5.514	4.155	6.198

### 3.4.4 MIMO DE 4 ELEMENTOS

Al igual que para nuestra MIMO de 2 elementos, realizamos el mirror pero en este caso sobre el eje Y, para obtener nuestra antena de cuatro elementos radiantes.

En este caso explicaremos las modificaciones realizadas para conseguir el objetivo hablando primero de la parte frontal de la antenna y posteriormente de la parte trasera.

- Parte frontal de MIMO de cuatro elementos:

Las diferencias con la antena de dos elementos son evidentes a simple vista, en una primera aproximación al solamente realizar el mirror en el eje Y y no tener ningún tipo de barrera se obtuvieron unos buenos resultados para los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{31}$ , pero los  $S_{21}$  empeoraron notablemente y los  $S_{41}$  quedaban lejos de cumplir los criterios de diseño impuestos al principio de este capítulo.

Una de las primeras modificaciones fue aumentar la distancia de las dos antenas inferiores y las superiores entre si, esto mejoró los resultados pero sin llegar a ser satisfactorios por lo que fue necesario añadir una barrera que aislase más aun si cabe cada una de las antenas de las otras tres.

Pero el aumento de las distancias entre ellas en el eje vertical sumado a la aparición de la barrera, provocó que los parámetros  $S_{21}$  empeorasen muy notablemente hasta el punto de dejar de cumplir los criterios de diseño. Este problema lo solventamos aumentando la distancia entre las antenas en el eje X pero manteniendo la barrera en su posición original.

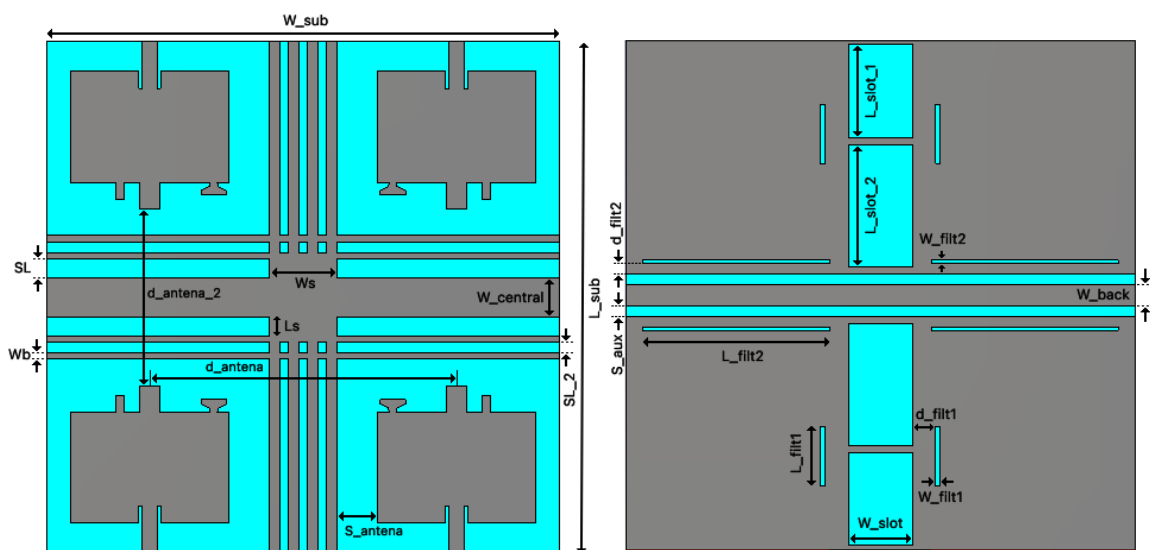


Figura 3.25 Cara frontal y posterior de nuestra antena MIMO multibanda de cuatro elementos.

Tabla 3.12 Dimensiones antenna MIMO multibanda de cuatro elementos.

