

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID



Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación

TRABAJO FIN DE GRADO

Implementación de antenas fractales UWB

Autor: Jorge Garrido Uceta

Tutor: Bazil Taha Ahmed

Marzo 2021

Resumen

En este proyecto se ha realizado el diseño e implementación de antenas compactas con diseño fractal que funcionan en el ancho de banda frecuencial propio de la tecnología UWB, definido entre los 3.1 GHz hasta los 10.6 GHz. Las limitaciones de las medidas físicas de las antenas son reducidas, ya que estos dispositivos se diseñan con el objetivo de poder instalarse en sistemas de comunicaciones móviles que, en general, tienen unas dimensiones limitadas.

Asimismo, se hicieron y optimizaron los diseños en base a los resultados obtenidos en las simulaciones de los parámetros fundamentales de las antenas, con el fin de conseguir nuestros requisitos marcados previamente.

El diseño comenzó con la elaboración de una antena fractal que cumpliera los objetivos con un ancho de banda UWB o superior a este, pero incluyéndolo. Posteriormente, partiendo de este diseño correcto, llevamos a cabo las antenas fractales aplicando la tecnología MIMO, de tal forma que conseguimos antenas con múltiples elementos radiantes aumentando así la tasa de bits y la cobertura ofrecida por un dispositivo gracias al fenómeno del multicamino. Sin embargo, hemos ajustado las dimensiones físicas de los componentes e incorporado otros, con el fin de mantener un adecuado nivel de adaptación y aislamiento entre las estructuras radiantes de las antenas.

A continuación, con los diseños acabados, éstos se construyeron en tecnología *microstrip* en el Laboratorio de Circuitos Impresos de la Universidad Autónoma de Madrid para finalmente, poder caracterizar sus parámetros fundamentales y compararlos con las simulaciones realizadas.

Finalmente, comprobamos que las antenas cumplían los requisitos fijados. Además, hemos obtenido mejoras tanto en el nivel de adaptación de los diferentes diseños, como en el aislamiento entre sus diferentes componentes en el ancho de banda deseado o excediéndolo.

Palabras clave

Antena, fractal, UWB, MIMO

Abstract

This project looked at the design and implementation of compact antennas with a fractal design that operated in the frequency bandwidth of UWB technology, defined from 3.1 GHz to 10.6 GHz. The limitations of the physical measurements of the antennas were reduced, since these devices were designed with the aim of being able to be installed in mobile communications systems that have limited dimensions in general.

Moreover, the designs were made and optimized on the basis of the results obtained in simulations of the fundamental parameters of the antennas, in order to achieve previously marked requirements.

The design began with the development of a fractal antenna that met the objectives with a bandwidth of UWB and/or greater. Subsequently, starting from this corrected design, the fractal antennas applying MIMO technology were carried out, so that the antennas had multiple radiant elements. This increased the bit rate and coverage offered by the device thanks to the phenomenon of the multi-road. In addition, the physical dimensions of the components were adjusted, and others incorporated, in order to maintain an adequate level of adaptation and insulation between the radiant structures of the antennas.

Once the designs were finished, they were built with microstrip technology in the Printed Circuit Laboratory of the Autonomous University of Madrid, in order to characterize their fundamental parameters and to compare them with the model simulations.

The experiment confirmed the set requirements. Furthermore, improvements were found in both the level of adaptation of the antennas, as well as in the isolation between their different components in the desired bandwidth or exceeding it.

Keywords

Antenna, fractal, UWB, MIMO

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a toda mi familia y amigos por el apoyo y cariño recibido a lo largo de estos años de estudio y formación fuera de mi ciudad natal.

A mi padre José Luis, por enseñarme la importancia de la cultura desde muy pequeño y así impulsarme a estudiar un grado para mi futuro laboral y personal. A mi madre María Isabel, porque desde el primer día ha sido mi maestra acerca de la importancia de la constancia y el tesón en la vida. A ellos, no hay forma posible de darles las gracias por enseñarme los valores realmente importantes en la vida y por todo el trabajo y sacrificio que han hecho para que yo pueda ser la persona que soy.

Además, quiero hacer una mención especial a mi hermano Álvaro y a mi pareja Elena. Ellos han estado siempre a mi lado, en los buenos momentos y, más si cabe aún, en los malos. Porque he vivido situaciones complicadas en las que no veía el camino a seguir, pero ellos siempre me han escuchado, aconsejado, cuidado y ayudado en todo lo posible, tanto en mi vida estudiantil como fuera de ella.

También quiero dar las gracias a mi tutor Bazil por todo lo que me ha enseñado, así como por su apoyo y dedicación en la elaboración de este trabajo.

A todos, gracias de corazón,

Jorge Garrido Uceta

Índice

Índice de figuras	VI
Índice de tablas	IX
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos del proyecto	1
Capítulo 2. Conceptos teóricos sobre antenas	2
2.1. Introducción histórica	2
2.2. Definición de antena	3
2.3. Parámetros básicos de una antena.....	3
2.3.1. Impedancia de entrada	3
2.3.2. Parámetros S	4
2.3.3. Adaptación	5
2.3.4. Aislamiento	5
2.3.5. Ancho de banda.....	6
2.3.6. Banda de trabajo	6
2.4. Tecnología <i>Ultra Wide-Band</i> (UWB).....	6
2.5. Tecnología <i>Multiple-Input Multiple-Output</i> (MIMO)	8
2.6. Tecnología <i>microstrip</i>	8
2.7. Antenas fractales.....	9
Capítulo 3. Diseño	10
3.1. Ancho de banda	10
3.2. Adaptación	10
3.3. Aislamiento.....	10
3.4. Limitaciones físicas	10
3.5. Diseño de antena de un elemento fractal UWB.....	10
3.6. Diseño de antena fractal MIMO de dos elementos UWB	13
3.7. Diseño de antena fractal MIMO de cuatro elementos UWB	16
3.8. Diseño de antena slot fractal de un elemento UWB	20
3.9. Diseño de antena slot fractal MIMO de dos elementos UWB.....	23
3.10. Diseño de antena slot fractal MIMO de cuatro elementos UWB	27
Capítulo 4. Resultados prácticos	32
Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro	40
Bibliografía.....	41
Anexo	A

Índice de figuras

Figura 2.1 Diagrama parámetros S	5
Figura 3.1 Diseño de la antena fractal de un elemento.....	11
Figura 3.2 Parámetro S_{11} de la antena fractal de un elemento.....	12
Figura 3.3 Diseño de la cara superior de la antena final fractal MIMO de dos elementos.....	14
Figura 3.4 Diseño de la cara inferior de la antena final fractal MIMO de dos elementos.....	14
Figura 3.5 Parámetros S_{11} y S_{21} de la antena final fractal MIMO de dos elementos....	15
Figura 3.6 Diseño de la cara superior de la antena fractal MIMO de cuatro elementos	17
Figura 3.7 Diseño de la cara inferior de la antena fractal MIMO de cuatro elementos	18
Figura 3.8 Parámetros S_{11} ; S_{21} ; S_{31} y S_{41} de la antena fractal MIMO de cuatro elementos	19
Figura 3.9 Diseño de la cara superior de la antena slot fractal de un elemento	21
Figura 3.10 Detalle de la cara superior de la antena slot fractal de un elemento	21
Figura 3.11 Diseño de la cara inferior de la antena slot fractal de un elemento.....	22
Figura 3.12 Parámetro S_{11} de la antena slot fractal de un elemento.....	23
Figura 3.13 Diseño de la cara superior de la antena slot fractal MIMO de dos elementos.....	24
Figura 3.14 Detalle de la cara superior de la antena slot fractal MIMO de dos elementos.....	25
Figura 3.15 Diseño de la cara inferior de la antena slot fractal MIMO de dos elementos.....	25
Figura 3.16 Parámetros S_{11} y S_{21} de la antena slot fractal MIMO de dos elementos ...	26
Figura 3.17 Diseño de la cara superior de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos	28
Figura 3.18 Detalle de la cara superior de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos	28
Figura 3.19 Diseño de la cara inferior de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos	29
Figura 3.20 Parámetros S_{11} ; S_{21} ; S_{31} y S_{41} de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos	30
Figura 4.1 Antena fractal de un elemento.....	32
Figura 4.2 Parámetro S_{11} de la antena fractal de un elemento.....	32
Figura 4.3 Antena fractal MIMO de dos elementos	33
Figura 4.4 Parámetro S_{11} de la antena fractal MIMO de dos elementos	33
Figura 4.5 Parámetro S_{21} de la antena fractal MIMO de dos elementos	33
Figura 4.6 Parámetro ECC de la antena fractal MIMO de dos elementos	34
Figura 4.7 Parámetro ganancia de diversidad de la antena fractal MIMO de dos elementos.....	34
Figura 4.8 Antena fractal MIMO de cuatro elementos.....	35

Figura 4.9	Parámetro S_{11} de la antena fractal MIMO de cuatro elementos.....	35
Figura 4.10	Parámetros S_{21} , S_{31} y S_{41} de la antena fractal MIMO de cuatro elementos	35
Figura 4.11	Antena slot fractal de un elemento.....	36
Figura 4.12	Parámetro S_{11} de la antena slot fractal de un elemento.....	36
Figura 4.13	Antena slot fractal MIMO de dos elementos	37
Figura 4.14	Parámetro S_{11} de la antena slot fractal MIMO de dos elementos	37
Figura 4.15	Parámetro S_{21} de la antena slot fractal MIMO de dos elementos	37
Figura 4.16	Parámetro ECC de la antena slot fractal MIMO de dos elementos.....	38
Figura 4.17	Parámetro ganancia de diversidad de la antena slot fractal MIMO de dos elementos.....	38
Figura 4.18	Antena slot fractal MIMO de cuatro elementos.....	39
Figura 4.19	Parámetro S_{11} de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos.....	39
Figura 4.20	Parámetros S_{21} , S_{31} y S_{41} de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos	39
Figura A1.	Diagramas de radiación a 4; 7 y 10 GHz para un elemento.....	A
Figura A2.	Diagramas de radiación a 14 y 19 GHz para un elemento	A
Figura A3.	Plano E y H de radiación a 4 GHz para un elemento.....	B
Figura A4.	Plano E y H de radiación a 7 GHz para un elemento.....	B
Figura A5.	Plano E y H de radiación a 10 GHz para un elemento.....	B
Figura A6.	Plano E y H de radiación a 14 GHz para un elemento.....	C
Figura A7.	Plano E y H de radiación a 19 GHz para un elemento.....	C
Figura A8.	Diseño de la cara superior de la antena fractal MIMO de dos elementos.....	C
Figura A9.	Diseño de la cara inferior de la antena fractal MIMO de dos elementos.....	D
Figura A10.	Parámetros S_{11} y S_{21} de la antena fractal MIMO de dos elementos.....	D
Figura A11.	Diagramas de radiación a 4; 7 y 10 GHz para dos elementos.....	E
Figura A12.	Diagramas de radiación a 14 y 19 GHz para dos elementos.....	E
Figura A13.	Plano E y H de radiación a 4 GHz para dos elementos.....	E
Figura A14.	Plano E y H de radiación a 7 GHz para dos elementos.....	F
Figura A15.	Plano E y H de radiación a 10 GHz para dos elementos.....	F
Figura A16.	Plano E y H de radiación a 14 GHz para dos elementos.....	F
Figura A17.	Plano E y H de radiación a 19 GHz para dos elementos.....	G
Figura A18.	Diagramas de radiación a 4; 7 y 10 GHz para cuatro elementos	G
Figura A19.	Diagramas de radiación a 14 y 19 GHz para cuatro elementos	G
Figura A20.	Plano E y H de radiación a 4 GHz para cuatro elementos	H
Figura A21.	Plano E y H de radiación a 7 GHz para cuatro elementos	H
Figura A22.	Plano E y H de radiación a 10 GHz para cuatro elementos	H
Figura A23.	Plano E y H de radiación a 14 GHz para cuatro elementos	I
Figura A24.	Plano E y H de radiación a 19 GHz para cuatro elementos	I
Figura A25.	Diagramas de radiación a 4; 7 y 10 GHz para un elemento slot.....	I

Figura A26. Diagramas de radiación a 14 y 19 GHz para un elemento slot	J
Figura A27. Plano E y H de radiación a 4 GHz para un elemento slot	J
Figura A28. Plano E y H de radiación a 7 GHz para un elemento slot	J
Figura A29. Plano E y H de radiación a 10 GHz para un elemento slot	K
Figura A30. Plano E y H de radiación a 14 GHz para un elemento slot	K
Figura A31. Plano E y H de radiación a 19 GHz para un elemento slot	K
Figura A32. Diagramas de radiación a 4; 7 y 10 GHz para dos elementos slot	L
Figura A33. Diagramas de radiación a 14 y 19 GHz para dos elementos slot	L
Figura A34. Plano E y H de radiación a 4 GHz para dos elementos slot	L
Figura A35. Plano E y H de radiación a 7 GHz para dos elementos slot	M
Figura A36. Plano E y H de radiación a 10 GHz para dos elementos slot	M
Figura A37. Plano E y H de radiación a 14 GHz para dos elementos slot	M
Figura A38. Plano E y H de radiación a 19 GHz para dos elementos slot	N
Figura A39. Diagramas de radiación a 4; 7 y 10 GHz para cuatro elementos slot	N
Figura A40. Diagramas de radiación a 14 y 19 GHz para cuatro elementos slot	N
Figura A41. Plano E y H de radiación a 4 GHz para cuatro elementos slot	O
Figura A42. Plano E y H de radiación a 7 GHz para cuatro elementos slot	O
Figura A43. Plano E y H de radiación a 10 GHz para cuatro elementos slot	O
Figura A44. Plano E y H de radiación a 14 GHz para cuatro elementos slot	P
Figura A45. Plano E y H de radiación a 19 GHz para cuatro elementos slot	P
Figura A46. Parámetro S_{11} y S_{21} de antena MIMO de dos elementos	P
Figura A47. Parámetros S_{11} ; S_{21} ; S_{31} y S_{41} de antena MIMO de cuatro elementos	Q
Figura A48. Parámetro S_{11} y S_{21} de antena slot MIMO de dos elementos	Q
Figura A49. Parámetros S_{11} ; S_{21} ; S_{31} y S_{41} de antena slot MIMO de cuatro elementos	R
Figura A50. Parámetros S_{11} y S_{21} de antena MIMO de dos elementos hasta 50 GHz	R
Figura A51. Parámetros S_{11} ; S_{21} ; S_{31} y S_{41} de antena MIMO de cuatro elementos hasta 50 GHz	R