Parameter list	Value(mm)	Parameter list	Value(mm)
W_sub	120	L_solt_1	17.5
L_sub	120	L_solt_2	28.5
d_antena	78	W_slot	11
d_antena_2	39.5	L_filt1	10
Ws	2.5	W_filt1	1
Ls	9	d_filt1	2
W_central	5.5	L_filt2	23.25
SL	4	W_filt2	0.5
SL_2	2	d_filt2	1
S_antena	9	W_back	4
Wb	1.5	S_aux	2.5

- Parte trasera de la antenna MIMO de cuatro elementos.

Fueron necesarias dos modificaciones principales con respecto a la de dos elementos, la primera de ellas es, siguiendo el mismo principio que en el primer caso, se han realizado dos slots horizontales que dividan los planos de masa de nuestros 4 elementos y el segundo de ellos es la aparición de una serie de slot de un ancho muy reducido que hemos establecido para de alguna manera conseguir filtrar y eliminar la aparición del empeoramiento en la zona de 4.5 a 5 GHz, si bien es cierto que esta zona no coincide con ninguna banda de nuestro interés, en los diversos usos que se le den a la antenna podría suponer un inconveniente y lo más logico era eliminarla.

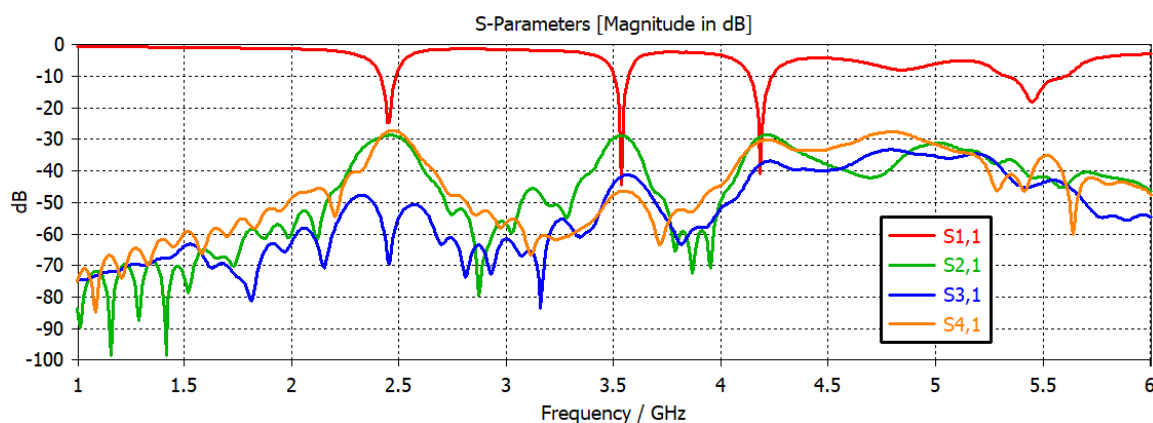


Figura 3.26 Resultado de los parámetros S11, S21, S31 y S41 de la antenna MIMO de 4 elementos.

A la vista de los resultados de los parámetros S, podemos concluir con que hemos finalizado de forma satisfactoria nuestra antenna puesto que, tenemos 3 bandas funcionales las cuales no han sufrido fuertes desplazamientos tras la aplicación de las medidas de asilamiento con respecto a las bandas que nos interesaban en un principio, y cumplen los criterios de diseño propuestos, además hemos obtenido una cuarta banda extra (centrada en 4.19 GHz), lo cual hace más funcional nuestra antenna y hemos conseguido atenuar esa zona que, pese a no tener ninguna banda de radiación que fuese de nuestro interés, no cumplían los requisitos de diseño y si se desplazaba podía producir consecuencias indeseadas.

*Tabla 3.13 Directividad antena MIMO multibanda de cuatro elementos.*

Parámetro	2.456 GHz	3.536 GHz	4.1917 GHz	5.4468 GHz
<b>Directividad</b>	6.224 dBi	5.487 dBi	3.502 dBi	7.865 dBi

Los valores para la directividad encajan con los valores esperados tanto para este tipo de antenas como para este tipo de composiciones MIMO de cuatro elementos.

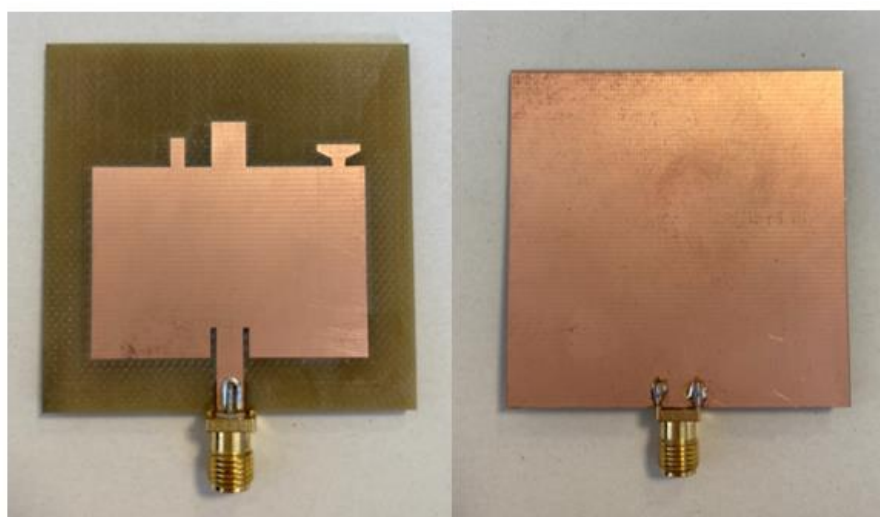
## **4 IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS PRÁCTICOS**

Para la realización de este punto ha sido necesario generar empleando de forma combinada CST y ADS los ficheros gerbers necesarios para la construcción de las diversas antenas, la cual se ha realizado en el taller pcb de la Escuela Politécnica Superior.

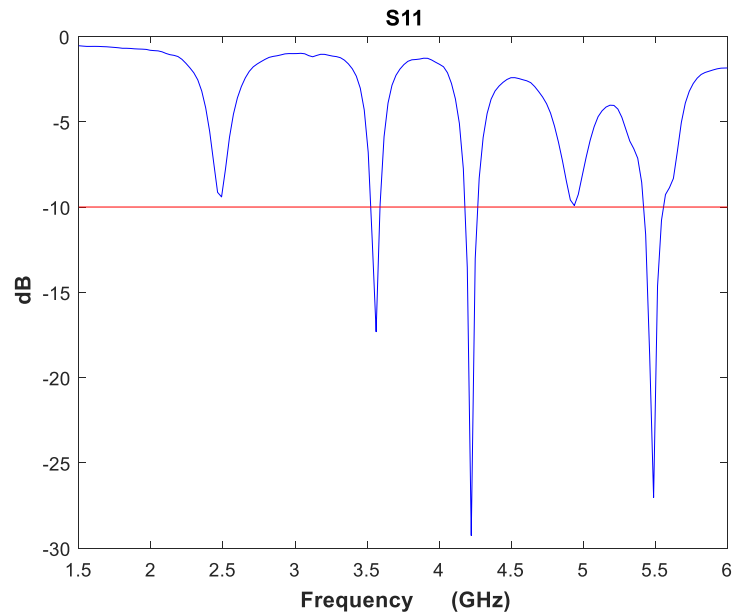
Tras su construcción se soldaron los conectores necesarios y tras la calibración de los cables se realizaron las medidas de los parámetros S haciendo uso del modelo de analizado de espectro “AGILENT E-5071C”.

### **4.1 Antena MIMO microstrip multibanda.**

Empezaremos comentando los resultados obtenidos tras la construcción y simulación de nuestra antena multibanda de un elemento.