Índice de tablas

Tabla 2.1 Bandas de trabajo con sus frecuencias de trabajo	6
Tabla 3.1 Dimensiones de la antena fractal de un elemento	12
Tabla 3.2 Parámetros de los diagramas de radiación a 4; 7; 10; 14 y 19 GHz para un elemento.....	13
Tabla 3.3 Dimensiones de la antena fractal MIMO de dos elementos.....	15
Tabla 3.4 Parámetros de los diagramas de radiación a 4; 7; 10; 14 y 19 GHz para dos elementos.....	16
Tabla 3.5 Dimensiones de la antena fractal MIMO de cuatro elementos.....	18
Tabla 3.6 Parámetros de los diagramas de radiación a 4; 7; 10; 14 y 19 GHz para cuatro elementos	20
Tabla 3.7 Dimensiones de la antena slot fractal de un elemento.....	22
Tabla 3.8 Parámetros de los diagramas de radiación a 4; 7; 10; 14 y 19 GHz para un elemento slot.....	23
Tabla 3.9 Dimensiones de la antena slot fractal MIMO de dos elementos	25
Tabla 3.10 Parámetros de los diagramas de radiación a 4; 7; 10; 14 y 19 GHz para dos elementos slot.....	27
Tabla 3.11 Dimensiones de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos.....	29
Tabla 3.12 Parámetros de los diagramas de radiación a 4; 7; 10; 14 y 19 GHz para cuatro elementos slot	31
Tabla A1. Dimensiones de la antena fractal MIMO de dos elementos	D

Capítulo 1. Introducción

1.1. Motivación

Como consecuencia de la evolución de las comunicaciones a nivel global, en los últimos años se ha producido un continuo desarrollo tecnológico debido a la necesidad de transmitir cada vez más información en el menor tiempo posible, para así conseguir sistemas de comunicaciones prácticamente instantáneos y más completos. Actualmente, se incentiva la comunicación en frecuencias cada vez mayores, es por ello por lo que la tecnología *Ultra Wide-Band* (UWB) es muy interesante, ya que es una tecnología contrastada en diferentes ámbitos de la comunicación con un gran ancho de banda, además de un nivel de interferencia bajo. Por otro lado, las formas fractales en el diseño de antenas aportan una ganancia considerable con escasa dependencia respecto de la frecuencia, así como un patrón de radiación estable en un amplio rango frecuencial. Además, gracias a la utilización de la tecnología *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), se consigue una mayor tasa de transmisión de bits debido al aprovechamiento de la propagación multirrayecto, pudiendo así incrementar el número de conexiones en un mismo punto al aumentar la capacidad de caudal efectivo; así como disminuir la probabilidad de error.

Debido a estos motivos, la implementación de diseños de antenas fractales junto con la tecnología UWB y la tecnología MIMO, consigue una mayor ganancia en un amplio rango frecuencial y transmitir un mayor número de datos de manera más fiable en un mismo periodo de tiempo. Esto, permite soportar más conexiones simultáneas en un mismo punto por lo que el coste de la red se reduce considerablemente.

Como consecuencia de estas ventajas, el desarrollo e implementación de antenas fractales UWB con tecnología MIMO puede ser útil en sistemas de comunicaciones inalámbricas de uso masivo como *WiFi* o *Long Term Evolution* (LTE).

1.2. Objetivos del proyecto

Los objetivos son realizar el diseño e implementación de antenas fractales UWB MIMO de dos y cuatro elementos. Para ello, primero diseñamos e implementamos una antena fractal individual UWB para, posteriormente, desarrollar de manera simétrica las antenas MIMO a partir de la unitaria.

Los objetivos de dichas antenas son cubrir la banda de trabajo típica de una antena UWB, que comprende entre 3.1 GHz hasta los 10.6 GHz, incrementando este rango de trabajo dentro de lo posible.

Para los diseños y simulaciones de las antenas se usa el software específico disponible en la Escuela Politécnica Superior (EPS) llamado “CST”. La fabricación de los diseños se realiza en el Laboratorio de Circuitos Impresos de la EPS y la medición de sus parámetros más relevantes, en el laboratorio C-103.

Capítulo 2. Conceptos teóricos sobre antenas

En este capítulo se expone una breve introducción histórica sobre el desarrollo de las comunicaciones, además de algunos de los conceptos más importantes en la caracterización de los dispositivos radiantes y las tecnologías usadas en el diseño e implementación de nuestras antenas.

2.1. Introducción histórica

El comienzo de la comunicación electrónica tiene lugar en 1844 cuando, a través de la primera línea de transmisión telegráfica existente entre las ciudades de Washington y Baltimore, se transmitió el primer mensaje en código Morse. ¹

Sin embargo, los fundamentos de la teoría electromagnética moderna en los que se basan los sistemas de comunicación vía transmisión de ondas electromagnéticas fueron formulados por James Clerk Maxwell en 1873, cuando publicó la primera teoría unificada sobre el electromagnetismo. En esta teoría Maxwell postuló la naturaleza electromagnética de la luz y la propagación de ondas de carácter electromagnético a partir de consideraciones exclusivamente matemáticas. ¹

Posteriormente, entre 1885 y 1887, Oliver Heaviside reformuló esta teoría eliminando complejidades matemáticas e introduciendo la notación vectorial, consiguiendo así, un fondo para su uso en aplicaciones prácticas de ondas guiadas y líneas de transmisión. Más tarde, entre 1887 y 1991, el profesor de física Heinrich Hertz realizó una serie de experimentos que ratificaron la teoría electromagnética de Maxwell. ²

Pocos años más tarde, gracias a la invención de las antenas y los radiosistemas por parte de Heinrich Hertz y su posterior desarrollo, Marconi obtuvo la primera patente británica de un sistema completo de telegrafía inalámbrica en 1897 y, a continuación, en 1901 realizó la primera transmisión de radio transatlántica. Este hecho produjo un estallido en el estudio y desarrollo de las comunicaciones por radio que, en aquel momento, trabajaban en el rango de las altas a las muy altas frecuencias (3 – 300 MHz), ya que no se tenían fuentes fiables que trabajasen de manera estable en el rango frecuencial de las microondas (GHz). ^{1,2}

Con el estallido de la Segunda Guerra Mundial, se comienzan a realizar numerosos estudios y avances acerca de la teoría y la tecnología en el campo de las microondas. Durante estos años se usaron guías de onda abiertas para alimentar antenas como bocinas o reflectores. Estos prototipos, diseñados originalmente a finales del siglo XIX, fueron concebidos como experimentos cuyo fin eran demostrar las teorías de Maxwell. Estos sistemas que trabajaban en frecuencias de microondas fueron usados militarmente, y debido a su practicidad, comenzaron a implementarse posteriormente para comunicaciones fijas de radio. ¹

Desde los años sesenta hasta la actualidad, los incesantes avances en la arquitectura y tecnología de computación han dado como resultado los programas software actuales para el diseño y simulación de antenas de forma virtual. Mediante estas herramientas, podemos analizar con gran exactitud los cambios en los diseños, evitando la metodología anterior de “cortar y probar”. Como consecuencia, se han optimizado los costes debido al ahorro en la construcción de los distintos prototipos previos al diseño final.

2.2. Definición de antena

Las señales eléctricas pueden transmitirse entre emisor y receptor mediante una línea de transmisión que requiere de una guía física que encierre sus campos y sus energías electromagnéticas, como por ejemplo en cables coaxiales; o bien, mediante el espacio libre usando antenas en ambos puntos de la comunicación.

Según el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), se define el concepto de antena como “aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas”. Por lo tanto, el propósito de las antenas es que, a diferencia de las comunicaciones mediante líneas de transmisión, las señales eléctricas y sus energías electromagnéticas se transporten a grandes distancias fuera del dispositivo en sí, esto se denomina irradiar o radiar. ¹

Las antenas son claves en los sistemas de comunicaciones, ya sean como elementos transmisores, funcionando como convertidores de una onda guiada en una línea de transmisión en una onda de carácter electromagnético transmitida por el espacio libre, para así enviar una señal de información; o como elementos receptores, funcionando de la manera contraria en el proceso de transformación de ondas electromagnéticas. ¹

2.3. Parámetros básicos de una antena

En este apartado describiremos los distintos parámetros que caracterizan a una antena con el fin de poder analizar su funcionamiento dentro del sistema de comunicación.

2.3.1. Impedancia de entrada

Una antena es un dispositivo con al menos un puerto, por lo que tiene una impedancia de entrada definida por la razón entre el voltaje y la corriente en su puerto de entrada. La impedancia de una antena tiene una parte real y otra imaginaria que dependen de la frecuencia; sin embargo, otros objetos cercanos, la fuente de excitación u otras antenas pueden variar su valor. ³

$$Z_{ant} = R_{ant} + j X_{ant}$$

Donde la parte real de la impedancia de entrada (R_{ant}) se compone a su vez de: ³

$$R_{\text{ant}} = R_{\text{rad}} + R_{\text{per}}$$

R_{rad} es la resistencia de radiación. Se define R_{rad} como el valor de la resistencia que disiparía la energía que radia la antena hacia el espacio libre.³

R_{per} es la resistencia de pérdidas. Simboliza las pérdidas de energía en forma de calor producidas en la antena y en los conductores y/o materiales dieléctricos. Generalmente, R_{per} es mucho menor que R_{rad} , pero en los casos en los que la antena tiene dimensiones físicas mucho menores que una longitud de onda, R_{per} tiene un valor relevante.³

Debido a las pérdidas acaecidas en la antena, la potencia entregada por la antena no es la misma que la potencia entregada a la antena, por lo que podemos definir la eficiencia de radiación de la antena como la ratio entre la potencia radiada de forma ideal, es decir sin pérdidas, y la potencia transmitida realmente:¹

$$\eta_{\text{rad}} = \frac{P_{\text{rad, ideal}}}{P_{\text{rad, real}}} = \frac{\frac{1}{2} I^2 R_{\text{rad}}}{\frac{1}{2} I^2 R_{\text{rad}} + \frac{1}{2} I^2 R_{\text{per}}} = \frac{R_{\text{rad}}}{R_{\text{rad}} + R_{\text{per}}}$$

Por otro lado, la reactancia de la impedancia de entrada de la antena (X_{ant}) simboliza la densidad de potencia reactiva acumulada en las zonas cercanas a la antena. Cuando la impedancia de entrada de la antena es puramente real a una frecuencia f_0 se dice que la antena es resonante a dicha frecuencia.³

2.3.2. Parámetros S

Debido a que las antenas se pueden representar como circuitos con dos puertos, donde el primero es la alimentación de la antena con un valor característico, definido por nosotros, de 50Ω ; y el segundo puerto, es el elemento radiante en sí; es muy conveniente utilizar la matriz de parámetros S (*Scattering*) para su parametrización al tratarse, en nuestro caso, de circuitos de microondas que trabajan en órdenes altos de frecuencia.

La matriz de parámetros S se basa en relacionar las ondas de potencia reflejadas e incidentes en puntos concretos del circuito, por lo que es práctica para analizar el comportamiento de un circuito a cualquier frecuencia de trabajo.²

En la siguiente figura de un circuito de dos puertos, se representan ondas reflejadas que van en sentido saliente del circuito denominadas “ b_i ”, siendo el valor de “ i ” el puerto donde se halla dicha onda. De la misma forma, también se muestran ondas incidentes al circuito denominadas “ a_i ” con “ i ” indicando el puerto donde se encuentran.²



Figura 2.1 Diagrama parámetros S ²

En este ejemplo, las ecuaciones que relacionan sus ondas reflejadas e incidentes son las siguientes:

$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$$

El cálculo de los parámetros S se realiza cargando todos los puertos del circuito con su impedancia de referencia menos el puerto “i” en el que se carga un generador de onda incidente. De esta manera obtenemos que los parámetros S de la forma: ²

- S_{ii} son los parámetros de reflexión, es decir, la potencia reflejada vista en el puerto de excitación cuando el otro es cargado con su impedancia de referencia. ²
- S_{ji} son los parámetros de transmisión, es decir, la potencia entregada en el puerto j cuando el puerto de excitación es el i. ²

2.3.3. Adaptación

Habitualmente la antena está alimentada por un generador por medio de una línea de transmisión. Por ello debemos prestar especial atención a los parámetros relacionados con la adaptación de nuestra antena, ya que nos interesa que esté lo mejor adaptada posible al generador. Una correcta adaptación hace que la antena radie con el menor número de pérdidas posibles, además estas pérdidas se producen en forma de potencia reflejada al generador. Esto podría ocasionar daños en la fuente, especialmente en los casos en que las potencias de transmisión necesarias fueran elevadas.

Por estas razones, el parámetro S_{ii} es de vital importancia ya que es el parámetro de reflexión en el puerto “i”; en otras palabras, nos indica la cantidad de potencia reflejada en este puerto cuando se estimula éste, por lo que nos marca el nivel de adaptación de la antena diseñada. ²

2.3.4. Aislamiento

Asimismo, también son de gran interés los parámetros relacionados con el aislamiento entre puertos de nuestra antena. Por esto, los parámetros S_{ji} nos serán muy útiles, puesto que son los parámetros de transmisión, dicho de otro modo, nos proporcionan

información sobre la cantidad de potencia entregada a un puerto cuando se excita el otro con el generador de onda incidente; por lo que, estos parámetros nos informan sobre el nivel de aislamiento entre los diferentes elementos de la antena. ²

2.3.5. Ancho de banda

Definimos ancho de banda como el margen existente entre la frecuencia inicial y la frecuencia final al que la antena está adaptada de manera que se cumplan los requisitos deseados. De manera que:

$$BW = f_{\max} - f_{\min}$$

En nuestro caso, hemos estipulado que para que la antena sea competente el nivel de adaptación de la antena, indicado por el parámetro S_{ii} , debe ser menor o igual que -10 dB; y el de aislamiento, representado por los parámetros S_{ji} , menor o igual que -20 dB; por lo que nuestro ancho de banda será la diferencia entre la frecuencia máxima y mínima que cumplan estos requisitos.

2.3.6. Banda de trabajo

El espectro frecuencial se divide en bandas. Cada una de éstas da pie a desarrollos de antenas totalmente diferentes dependiendo del ancho de banda en el que trabajen correctamente. A continuación, se adjunta las bandas de trabajo frecuenciales más importantes.

Tabla 2.1 Bandas de trabajo con sus frecuencias de trabajo ²

Banda	Nombre	Frecuencia
ELF	Extremely Low Frequency	< 3 kHz
VLF	Very Low Frequency	3 – 30 kHz
LF	Low Frequency	30 – 300 kHz
MF	Medium Frequency	0.3 – 3 MHz
HF	High Frequency	3 – 30 MHz
VHF	Very High Frequency	30 – 300 MHz
UHF	Ultra High Frequency	0.3 – 3 GHz
SHF	Super High Frequency	3 – 30 GHz
EHF	Extremely High Frequency	30 – 300 GHz

2.4. Tecnología *Ultra Wide-Band* (UWB)

Las señales UWB se caracterizan por tener un ancho de banda de al menos 500 MHz o tener un ancho de banda mayor que un 20% de la frecuencia central de diseño. Como consecuencia de este gran ancho de banda, las señales UWB son muy utilizadas en el campo militar, como por ejemplo en dispositivos radar; o en el ámbito civil, donde son ampliamente utilizadas en sistemas de comunicaciones. ⁴

El gran ancho de banda de los sistemas UWB permite una tasa de transmisión alta, esto es, capacidad de transmitir más información en un mismo periodo de tiempo, alcance de alta precisión y por consiguiente es posible la geolocalización. Este hecho hace que estos sistemas de comunicaciones también sean muy usados en comunicaciones de emergencias.⁵

Adicionalmente, los sistemas UWB son muy útiles ya que, al emitir niveles muy reducidos de potencia distribuidos por rangos frecuenciales muy extensos, necesitan potencias muy bajas para la transmisión y, como consecuencia, las interferencias producidas en otros sistemas de comunicación sean desdeñables a pesar de que las señales compartan el ancho de banda en el que se transmiten.⁵

El rango frecuencial de los sistemas UWB está regulado de tal forma que cada país define un espectro donde se deben desarrollar para que puedan ser operantes. Los dos organismos más importantes que los regulan son la *Federal Communications Commission* (FCC) en los Estados Unidos, y la *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations* (CEPT) en la Unión Europea.⁶

El organismo norteamericano define que para comunicaciones *indoor* la densidad espectral de potencia máxima es de -41.3 dBm/MHz en la banda frecuencial de los 3.1 GHz hasta los 10.6 GHz.⁶

Dependiendo de la banda donde trabajan los sistemas UWB, la FCC distingue diferentes aplicaciones entre las que destacan:

- Radares de penetración de suelo y pared: deben trabajar con un ancho de banda UWB por debajo de 10.6 GHz. Se usan en aplicaciones de seguridad pública, investigación de carácter científico, construcción o minería.⁷
- Sistemas de vigilancia: con un ancho de banda entre 1.99 GHz y 10.6 GHz.⁷
- Sistemas de imágenes médicas: deben tener un ancho de banda entre los 3.1 GHz y los 10.6 GHz. Sólo pueden ser usados por un profesional sanitario autorizado.⁷
- Sistemas radar vehiculares: deben operar exclusivamente con activación específica. Su rango frecuencial de trabajo debe ser entre 22 y 29 GHz.⁷
- Sistemas *indoor*: con esta nomenclatura se hace referencia a que estos sistemas no pueden utilizarse en espacios exteriores. Sólo pueden transmitir a un receptor asociado y son sistemas de corto alcance.⁷

Igualmente, en los sistemas UWB, debido a su gran ancho de banda el efecto de pérdidas por propagación se modifica no sólo con la distancia entre el emisor y el receptor, sino que también con la frecuencia, episodio que no ocurre con sistemas con un ancho de banda pequeño donde las pérdidas por propagación dependen exclusivamente de la distancia entre emisor y receptor en la práctica.⁶

2.5. Tecnología *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO)

Hasta los años 90, la propagación multicamino era valorada como una dificultad en las comunicaciones por radio, no obstante, durante esta década la Universidad de Stanford y los Laboratorios Bell evidenciaron que este fenómeno podía ser utilizado para elevar la capacidad de los sistemas de comunicaciones inalámbricos.⁸

Debido al aumento incesante de los volúmenes de datos, así como de los usuarios conectados en las comunicaciones en los últimos años; la tecnología basada en varias antenas tanto en el emisor como en el receptor se ha desarrollado con el fin de resolver dichas demandas.⁸

Los sistemas MIMO mejoran sustancialmente el rendimiento de cualquier sistema de comunicaciones inalámbrico, ya que se benefician de la transmisión multicamino al establecer un “cable” para cada señal transmitida por un camino diferente. Al poseer diferentes elementos radiantes distanciados entre sí, se tiene un mayor número de caminos para las señales y, por tanto, un mayor número de “cables aparentes” por los que enviar información. Este hecho hace que el caudal efectivo incremente al poder transmitir una mayor cantidad de datos de manera simultánea por varios caminos. Al ampliar la capacidad de transmisión del sistema, también aumenta el número de usuarios que pueden estar conectados a la red simultáneamente. Además, al tener la posibilidad de distintos caminos de propagación de la información, se consigue reducir la probabilidad de error en la comunicación.⁸

Asimismo, al tener más antenas distribuidas en un área mayor, incrementaremos el radio de cobertura de comunicación. Como consecuencia de poder dar servicio a más clientes y una mayor cobertura con un mismo dispositivo, se reducen notablemente los costes de la red.⁸

La tecnología MIMO se desarrolla para mejorar las comunicaciones inalámbricas centradas actualmente en las comunicaciones móviles como el 4G, en sistemas *Wireless Metropolitan Area Networks* (WMAN) como el WiMAX y en sistemas *Wireless Local Area Network* (WLANs) como el WiFi. Siendo crucial en la consecución de mayores tasas de bits, mayor alcance y una alta fiabilidad para resolver todos los problemas generados por el aumento de la demanda de comunicaciones en un mundo cada vez más digitalizado y comunicado.⁹

2.6. Tecnología *microstrip*

A mediados del siglo XX los circuitos impresos para microondas usaban *striplines* que consistían en líneas conductoras envueltas de un material dieléctrico homogéneo con una capa metálica o metalizada, tanto en la parte superior como en la parte inferior, que estaban conectadas a tierra. Este sistema soporta un modo TEM que en la práctica propaga la mayoría de los campos en el interior del material dieléctrico.^{10,2}

A partir de esta tecnología, se desarrollaron las líneas *microstrip* que se diferencian de las *striplines* en que la línea conductora queda expuesta al exterior en la parte superior, eliminando así el dieléctrico que la cubría, así como el plano metálico superior conectado a masa. Al ser *microstrip* una tecnología abierta y, debido a que los materiales usados como sustratos tenían bajas permitividades, las pérdidas por radiación eran considerables, y por ello, tardó años en ganar importancia. Además, en la práctica las líneas *microstrip* usan sustratos finos y, en consecuencia, los campos son propagados en modo cuasi-TEM, ya que cuando se transmiten no están todos contenidos en un dieléctrico homogéneo. ^{10, 2}

No obstante, debido a la evolución tecnológica se han conseguido nuevos materiales para sustratos con menos pérdidas, por lo que la aplicación de la tecnología *microstrip* en el diseño e implementación de antenas se ha visto potenciada en gran medida. La utilización de esta tecnología permite miniaturizar las antenas y mantener una buena relación entre costes y resultados obtenidos. ¹⁰

2.7. Antenas fractales

En los últimos años, la geometría fractal está siendo estudiada en diferentes ámbitos científicos entre los cuales se encuentra el diseño de antenas para telecomunicaciones donde la aplicación de las ecuaciones de Maxwell es complicada y está en continuo desarrollo.

Se define el concepto de fractal como un objeto geométrico cuya forma elemental se repite en distintas escalas de forma fraccionada o supuestamente irregular. Algunas de las principales propiedades de los fractales son: ¹¹

- Autosemejanza: el objeto contiene copias con escalas menores de sí mismo. ¹¹
- Dimensión fraccionaria: los objetos están en dimensiones que pueden ser fraccionarias. ¹¹
- No derivabilidad: al ser fraccionarios y discontinuos los fractales carecen de derivada. ¹¹

Estas características de las formas fractales aplicadas en el diseño de antenas, hacen que pueda aumentar el ancho de banda de trabajo entre una décima parte y la mitad respecto a la frecuencia central superior de las antenas de diseño convencional. Asimismo, se mejora la estabilidad de los patrones de radiación, con ganancias considerables con escasa dependencia de la frecuencia en grandes rangos frecuenciales, así como se incrementan el número de bandas de trabajo de las antenas. ¹¹

A causa del incesante incremento de las comunicaciones inalámbricas con sus respectivas demandas como un mayor ancho de banda, mayor número de usuarios conectados, etc. Las antenas fractales han sido utilizadas en mayor medida, ya que constituyen una solución efectiva y económica. Actualmente, son usadas ampliamente en sistemas de comunicaciones móviles (antenas en teléfonos móviles), sistemas de microondas (receptores de radio) y en comunicaciones marítimas, de navegación aérea o militares. ¹¹

Capítulo 3. Diseño

En este capítulo se definen los requisitos y objetivos fijados para el diseño de nuestras antenas. Posteriormente, se muestran los diferentes diseños con sus respectivas simulaciones de parámetros S, al igual que sus diagramas de radiación adjuntados en el anexo de este trabajo.

3.1. Ancho de banda

En nuestro diseño queremos antenas con ancho de banda UWB, por lo que debemos conseguir un ancho de banda entre los 3.1 GHz hasta al menos 10.6 GHz intentando incrementar el rango de trabajo todo lo posible. Este rango frecuencial está definido para las antenas UWB por la FCC.

3.2. Adaptación

Asimismo, para este diseño de antenas se considera que están correctamente adaptadas si su espectro UWB se encuentra por debajo de los -10 dB en sus coeficientes de reflexión.

3.3. Aislamiento

En el caso de las antenas fractales MIMO UWB, además de cumplir el requisito de reflexión descrito anteriormente, perseguimos que el nivel de aislamiento esté por debajo de los -20 dB entre los distintos elementos en su ancho de banda, a pesar de que con un aislamiento por debajo de los -15 dB sería aceptable debido a la cercanía de los elementos.

3.4. Limitaciones físicas

Al diseñar antenas fractales UWB con la finalidad de que puedan ser utilizadas en comunicaciones inalámbricas, decidimos imponer las siguientes medidas máximas:

- Antena fractal MIMO de dos elementos: 40 x 70 mm
- Antena fractal MIMO de cuatro elementos: 90 x 70 mm

Elegimos estos tamaños para que los diseños pudieran ser insertados en sistemas de comunicaciones móviles. Todos ellos caracterizados por contar con dimensiones reducidas de en torno a 140 x 70 mm. No obstante, en nuestros diseños no se supera ninguna de estas dimensiones. No hemos definido limitaciones longitudinales en la antena fractal de un elemento, ya que la usamos para diseñar las antenas fractales MIMO.

3.5. Diseño de antena de un elemento fractal UWB

En primer lugar, diseñamos la antena fractal de un elemento con un ancho de banda UWB. Para ello hemos utilizado la tecnología *microstrip* con un sustrato de material FR-4 con capa inferior y superior de metal conductor de 0.03 mm de espesor. El material dieléctrico

está caracterizado por un espesor de 1.6 mm, una permeabilidad magnética relativa de $\mu_r=1$, una permitividad eléctrica relativa de $\epsilon_r=4.3$ y una tangente de pérdidas de $\tan\delta=0.025$.

En la fase de diseño buscamos que se consiguieran los objetivos fijados de valor de $S_{ii} \leq -10$ dB y, además, que el espectro frecuencial donde esto se cumpliera estuviera entre los 3.1 GHz y los 10.6 GHz, para así tener un elemento radiante con un ancho de banda propio de la tecnología UWB.

Una vez conseguido esto, intentamos mejorar el diseño con el fin de aumentar la banda de trabajo lo máximo posible, teniendo como meta los 20 GHz de valor frecuencial máximo a partir del cual $S_{ii} \geq -10$ dB.