*Figura 4.1 Cara frontal y trasera de antena microstrip de un elemento.*

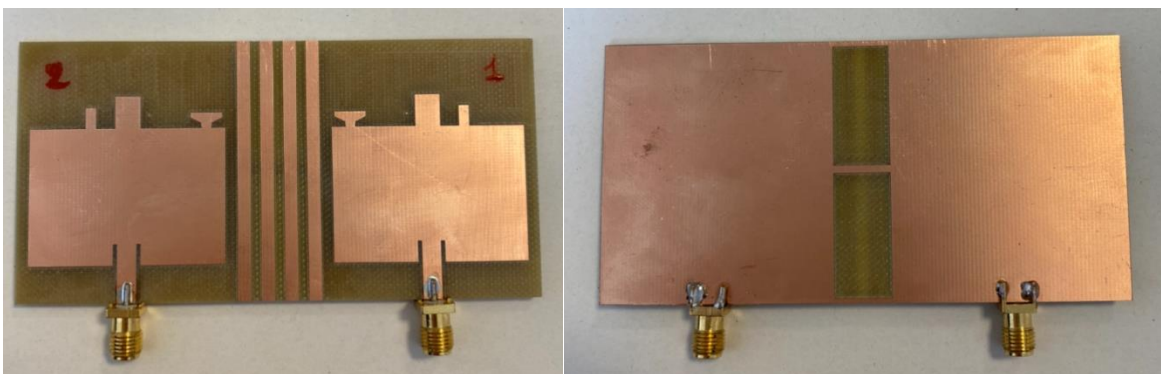


**Figura 4.2** Resultado en simulación real de la antena microstrip de un elemento.

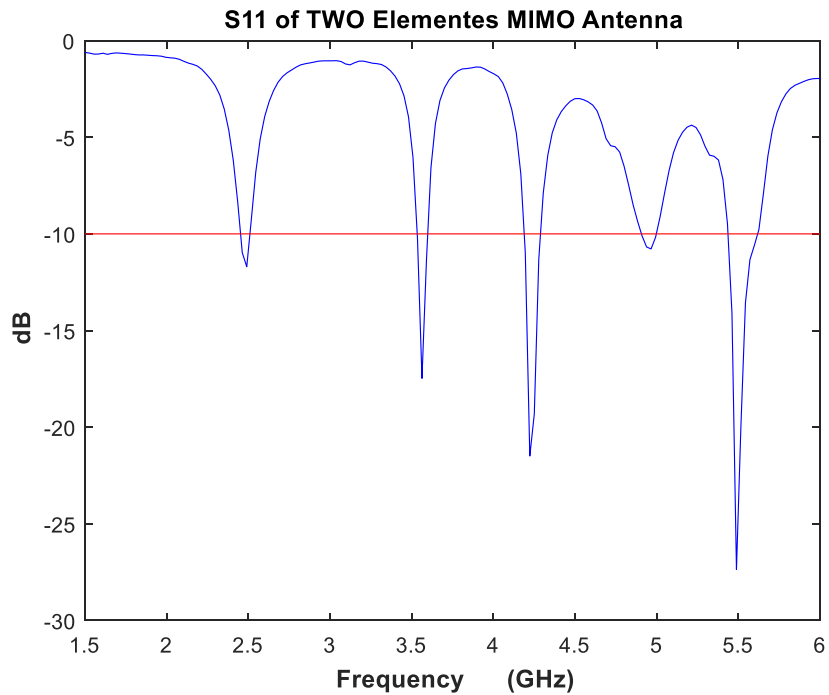
Tal y como puede observarse en los resultados, se ha producido un empeoramiento en la banda centrada en 2.445 respecto a las simulaciones realizadas en la parte de diseño, esto puede estar debido a la falta de aislamiento en el momento de la medición ya que como se pudo comprobar, cuanto más se introducía nuestra antena en los elementos aislantes, mejores en los resultados no solo para la banda de 2.445 GHz, si no también para las demás.