La forma fractal diseñada consiste en un elemento radiante circular de radio R con un hueco concéntrico al elemento de radio $R_{h1}=0.4*R$ y, a su vez, con otros cuatro huecos menores, con centros en los puntos centrales entre el punto final del primer hueco y el final del elemento radiante, tanto en el eje vertical como en el eje horizontal de la estructura radiante, con radio $R_{h2}=0.4*R_{h1}$.

Para alcanzar nuestro requisito fijado de coeficiente de reflexión, diseñamos una alimentación en forma de *taper* para el elemento radiante, puesto que con una línea de transmisión con una anchura constante no conseguíamos una adaptación suficiente en la banda de trabajo deseada.

Asimismo, el hueco o *gap* existente entre la parte superior del plano de masa de la cara posterior y el comienzo de la estructura radiante, mejora el coeficiente de reflexión de la antena, ya que incrementa la eficiencia con la que se propaga la señal introducida desde el conector hasta el elemento radiante.

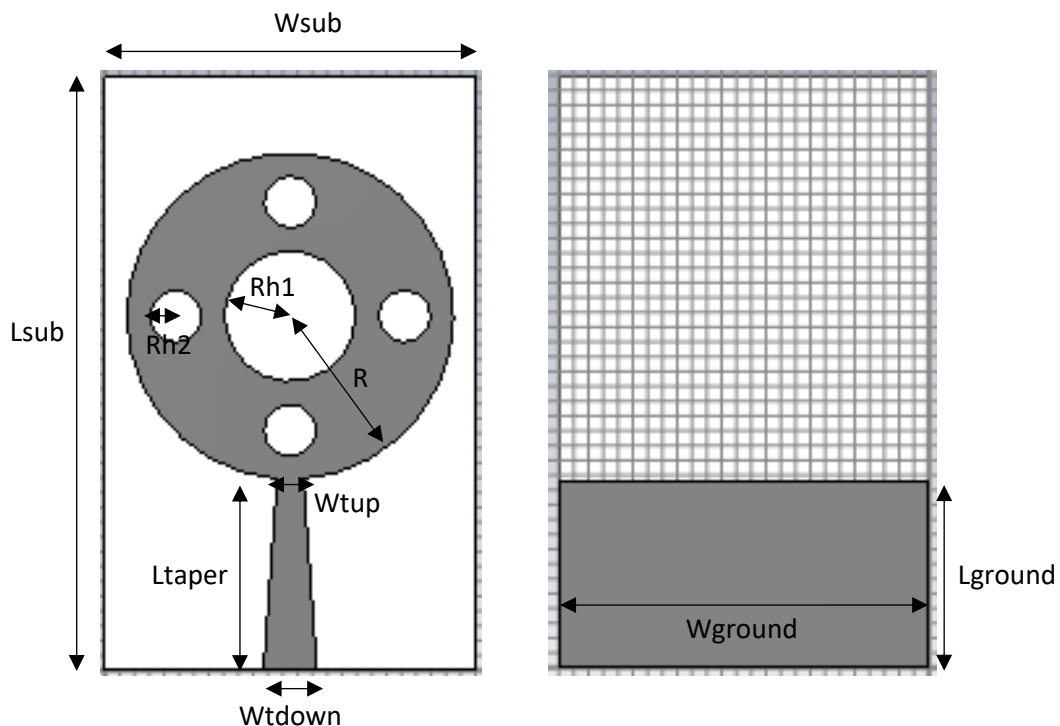


Figura 3.1 Diseño de la antena fractal de un elemento

A continuación, se adjuntan las medidas físicas del elemento radiante fractal UWB:

Tabla 3.1 Dimensiones de la antena fractal de un elemento

Parámetro	mm
Wsub	25
Lsub	40
R	11
Rh1	4.4
Rh2	1.76
gap	0.45
Wtup	1.75
Wtdown	3.6
Ltaper	13
Wground	25
Lground	12.55

Con estas medidas obtenemos la siguiente simulación de parámetros S en CST:

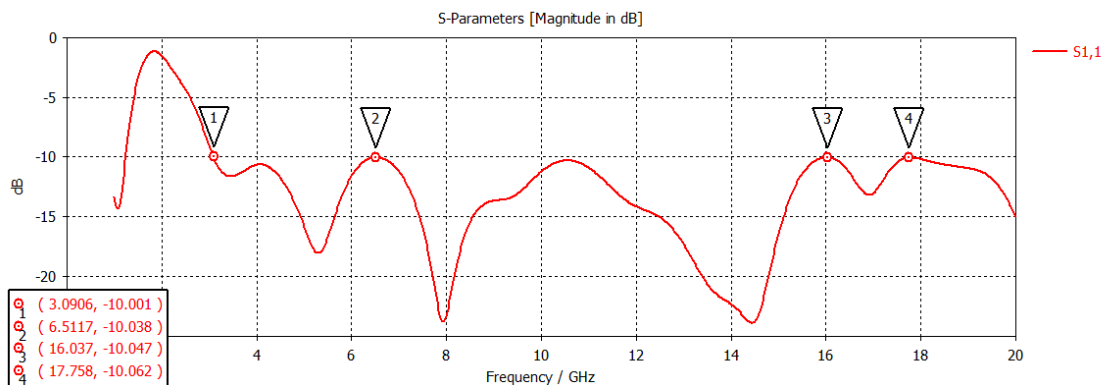


Figura 3.2 Parámetro S_{11} de la antena fractal de un elemento

Podemos observar cómo la frecuencia mínima, a partir de la cual nuestro requisito de adaptación se cumple, es de 3.09 GHz y, además, nuestra banda de trabajo que cumple esto llega hasta los 20 GHz. Debido a esto, podemos dar este diseño del elemento fractal unitario como correcto con un ancho de banda de 16.91 GHz.

Una vez realizado el diseño de la antena fractal, observamos los diagramas de radiación a unas frecuencias de 4; 7; 10; 14 y 19 GHz con el fin de poder cuantificar en la siguiente tabla la directividad, eficiencia de radiación, eficiencia total, ganancia y ganancia realizada a dichas frecuencias de trabajo. (Figura A1-A7)

Tabla 3.2 Parámetros de los diagramas de radiación a 4; 7; 10; 14 y 19 GHz para un elemento

Parámetro de radiación	f = 4 GHz	f = 7 GHz	f = 10 GHz	f = 14 GHz	f = 19 GHz
Directividad	3.103 dBi	4.933 dBi	4.867 dBi	6.357 dBi	6.643 dBi
Eficiencia de radiación (ζ_{rad})	-0.955 dB	-0.950 dB	-1.179 dB	-1.565 dB	-2.770 dB
Eficiencia total (ζ_{tot})	-1.346 dB	-1.292 dB	-1.521 dB	-1.591 dB	-3.132 dB
Ganancia	2.148 dBi	3.983 dBi	3.688 dBi	4.792 dBi	3.873 dBi
Ganancia realizada	1.757 dBi	3.641 dBi	3.346 dBi	4.766 dBi	3.511 dBi

Podemos observar cómo la directividad es la ganancia máxima ideal de la antena, es decir, la ganancia sin valorar las pérdidas que se producen en ésta. En el caso de la ganancia, tenemos en cuenta tanto las pérdidas ocasionadas por el material dieléctrico del sustrato como las producidas por la conductividad del material eléctrico utilizado. En nuestro caso hemos usado material conductor perfecto (PEC) en el programa CST, por lo que no se producen pérdidas a causa de la conductividad en ningún momento. Además, también tenemos la ganancia realizada en la que tenemos en cuenta todas las pérdidas que acontecen en la antena.

3.6. Diseño de antena fractal MIMO de dos elementos UWB

En este apartado, utilizamos como punto de partida el diseño de un elemento fractal UWB duplicándolo para así comenzar el diseño de la antena fractal MIMO de dos elementos UWB. Mediante la función de duplicación en espejo de CST, añadimos el segundo elemento fractal de la antena MIMO con su plano de masa correspondiente. Al hacer esto, también añadimos el sustrato pertinente para que ambas estructuras queden unidas. Al modificar una dimensión de un elemento, ambos elementos cambiarán y, por lo tanto, las estructuras radiantes tienen las mismas medidas.

Para aumentar el nivel de aislamiento entre los dos elementos radiantes, añadimos una barrera vertical de material metálico de la misma altura que el sustrato, tanto en la cara donde se encuentran las estructuras radiantes como en la cara de los planos de masa. Con estas barreras, situadas en el punto central entre los elementos, buscamos reducir todo lo posible la radiación interferente entre las distintas estructuras con el fin de conseguir nuestro requisito previamente definido de aislamiento de $S_{ji} \leq -20$ dB.

En primer lugar, diseñamos una antena con ligeros cambios respecto al de la antena fractal de un elemento, pero manteniendo su forma básica, así como la relación de ésta. Sin embargo, a pesar de que en la simulación del primer diseño podemos observar cómo el objetivo de -10 dB en el coeficiente de reflexión S_{ii} lo conseguimos en todo el espectro frecuencial deseado, obtenemos un nivel de aislamiento $S_{ji} > -20$ dB en la frecuencia de 10.552 GHz, por lo que no cumplimos este requisito en la banda de trabajo de la tecnología UWB. (Figura A8-A10. Tabla A1.)

Por esto, decidimos añadir unas barreras metálicas verticales con forma de “L invertida” en los planos de masa respectivos de cada elemento, para así incrementar la eficiencia de la transmisión de las ondas desde los puertos de entrada hasta los elementos radiantes. Además de funcionar como barreras extras en el plano de masa con el fin de conseguir los requisitos marcados.

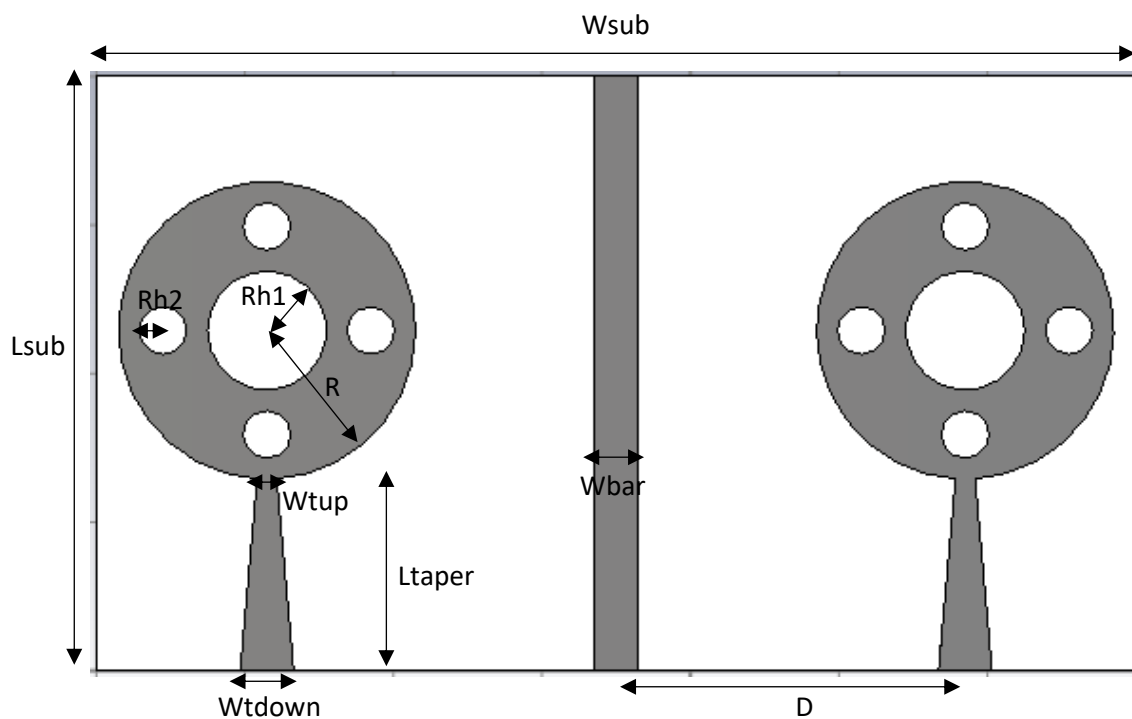


Figura 3.3 Diseño de la cara superior de la antena final fractal MIMO de dos elementos