Además, se puede observar la aparición de una quinta banda, centrada en 4.88 GHz, la cual por el momento para nuestra antena de un elemento no cumple los criterios de diseño pero nos da una explicación a la aparición en la etapa de diseño de irregularidades en los parámetros S21, S31 y S41 en ese mismo rango de frecuencias.

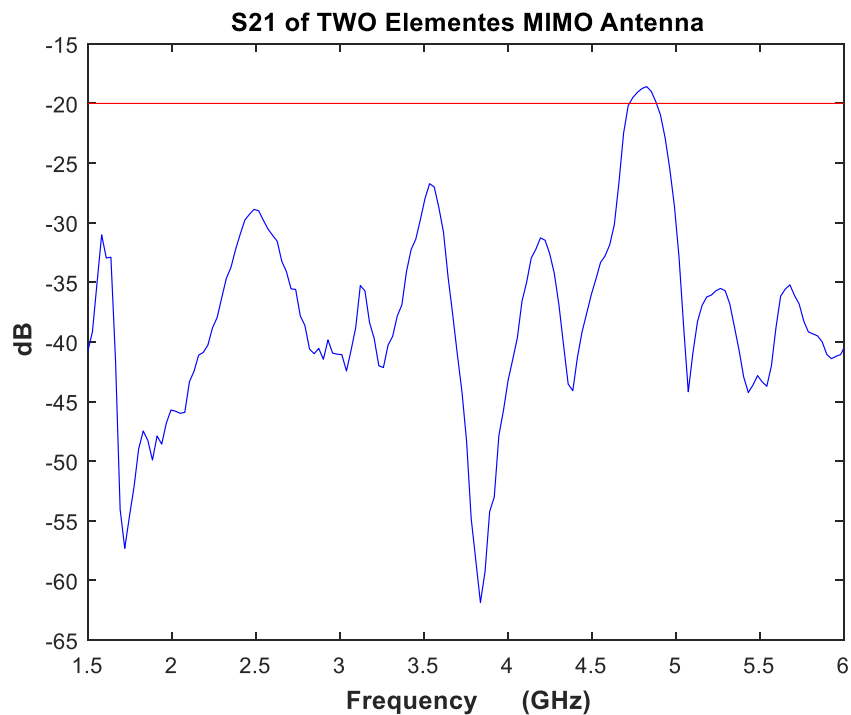
A continuación comentaremos los resultados obtenidos para nuestra antena MIMO multibanda de dos elementos.



**Figura 4.3** Cara frontal y trasera de antena MIMO de dos elementos.



*Figura 4.4 Resultados  $S_{11}$  de la antena MIMO multibanda de dos elementos.*