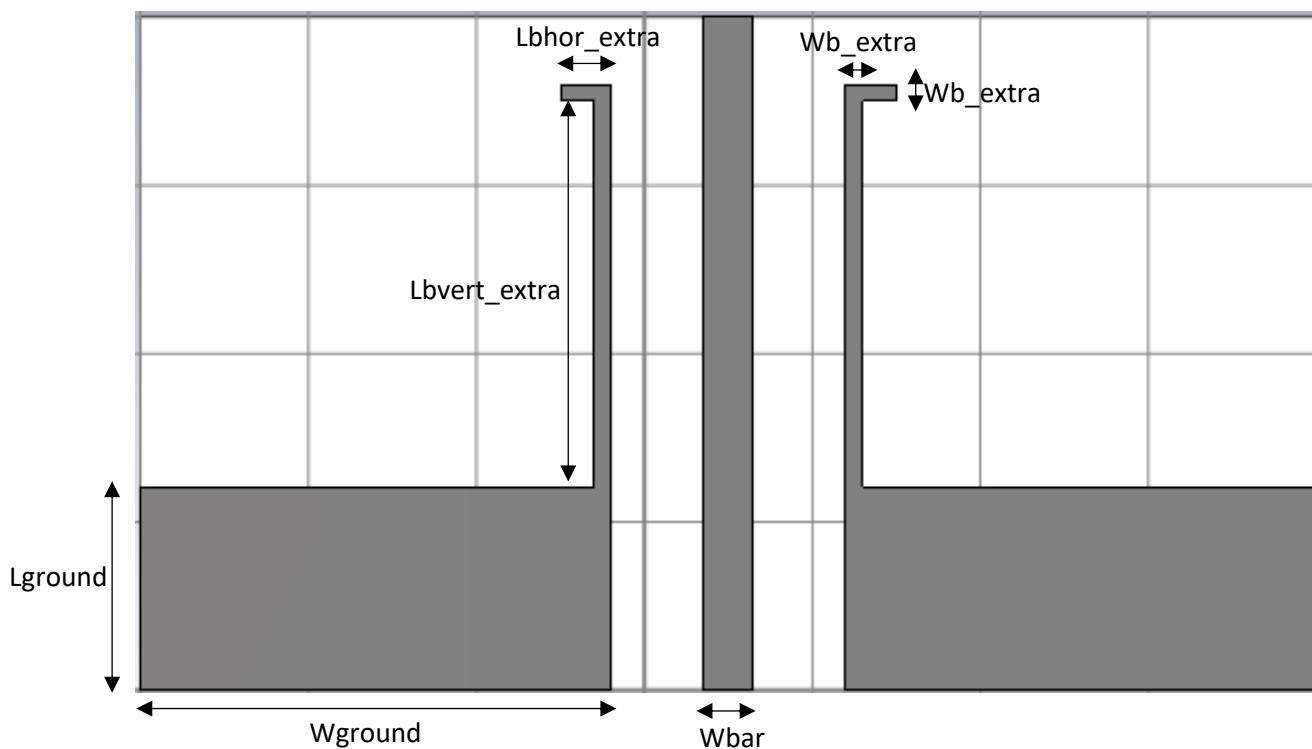


Figura 3.4 Diseño de la cara inferior de la antena final fractal MIMO de dos elementos

A continuación, se adjuntan las medidas físicas de los elementos fractales UWB:

Tabla 3.3 Dimensiones de la antena final fractal MIMO de dos elementos

Parámetro	mm
Wsub	70
Lsub	40
R	10
Rh1	4
Rh2	1.6
gap	0.9
D	23.5
Wtup	1.3
Wtdown	3.6
Ltaper	13
Wground	28
Lground	12.1
Wbar	3
Wb_extra	1
Lbvert_extra	22.9
Lbhor_extra	3

Con estas medidas obtenemos la siguiente simulación de parámetros S en CST:

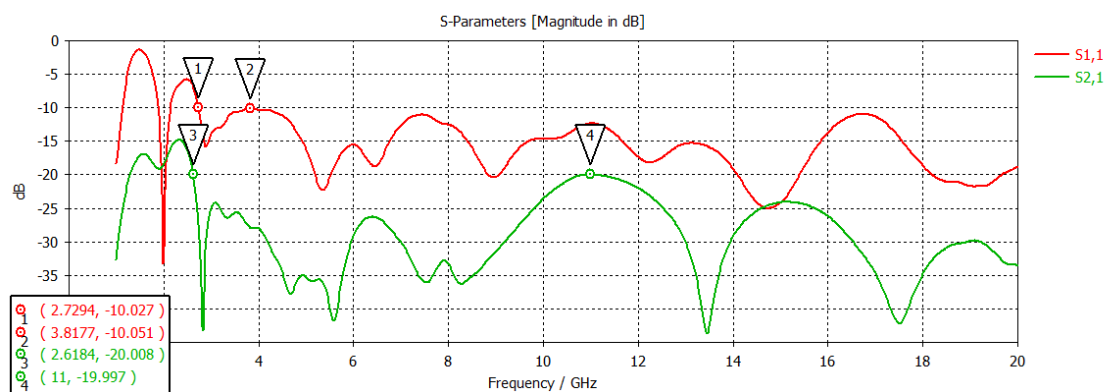


Figura 3.5 Parámetros S_{11} y S_{21} de la antena final fractal MIMO de dos elementos

Podemos observar cómo la frecuencia mínima, a partir de la cual nuestro requisito de adaptación se cumple, es de 2.72 GHz y, además, nuestra banda de trabajo que cumple nuestro objetivo llega hasta los 20 GHz.

En el caso del nivel de aislamiento, observamos como la frecuencia mínima a partir de la cual nuestro requisito se cumple, es de 2.61 GHz y, además, nuestra banda de trabajo que cumple nuestro objetivo llega hasta los 20 GHz, ya que sólo en la frecuencia de 11 GHz, que queda fuera del rango frecuencial UWB inicial (3.1-10.6 GHz), el coeficiente S_{ji} es de $-19.997 \text{ dB} \approx -20 \text{ dB}$.

Podemos concluir que, al cumplirse los objetivos en este último diseño, la antena fractal MIMO de dos elementos es correcta con un ancho de banda de 17.27 GHz.

Una vez realizado el diseño de la antena fractal MIMO de dos elementos UWB, observamos los diagramas de radiación a unas frecuencias de 4; 7; 10; 14 y 19 GHz con el fin de poder cuantificar en la siguiente tabla la directividad, eficiencia de radiación, eficiencia total, ganancia y ganancia realizada a dichas frecuencias de trabajo. En este caso las simulaciones de radiación se han obtenido analizando el puerto 1 ya que, debido a la simetría de la antena, para el puerto 2 serían idénticas, pero al revés. (Figura A11-A17)

Tabla 3.4 Parámetros de los diagramas de radiación a 4; 7; 10; 14 y 19 GHz para dos elementos

Parámetro de radiación	f = 4 GHz	f = 7 GHz	f = 10 GHz	f = 14 GHz	f = 19 GHz
Directividad	3.995 dBi	6.494 dBi	5.828 dBi	6.331 dBi	6.771 dBi
Eficiencia de radiación (ζ_{rad})	-1.024 dB	-0.863 dB	-1.245 dB	-1.689 dB	-2.913 dB
Eficiencia total (ζ_{tot})	-1.448 dB	-1.116 dB	-1.416 dB	-1.748 dB	-2.946 dB
Ganancia	2.971 dBi	5.631 dBi	4.583 dBi	4.642 dBi	3.858 dBi
Ganancia realizada	2.547 dBi	5.378 dBi	4.412 dBi	4.583 dBi	3.825 dBi

Podemos observar cómo los diagramas de radiación son parecidos a los obtenidos en el diseño de la antena de un elemento, sin embargo, apreciamos un aumento en las ganancias, ya que parte de la transmisión en dirección al segundo componente radiante se escapa en otras direcciones produciéndose así un incremento en las ganancias.

3.7. Diseño de antena fractal MIMO de cuatro elementos UWB

En el caso del diseño de la antena fractal MIMO de cuatro elementos, hemos utilizado la antena fractal MIMO de dos elementos correcta previamente diseñada. De nuevo, mediante la función de duplicación en espejo de CST, añado los elementos superiores izquierdo y derecho de la antena fractal MIMO con sus planos de masa correspondientes. Al hacer esto, también añadimos el sustrato pertinente para unir los cuatro elementos bajo el mismo sustrato. Al modificar una dimensión de un elemento todos los elementos cambiarán, y por lo tanto todas las estructuras radiantes tienen las mismas medidas.

Para aumentar el nivel de aislamiento entre los elementos radiantes, añadimos una barrera horizontal de material metálico de la misma anchura que el sustrato entre los elementos superiores e inferiores, tanto en la cara donde se encuentran las estructuras radiantes como en la cara de los planos de masa. Con estas barreras situadas en el punto central entre los elementos inferiores y superiores, buscamos reducir todo lo posible la radiación interferente entre los distintos elementos con el fin de conseguir nuestro requisito de aislamiento de $S_{ji} \leq -20$ dB.

Además, debido a que los resultados en la simulación de los parámetros S en CST no cumplían el requisito de nivel de aislamiento por debajo de -20 dB, hemos añadido unas barreras horizontales extras de mayor anchura en la barrera horizontal superior añadida anteriormente, en las zonas entre los límites superiores de los elementos radiantes inferiores y los límites inferiores de los elementos radiantes superiores. Mediante el ensanchamiento de estas áreas de la barrera horizontal, conseguimos reducir de manera

considerable la cantidad de potencia que se introduce de manera indeseada entre los elementos más próximos.

De igual modo, hemos introducido una barrera metálica con forma de corona circular en el centro de la cara superior, con el fin de aumentar el aislamiento entre los componentes que se encuentran en diagonal, a pesar de que, al existir una mayor distancia entre ellos tienen, de por sí, un mejor nivel de aislamiento.

Gracias a la incorporación de las diferentes barreras y a la modificación de algunas medidas de los demás componentes con el fin de conseguir, tanto un buen nivel de adaptación como de aislamiento, hemos obtenido el siguiente diseño:

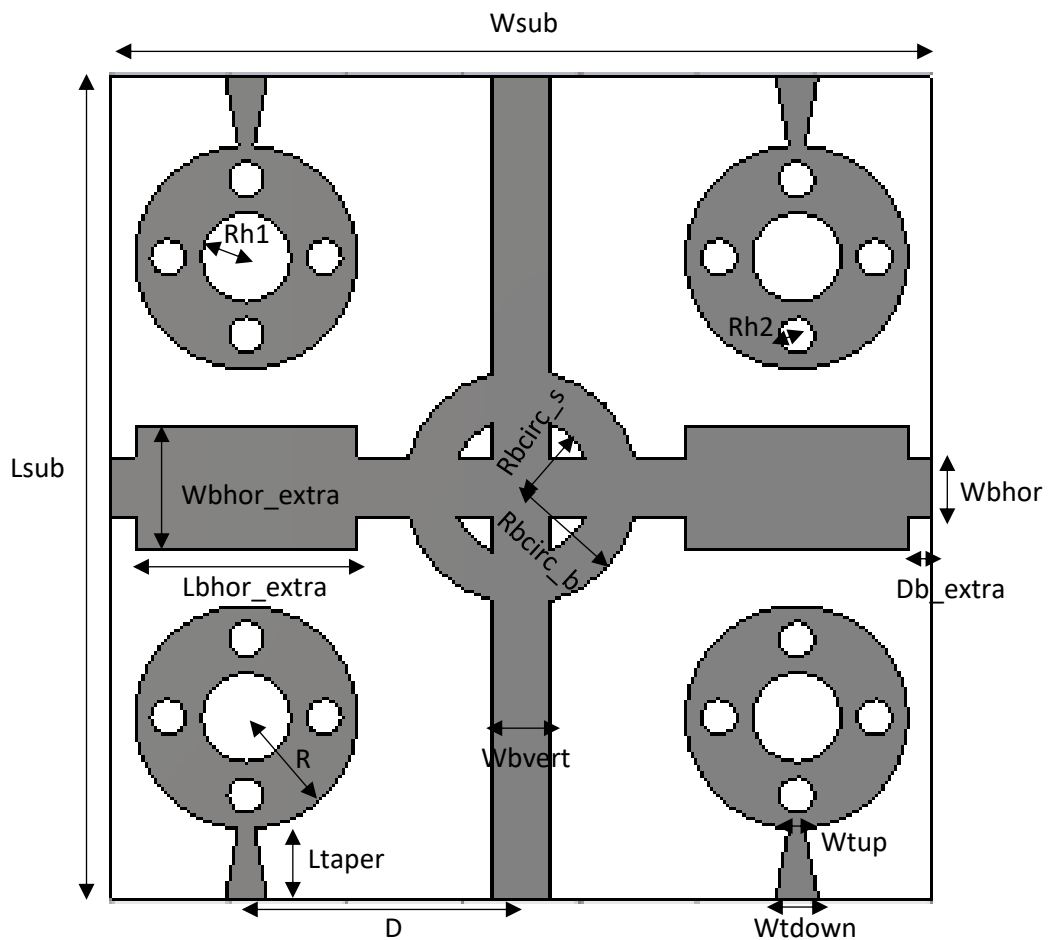


Figura 3.6 Diseño de la cara superior de la antena fractal MIMO de cuatro elementos

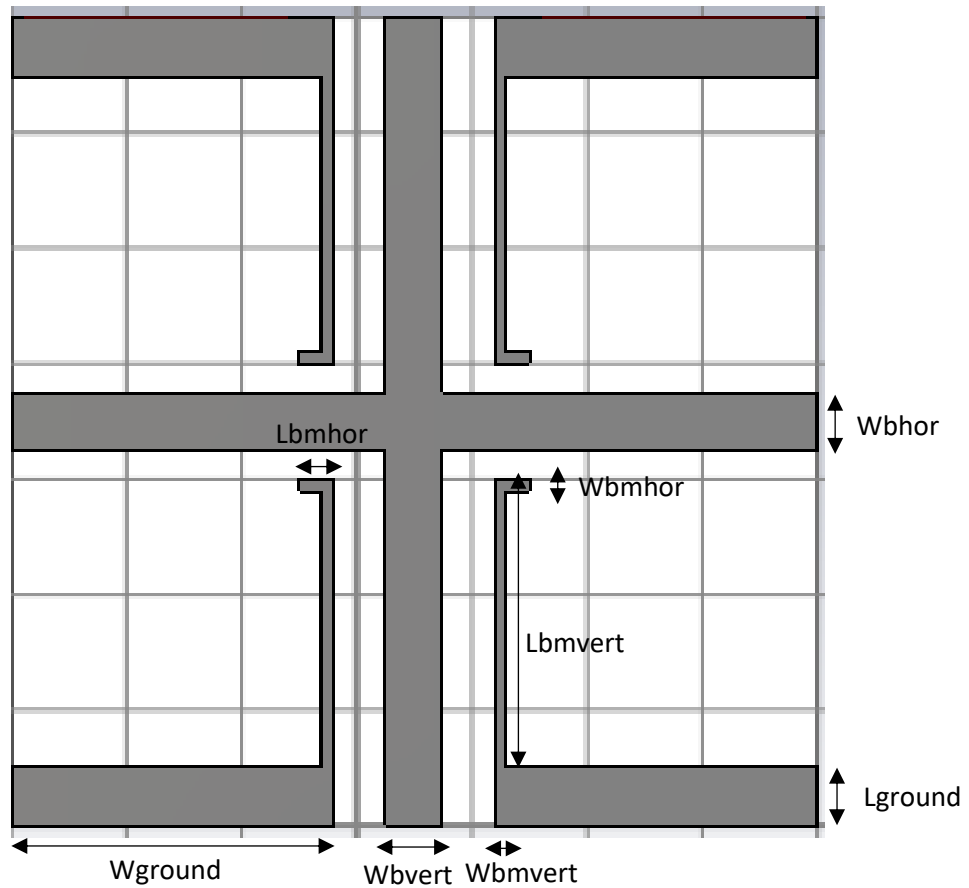


Figura 3.7 Diseño de la cara inferior de la antena fractal MIMO de cuatro elementos