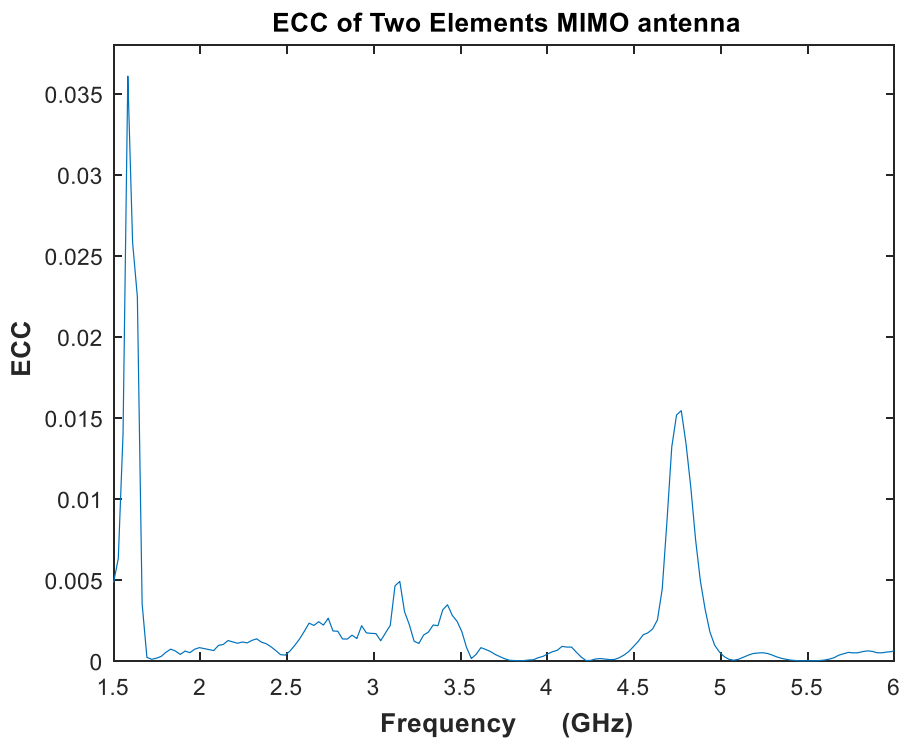


*Figura 4.5 Resultados  $S_{21}$  de la antena MIMO multibanda de dos elementos.*

En este caso, comparandolo con los resultados obtenidos en la etapa de diseño vemos que concuerda bastante con lo obtenido en la misma, el empeoramiento de la banda de 2.445GHz para el parámetro  $S_{11}$  persiste pero ya se nota una mejoría empezando a cumplir los criterios de diseño propuestos para los mismos, de igual manera sucede para la banda centrada en 4.88 GHz y que ha aparecido unicamente en la etapa de simulación con elementos reales.

Tal y como veíamos en la parte final del apartado 3.3.3, la ECC es un parámetro que determina como de independientes son los diagramas de radiación de una antena con respecto a la otra y que para ser ideal tendría que ser un valor lo más próximo posible a 0.

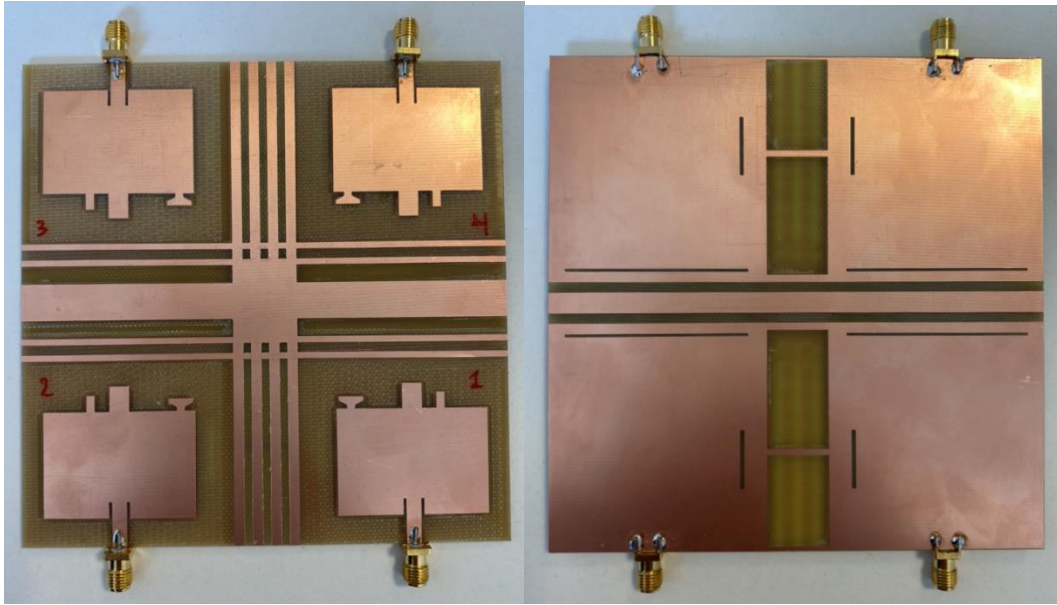
En este caso como podemos apreciar su valor máximo es 0.035 pero en una frecuencia a la que no existe ninguna banda de radiación por tanto el valor que realmente nos interesa es en 4.75 GHz y es igual a 0.018 lo cual está dentro de los márgenes correctos.



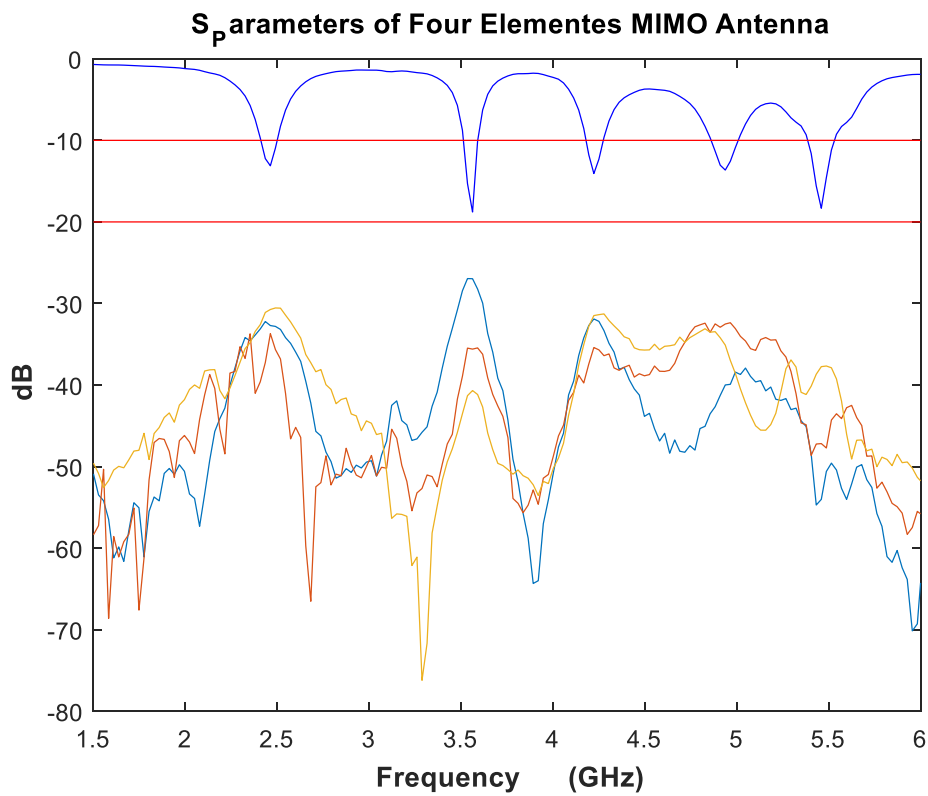
*Figura 4.6 ECC de antena MIMO multibanda de dos elementos.*

Por último tenemos el análisis de los resultados obtenidos para nuestra antena MIMO de cuatro elementos, tal y como hemos ido comentando a lo largo de todo el documento, solo se han analizado los parámetros S referidos al puerto 1 ya que al guardar una simetría total, nuestra antena arrojaba los mismo resultados para los puertos 2, 3 y 4.





*Figura 4.7 Cara frontal y trasera de antena MIMO multibanda de cuatro elementos.*



*Figura 4.8 Resultados de los parámetros S11, S21, S31 y S41 para antena MIMO multibanda de cuatro elementos.*

A la vista de los resultados, con respecto a los parámetros S21, S31 y S41, se produce una mejora en esas tres constantes, ya que ahora todas están por debajo de -30dB en el espectro de frecuencias analizado salvo en un punto del parámetro S41 para la frecuencia de 3.5 GHz donde llega a -27dB, lo cual sigue cumpliendo nuestros criterios de diseño.

Además, ahora sí que podemos notar una mejora sustancial en los parámetros S11, ahora todas nuestras bandas cumplen nuestro criterio de diseño de estar por debajo de -10dB, además gracias a la corrección que hicimos en la parte de diseño atenuando los parámetros S de una posible quinta banda que no se apreciaba han permitido que en las pruebas reales esta apareciese y fuese totalmente funcional.