A continuación, se adjuntan las medidas físicas de los elementos fractales UWB:

Tabla 3.5 Dimensiones de la antena fractal MIMO de cuatro elementos

Parámetro	mm
Wsub	70
Lsub	70
R	9.5
Rh1	3.8
Rh2	1.52
gap	0.9
D	23.5
Wtup	1.3
Wtdown	3.6
Ltaper	6
Wbvert	5
Wbhor	5
Wbhor extra	10.5
Lbhor extra	19
Db extra	2
Rbcirc s	6
Rbcirc b	10

Wground	28
Lground	5.1
Wbmvert	1
Lbmvert	24.9
Wbmhor	1
Lbmhor	3

Con estas medidas obtenemos la siguiente simulación de parámetros S en CST:

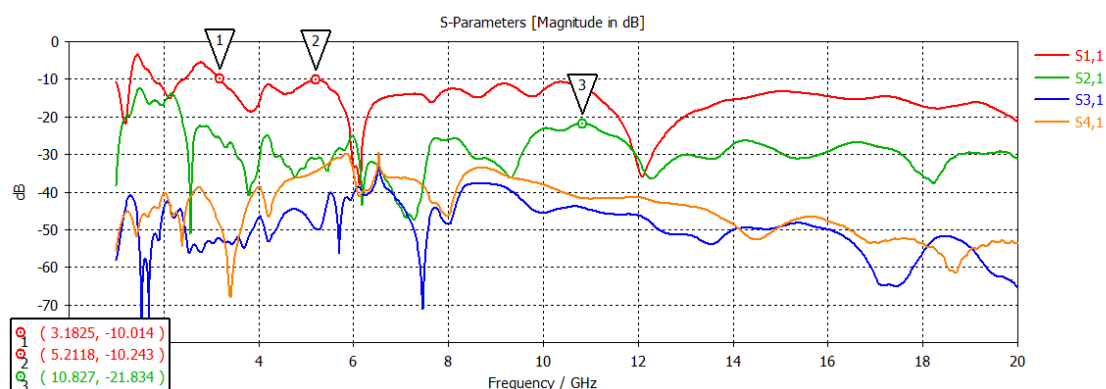


Figura 3.8 Parámetros S_{11} ; S_{21} ; S_{31} y S_{41} de la antena fractal MIMO de cuatro elementos

Como podemos observar respecto al nivel de adaptación de la antena, cumplimos nuestro requisito de -10 dB en la banda de trabajo UWB y, además, también hemos conseguido nuestra meta de alcanzar los 20 GHz con este límite de coeficiente de reflexión.

Con respecto a los niveles de aislamiento entre los distintos elementos que componen la antena, podemos ver que conseguimos bajar de los -20 dB en todos los coeficientes S_{ji} en el espectro frecuencial UWB, así como hasta los 20 GHz fijados como meta adicional.

Al cumplir los objetivos marcados, concluimos que este diseño de antena fractal MIMO UWB es correcto con un ancho de banda de 16.82 GHz.

Una vez realizado el diseño de la antena fractal MIMO de cuatro elementos UWB, observamos los diagramas de radiación a unas frecuencias de 4; 7; 10; 14 y 19 GHz con el fin de poder cuantificar en la siguiente tabla la directividad, eficiencia de radiación, eficiencia total, ganancia y ganancia realizada a dichas frecuencias de trabajo. En este caso las simulaciones de radiación se han obtenido analizando el puerto 1 ya que, debido a la simetría de la antena, para el puerto 2 serían idénticas, pero al revés; al igual que en los puertos superiores 3 y 4 al tener también la antena simetría en el eje horizontal. (Figura A18-A24)

Tabla 3.6 Parámetros de los diagramas de radiación a 4; 7; 10; 14 y 19 GHz para cuatro elementos

Parámetro de radiación	f = 4 GHz	f = 7 GHz	f = 10 GHz	f = 14 GHz	f = 19 GHz
Directividad	5.005 dBi	6.623 dBi	6.438 dBi	6.984 dBi	7.500 dBi
Eficiencia de radiación (ζ_{rad})	-1.154 dB	-1.139 dB	-1.185 dB	-1.280 dB	-2.507 dB
Eficiencia total (ζ_{tot})	-1.260 dB	-1.307 dB	-1.437 dB	-1.413 dB	-2.614 dB
Ganancia	3.851 dBi	5.484 dBi	5.253 dBi	5.704 dBi	4.993 dBi
Ganancia realizada	3.745 dBi	5.316 dBi	5.001 dBi	5.571 dBi	4.886 dBi

Observamos cómo los diagramas de radiación son parecidos a los obtenidos en el diseño de la antena MIMO de dos elementos. Además, volvemos a apreciar un aumento en las ganancias, ya que parte de la transmisión en dirección al resto de componentes radiantes se escapa en otras direcciones produciéndose así un incremento en las ganancias.

3.8. Diseño de antena slot fractal de un elemento UWB

En este apartado, comenzamos a diseñar una antena slot fractal de un elemento con un ancho de banda UWB. Para ello hemos utilizado, al igual que en los diseños anteriormente presentados, la tecnología *microstrip* con un sustrato de material FR-4 con capa inferior y superior de metal conductor de 0.03 mm de espesor. El material dieléctrico está caracterizado por un espesor de 1.6 mm, una permeabilidad magnética relativa de $\mu_r=1$, una permitividad eléctrica relativa de $\epsilon_r=4.3$ y una tangente de pérdidas de $\tan\delta=0.025$.

En la fase de diseño buscamos que se consiguieran los objetivos fijados de valor de $S_{ii} \leq -10$ dB y, además, que el espectro frecuencial donde esto se cumpliera estuviera entre los 3.1 GHz y los 10.6 GHz, para así tener un elemento radiante con un ancho de banda propio de la tecnología UWB. Una vez conseguido esto, intentamos mejorar el diseño con el fin de aumentar la banda de trabajo lo máximo posible manteniendo el nivel de adaptación requerido.

El hueco de la forma fractal diseñada sobre la capa superior metálica del sustrato, consiste en un hueco circular de radio R al cual le añadimos huecos con formas rectangulares mayores longitudinalmente que el diámetro del círculo, centrados en origen concéntrico con la circunferencia, y sus ejes longitudinales centrados en los ejes situados cada $n \frac{\pi}{6}$ rad con $n \in \mathbb{N}$. Sobre estos huecos rectangulares, añadimos a su vez otros dos huecos de la misma forma, pero más estrechos y largos longitudinalmente con el fin de que sobresalgan en los extremos de los primeros añadidos. El patrón de generación de dichos huecos consiste en que éstos que se añaden son mayores longitudinalmente, con un incremento en ambos extremos de la mitad de la distancia entre la estructura anterior y la predecesora de ésta; y con un ancho del nuevo hueco de la mitad del ancho del hueco rectangular previamente generado.

Así pues, para conseguir una alimentación de la antena slot apropiada, con el fin de conseguir nuestros objetivos marcados, primero diseñamos una alimentación en la cara posterior del elemento con una línea metálica de transmisión recta con ancho fijo. Con este diseño no conseguíamos un correcto nivel de adaptación y por ello, incorporamos en el extremo superior de esta estructura una “U” cuadrada de material metálico en la que,

modificando el largo y ancho de sus tres componentes, conseguimos optimizar la excitación de la antena slot con la siguiente configuración.

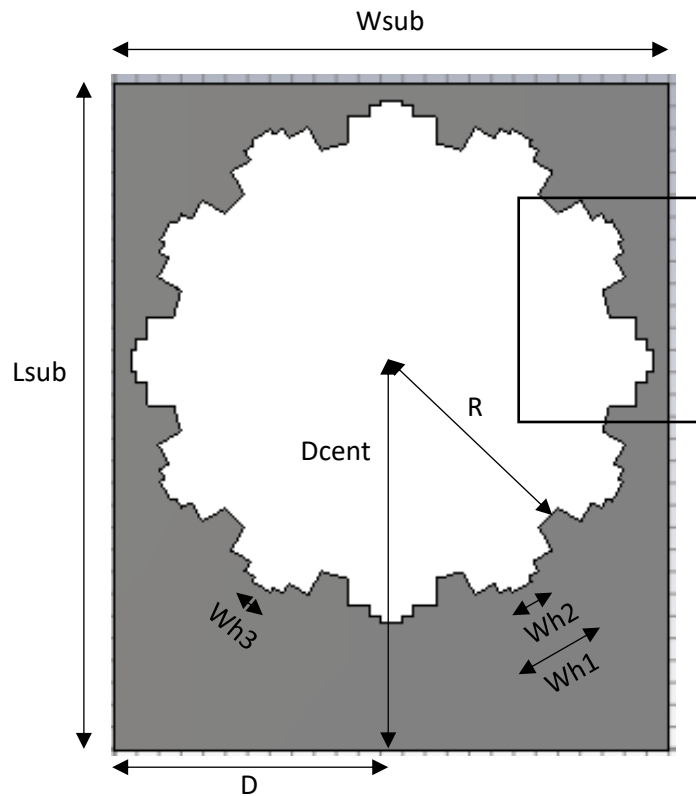


Figura 3.9 Diseño de la cara superior de la antena slot fractal de un elemento

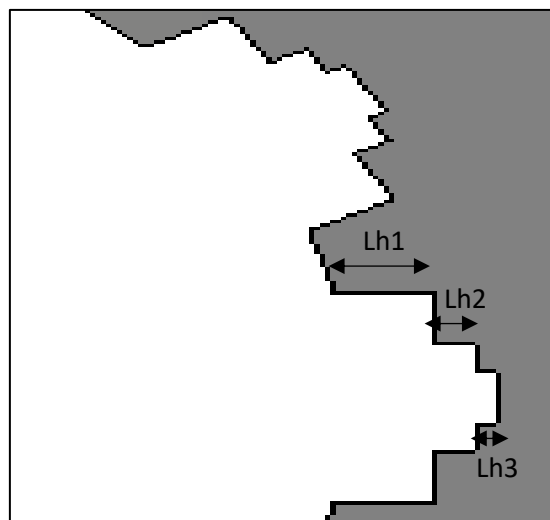


Figura 3.10 Detalle de la cara superior de la antena slot fractal de un elemento

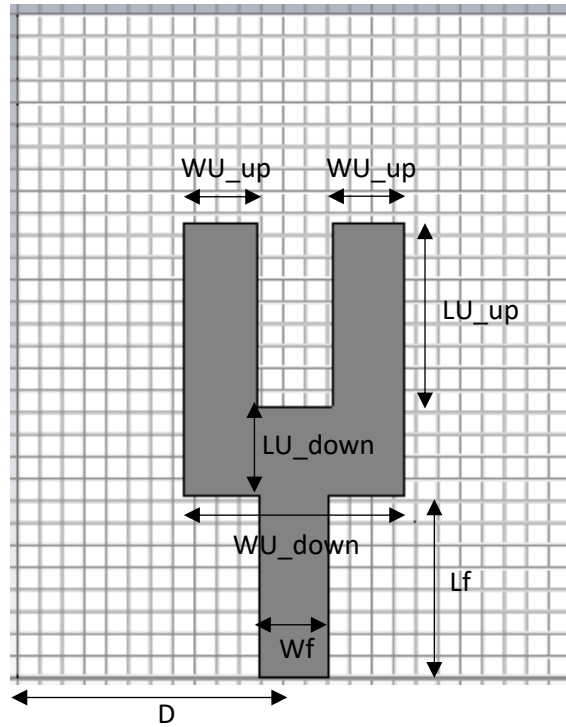


Figura 3.11 Diseño de la cara inferior de la antena slot fractal de un elemento

A continuación, se adjuntan las medidas físicas:

Tabla 3.7 Dimensiones de la antena slot fractal de un elemento

Parámetro	mm
Wsub	25
Lsub	30
R	10
Wh1	4
Lh1	1
Wh2	2
Lh2	0.5
Wh3	1
Lh3	0.25
Dcent	17.5
D	12.5
Wf	3.1
Lf	8.25
WU_down	10
LU_down	4
WU_up	3.3
LU_up	8.3

Con estas medidas obtenemos la siguiente simulación de parámetros S en CST:

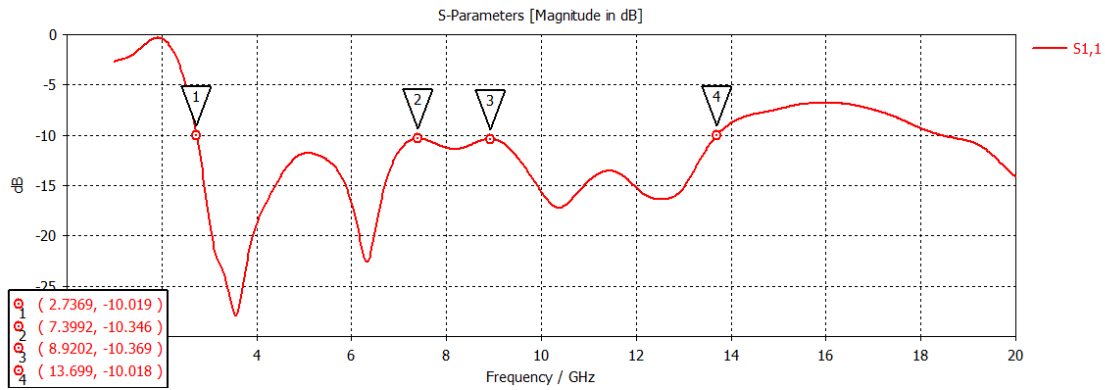


Figura 3.12 Parámetro S_{11} de la antena slot fractal de un elemento

Como podemos observar, cumplimos nuestro requisito de -10 dB respecto al nivel de adaptación de la antena en la banda de trabajo UWB, aumentando además nuestro rango de funcionamiento bajo este objetivo hasta los 13.7 GHz con un ancho de banda de 10.97 GHz, por lo que podemos calificar este diseño como correcto.

Una vez realizado el diseño de la antena slot fractal, observamos los diagramas de radiación a unas frecuencias de 4; 7; 10; 14 y 19 GHz con el fin de poder cuantificar en la siguiente tabla la directividad, eficiencia de radiación, eficiencia total, ganancia y ganancia realizada a dichas frecuencias de trabajo. (Figura A25-A31)

Tabla 3.8 Parámetros de los diagramas de radiación a 4; 7; 10; 14 y 19 GHz para un elemento slot

Parámetro de radiación	f = 4 GHz	f = 7 GHz	f = 10 GHz	f = 14 GHz	f = 19 GHz
Directividad	2.985 dBi	2.722 dBi	5.411 dBi	5.078 dBi	5.610 dBi
Eficiencia de radiación (ζ_{rad})	-0.505 dB	-0.719 dB	-0.990 dB	-2.585 dB	-2.118 dB
Eficiencia total (ζ_{tot})	-0.562 dB	-1.033 dB	-1.111 dB	-3.200 dB	-2.515 dB
Ganancia	2.480 dBi	2.003 dBi	4.421 dBi	2.493 dBi	3.492 dBi
Ganancia realizada	2.423 dBi	1.689 dBi	4.300 dBi	1.878 dBi	3.095 dBi

Podemos observar cómo la directividad es la ganancia máxima ideal de la antena, es decir, no valorando las pérdidas que se producen en ésta. En el caso de la ganancia, tenemos en cuenta tanto las pérdidas ocasionadas por el material dieléctrico del sustrato como las producidas por la conductividad del material eléctrico utilizado. En nuestro caso hemos usado material conductor perfecto (PEC) en el programa CST, por lo que no se producen pérdidas a causa de la conductividad en ningún momento.

Además, también tenemos el caso de la ganancia realizada en la que tenemos en cuenta todas las pérdidas que acontecen en la antena.

3.9. Diseño de antena slot fractal MIMO de dos elementos UWB

En este desarrollo, utilizamos como punto de partida el diseño slot de un elemento fractal UWB duplicándolo para así comenzar el diseño de la antena slot fractal MIMO de dos

elementos UWB. Mediante la función de duplicación en espejo de CST, añadido el segundo elemento slot fractal de la antena MIMO con su línea de alimentación correspondiente. Al hacer esto, también, añadimos el sustrato pertinente para que ambas estructuras queden unidas. Al modificar una dimensión de un elemento ambos elementos cambiarán, y por lo tanto las estructuras radiantes tienen las mismas medidas.

Para aumentar el nivel de aislamiento entre los dos elementos radiantes, añadimos un hueco vertical en la capa metálica superior, que funciona como barrera que separa de forma equidistante las estructuras radiantes. A su vez, en la cara inferior, incluimos una barrera metálica vertical que recorre todo el sustrato en el punto medio entre las alimentaciones, con el propósito de disminuir la potencia que pueda ser entregada de forma indeseada de una estructura a la otra. Con estas barreras, buscamos reducir todo lo posible la radiación interferente entre los distintos elementos con el fin de conseguir nuestro requisito, previamente definido, de aislamiento de $S_{ji} \leq -20$ dB.

Seguidamente, diseñamos una antena con sus elementos y alimentaciones con las mismas dimensiones que en la antena slot de un elemento, sin embargo, en las simulaciones pudimos observar cómo no conseguíamos un correcto coeficiente de reflexión. Debido a esto, procedimos al ajuste de los parámetros de ancho y largo de las alimentaciones de la cara posterior que excitan los elementos radiantes, optimizándolos y consiguiendo el mejor nivel de adaptación posible.

Además, apreciamos que con el hueco vertical generado en la cara superior no era suficiente para conseguir el aislamiento deseado entre los elementos, por lo que añadimos otro hueco horizontal en el centro de la base de dicha cara, para aumentar el aislamiento entre los elementos y el comienzo de sus alimentaciones, consiguiendo así un adecuado coeficiente de transmisión de forma que $S_{ji} \leq -20$ dB.

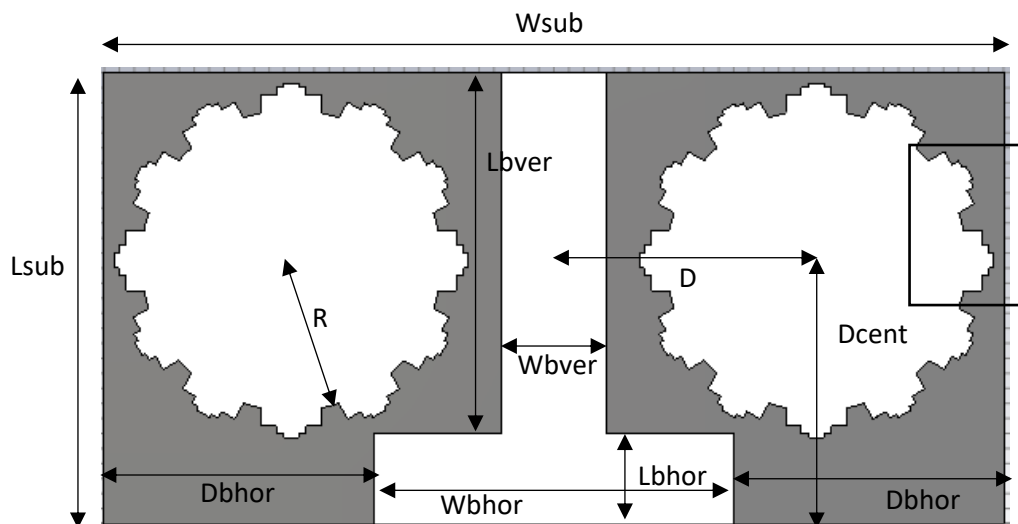


Figura 3.13 Diseño de la cara superior de la antena slot fractal MIMO de dos elementos

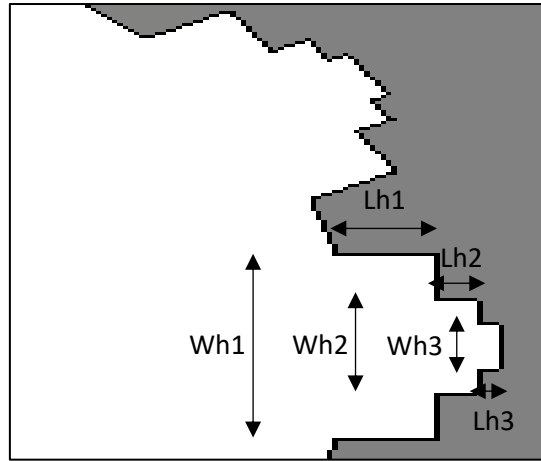


Figura 3.14 Detalle de la cara superior de la antena slot fractal MIMO de dos elementos

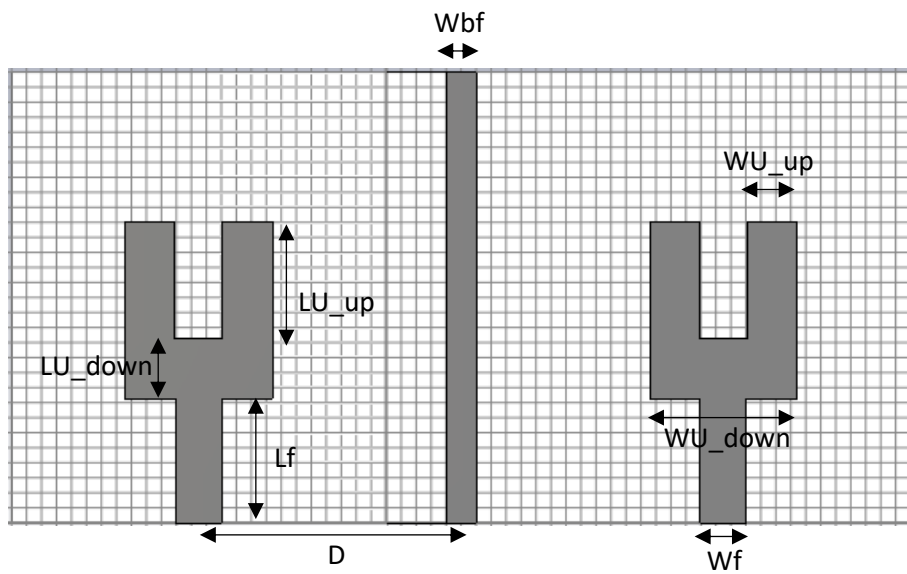


Figura 3.15 Diseño de la cara inferior de la antena slot fractal MIMO de dos elementos

A continuación, se adjuntan las medidas físicas:

Tabla 3.9 Dimensiones de la antena slot fractal MIMO de dos elementos

Parámetro	mm
W_{sub}	60
L_{sub}	30
R	10
Wh_1	4
Lh_1	1
Wh_2	2
Lh_2	0.5
Wh_3	1
Lh_3	0.25
D_{cent}	17.5
D	17.5

Wbhor	24
Lbhor	6
Wbver	7
Lbver	24
Dbhor	18
Wf	3.1
Lf	8.25
WU_down	9.8
LU_down	4
WU_up	3.3
LU_up	7.8
Wbf	2

Con estas medidas obtenemos la siguiente simulación de parámetros S en CST:

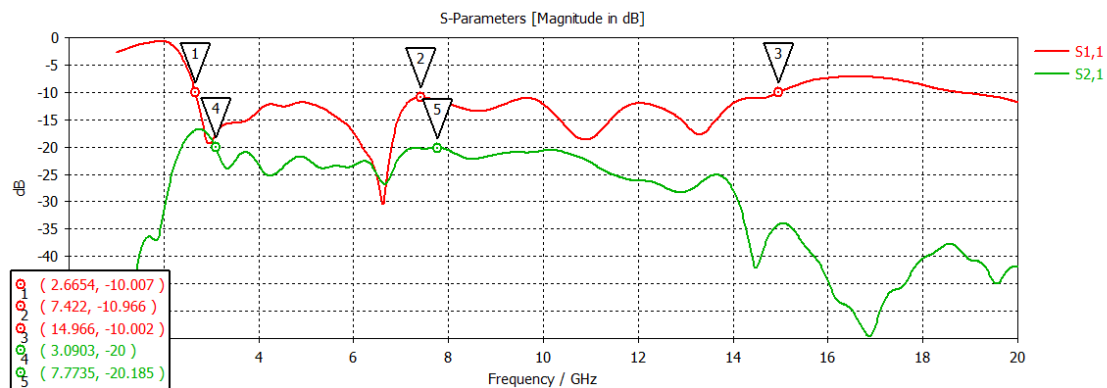


Figura 3.16 Parámetros S_{11} y S_{21} de la antena slot fractal MIMO de dos elementos

Podemos apreciar cómo la frecuencia mínima, a partir de la cual nuestro requisito de adaptación se cumple, es de 2.66 GHz y, además, nuestro ancho de banda que cumple nuestro objetivo llega hasta prácticamente los 15 GHz. Dicho rango frecuencial está incluido en el utilizado en UWB.

En el caso de los parámetros S_{ji} , observamos cómo la frecuencia mínima, a partir de la cual nuestro requisito se cumple, es de 3.09 GHz y, además, nuestra banda de trabajo que cumple nuestro objetivo llega hasta los 20 GHz. Este espectro frecuencial está dentro del usado en UWB.

Debido a que cumplimos nuestros objetivos tanto en adaptación como en aislamiento en el espectro frecuencial propio de UWB con un ancho de banda de 11.91 GHz, damos este diseño slot fractal MIMO por correcto.