Por tanto, podemos concluir de forma satisfactoria nuestra antena MIMO multibanda de cuatro elementos, puesto que hemos conseguido que para el rango simulado de 1.5 a 6 GHz, tengamos 5 bandas distintas y totalmente funcionales.

## **5 Conclusiones y trabajo futuro**

---

Durante este trabajamos hemos llevado a cabo el diseño de dos antenas MIMO multibanda, una de ellas direccional y con bandas separadas y centradas principalmente en 2.5GHz, 3.45GHz y 5.5GHz, y otra multibanda también, pero en este caso de super banda ancha y miniaturizada para trabajar en THz.

Con respecto a la etapa de diseño, las mayores dificultades han estado en el diseño de la antena que trabaja en GHz, la primera fue a la hora de obtener que nuestra antena radiase convenientemente para las frecuencias deseadas y posteriormente los problemas llegaron a la hora del aislamiento, para conseguir unos buenos resultados en los parámetros S, donde fue necesario añadir diversos elementos y además llegar incluso a agrandar un poco el tamaño de la antena.

Además también es importante tener en cuenta la diferencia de resultados entre el diseño en la herramienta empleada (CST), donde tanto el medio como los materiales tienen propiedades perfectas ya sea en capacidad de radiación así como simulaciones en medios ausentes de cualquier tipo de ruido y/o interferencia electromagnética, pese a ello, que se pudo apreciar en las primeras simulaciones reales tras la construcción de nuestra antena multibanda de un elemento, finalmente los resultados obtenidos fueron mejores que en la herramienta de diseño ya que para el rango de frecuencias de interés (1.5 a 6 GHz), llegaron a aparecer cinco bandas totalmente funcionales y con unos buenos parámetros S así como una buena ECC y diversidad de ganancia.

Con respecto a la antena que trabaja en el rango de los THz todo fue más sencillo, desde un principio se obtuvieron resultados muy cercanos al objetivo y se trabajó para optimizarlos lo máximo posible y que fuesen lo más cercanos a una antena ideal.

Con respecto al trabajo futuro que puede realizarse a partir del descrito en este documento, podría enfocarse para la antena en GHz en dos puntos principales, la investigación acerca de nuevas formas, como la creada por nosotros para obtener la frecuencia en 5.5GHz, que permitiesen más versatilidad y el segundo punto, la optimización del espacio y aislamiento para conseguir antenas más compactas con unos mejores resultados.

Para la antena en THz, debido al buen rendimiento conseguido, diría que los futuros estudios han de centrarse en como optimizar más aún si se puede la relación sustrato/elemento radiante sin sacrificar los buenos resultados obtenidos.



# Referencias

---

- [1] IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas, IEEE Std 145-1983.
- [2] Cardama Aznar, Á., Jofre Roca, L., Rius Casals, J. M., Romeu Robert, J., Blanch Boris, S., & Ferrando Bataller, M. (2002). Antenas. Edicions UPC.
- [3] Jorge Alfonso Ruíz Cruz. Medios de transmisión. UAM. 2014-2015.
- [4] José Luis Masa Campos. Antenas y compatibilidad electromagnética. UAM.
- [5] Rojas, Steven . “Polarización de ondas electromagnéticas”. Médium. 2019.
- [6] Wharsa Balani, Mrinal Sarvagya. Tanweer Ali, Manohara. Pai M.,M, Anguera,Jaume. Andujar, Aurora. “Design Techniques of Super-Wideband Antenna—Existing and Future Prospective”, IEEAccess, 2019.
- [7] Corrales de la Rosa, Erwin David. Gomez Perez, Wagner Steven. “Tecnología MIMO”, Universidad Tecnológica de Bolívar. 2007.
- [8] Luques, Marcelo. Marrone, Luis “Redes Wireless – Tecnología MIMO – Análisis y performance del Estándar de Comunicaciones Inalámbricas 802.11n”Universidad Nacional de la plata. 2009.