Una vez realizado el diseño, observamos los diagramas de radiación a unas frecuencias de 4; 7; 10; 14 y 19 GHz con el fin de poder cuantificar en la siguiente tabla la directividad, eficiencia de radiación, eficiencia total, ganancia y ganancia realizada a dichas frecuencias de trabajo. En este caso las simulaciones de radiación se han obtenido

analizando el puerto 1 ya que, debido a la simetría de la antena, para el puerto 2 serían idénticas, pero al revés. (Figura A32-A38)

Tabla 3.10 Parámetros de los diagramas de radiación a 4; 7; 10; 14 y 19 GHz para dos elementos slot

Parámetro de radiación	f = 4 GHz	f = 7 GHz	f = 10 GHz	f = 14 GHz	f = 19 GHz
Directividad	4.037 dBi	3.973 dBi	6.771 dBi	6.482 dBi	5.598 dBi
Eficiencia de radiación (ζ_{rad})	-1.299 dB	-0.951 dB	-1.237 dB	-2.575 dB	-2.302 dB
Eficiencia total (ζ_{tot})	-1.527 dB	-1.171 dB	-1.546 dB	-2.864 dB	-2.734 dB
Ganancia	2.738 dBi	3.022 dBi	5.534 dBi	3.907 dBi	3.296 dBi
Ganancia realizada	2.510 dBi	2.802 dBi	5.225 dBi	3.618 dBi	2.864 dBi

Podemos observar cómo los diagramas de radiación son parecidos a los obtenidos en el diseño de la antena de un elemento; sin embargo, apreciamos un aumento en las ganancias, ya que parte de la transmisión en dirección al segundo componente radiante se escapa en otras direcciones produciéndose así un incremento en las ganancias.

3.10. Diseño de antena slot fractal MIMO de cuatro elementos UWB

A continuación, en el diseño de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos, hemos utilizado como base la antena slot fractal MIMO de dos elementos previamente diseñada. De nuevo, mediante la función de duplicación en espejo de CST, añadimos los elementos superiores izquierdo y derecho de la antena slot fractal MIMO con sus alimentaciones posteriores correspondientes. Al hacer esto, también, añadimos el sustrato pertinente para unir los cuatro elementos bajo el mismo sustrato. Al modificar una dimensión de un elemento todos los elementos cambiarán y, por lo tanto, todas las estructuras radiantes tienen las mismas medidas.

Para aumentar el nivel de aislamiento, añadimos un hueco horizontal que recorre por completo el sustrato en la capa metálica superior, con el fin de que funcione como barrera entre los elementos superiores e inferiores. A su vez, en la cara inferior, incluimos una barrera metálica horizontal a lo largo de toda la estructura en el punto medio entre las alimentaciones superiores e inferiores.

Con estas barreras, situadas tanto en el eje central entre los elementos radiantes inferiores y superiores, como en el eje central entre las alimentaciones superiores e inferiores, buscamos reducir todo lo posible la radiación interferente entre los distintos elementos con el objetivo de conseguir nuestro requisito de aislamiento de $S_{ji} \leq -20$ dB.

Además, debido a que los resultados en la simulación de los parámetros S en CST no cumplían el requisito de nivel de aislamiento, hemos añadido unos *slots* extras como barreras horizontales sobre la barrera horizontal previamente situada entre los puntos inferiores de los elementos. Gracias a incrementar la distancia entre los componentes metálicos radiantes, conseguimos mejorar el nivel de aislamiento entre los elementos más próximos.

Debido a la incorporación de las diferentes barreras y a la modificación de algunas medidas de los demás elementos con el fin de conseguir un buen nivel de adaptación y de aislamiento, hemos obtenido el siguiente diseño:

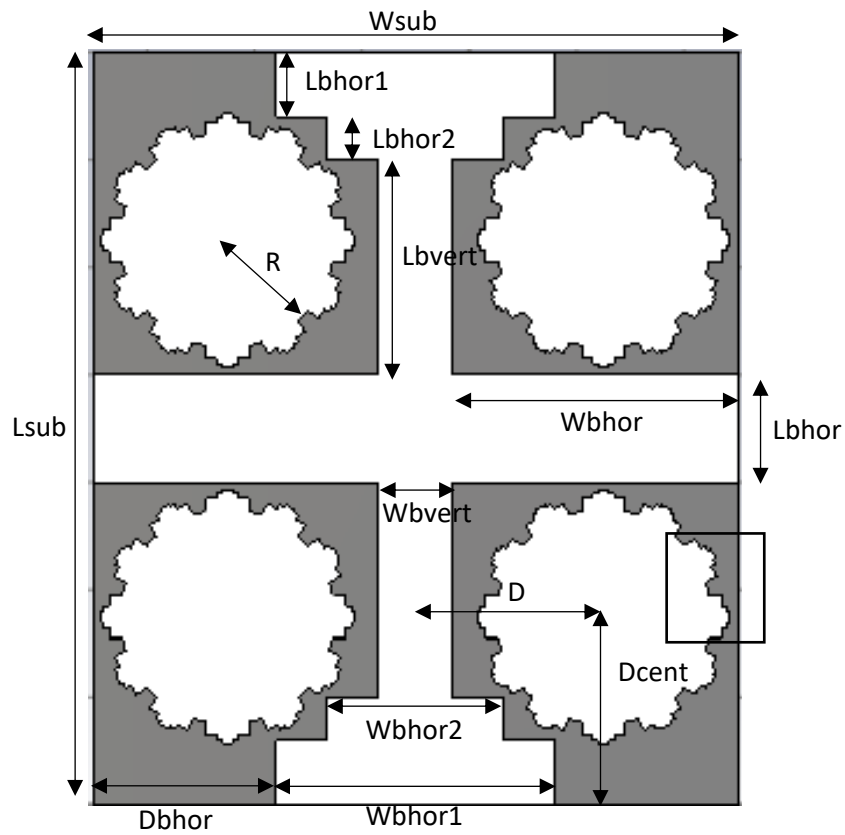


Figura 3.17 Diseño de la cara superior de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos

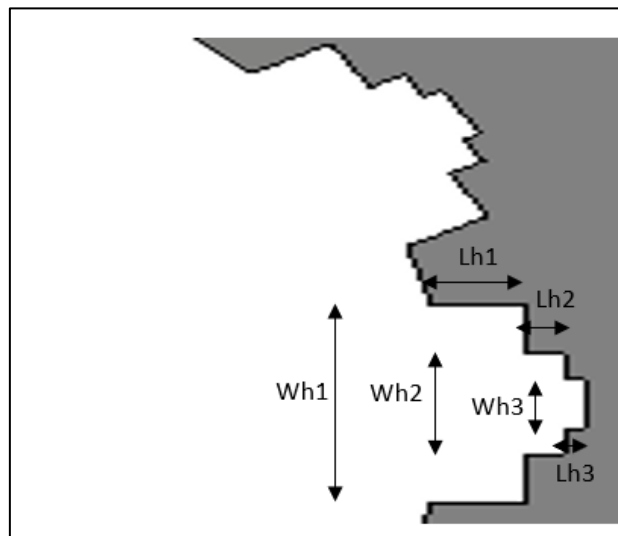


Figura 3.18 Detalle de la cara superior de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos

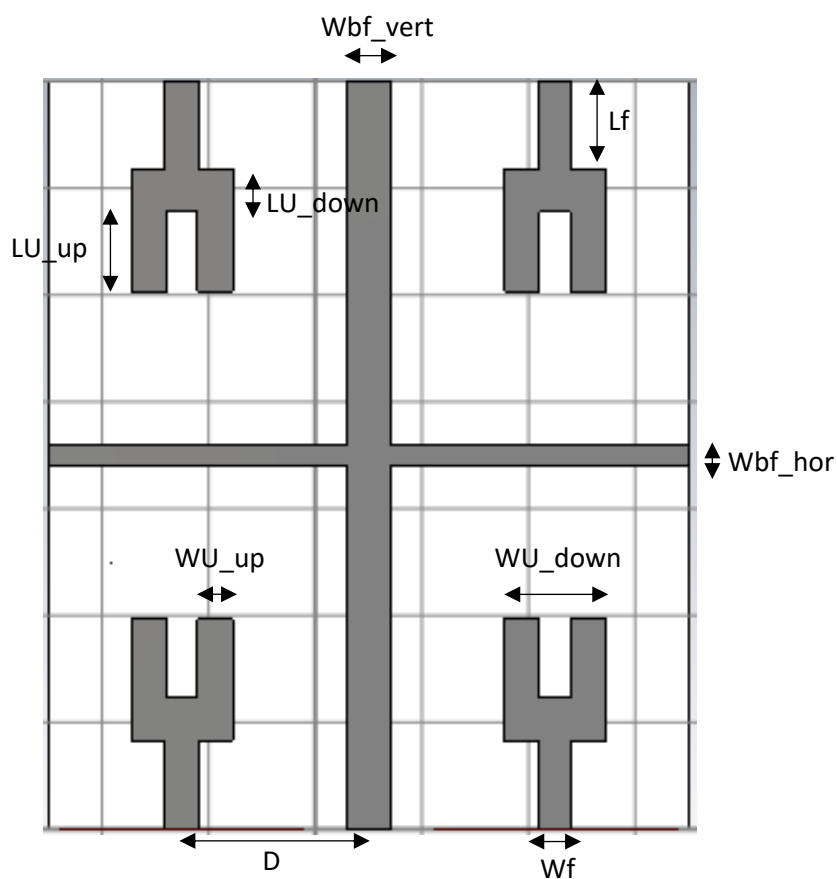


Figura 3.19 Diseño de la cara inferior de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos

A continuación, se adjuntan las medidas físicas:

Tabla 3.11 Dimensiones de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos

Parámetro	mm
Wsub	60
Lsub	70
R	10
Wh1	4
Lh1	1
Wh2	2
Lh2	0.5
Wh3	1
Lh3	0.25
Dcent	17.5
D	17.5
Wbhor	26.5
Lbhor	10
Wbvert	7
Lbvert	20

Wbhor1	26
Lbhor1	6
Wbhor2	16.5
Lbhor2	4
Dbhor	17
Wf	3.1
Lf	8.25
WU_down	9.5
LU_down	4
WU_up	3.3
LU_up	7.4
Wbf_vert	4
Wbf_hor	2

Con estas medidas obtenemos la siguiente simulación de parámetros S en CST:

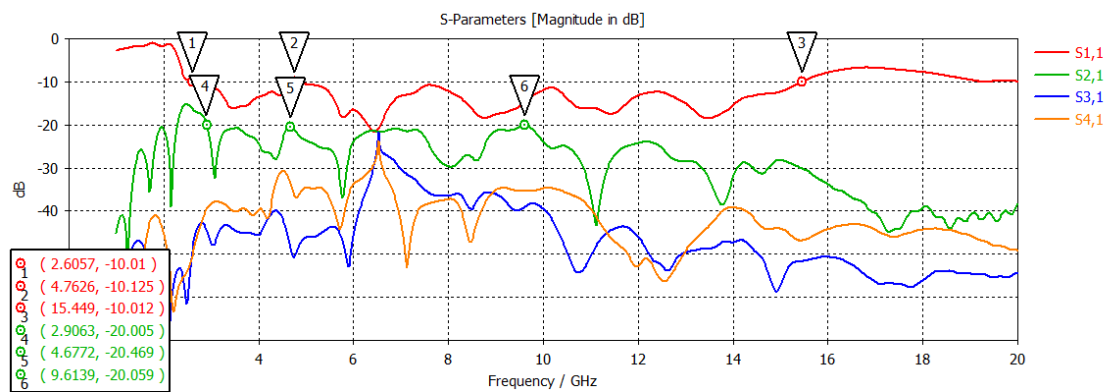


Figura 3.20 Parámetros S₁₁; S₂₁; S₃₁ y S₄₁ de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos

Podemos apreciar cómo la frecuencia mínima, a partir de la cual cumplimos nuestro requisito de adaptación, es de 2.60 GHz y, además, nuestra banda de trabajo que cumple que $S_{ii} \leq -10$ dB llega hasta prácticamente los 15.45 GHz. Por tanto, este rango frecuencial está incluido en el utilizado en UWB.

Con respecto a los niveles de aislamiento entre los distintos elementos que componen la antena slot, podemos ver que conseguimos estar por debajo de los -20 dB en todos los coeficientes S_{ji} en el espectro frecuencial UWB, así como hasta los 15.45 GHz.

Al cumplir los objetivos marcados, concluimos que este diseño de antena slot fractal MIMO UWB es correcto con un ancho de banda de 12.55 GHz.

Una vez realizado el diseño, observamos los diagramas de radiación a unas frecuencias de 4; 7; 10; 14 y 19 GHz con el fin de poder cuantificar en la siguiente tabla la directividad, eficiencia de radiación, eficiencia total, ganancia y ganancia realizada a dichas frecuencias de trabajo. En este caso las simulaciones de radiación se han obtenido analizando el puerto 1 ya que, debido a la simetría de la antena, para el puerto 2 serían

idénticas, pero al revés. Lo mismo ocurriría en los puertos superiores 3 y 4 al tener también la antena simetría en el eje horizontal. (Figura A39-A45)

Tabla 3.12 Parámetros de los diagramas de radiación a 4; 7; 10; 14 y 19 GHz para cuatro elementos slot

Parámetro de radiación	f = 4 GHz	f = 7 GHz	f = 10 GHz	f = 14 GHz	f = 19 GHz
Directividad	4.421 dBi	6.258 dBi	7.128 dBi	5.918 dBi	7.423 dBi
Eficiencia de radiación (ζ_{rad})	-1.333 dB	-1.083 dB	-1.704 dB	-2.577 dB	-2.490 dB
Eficiencia total (ζ_{tot})	-1.546 dB	-1.330 dB	-2.014 dB	-2.706 dB	-2.996 dB
Ganancia	3.088 dBi	5.175 dBi	5.424 dBi	3.341 dBi	4.933 dBi
Ganancia realizada	2.875 dBi	4.928 dBi	5.114 dBi	3.212 dBi	4.427 dBi

Podemos observar cómo los diagramas de radiación son parecidos a los obtenidos en el diseño de la antena slot MIMO de dos elementos. Además, volvemos a apreciar un aumento en las ganancias, ya que parte de la transmisión en dirección al resto de componentes radiantes se escapa en otras direcciones produciéndose así un incremento en las ganancias.

Capítulo 4. Resultados prácticos

En este punto del proyecto, se realizan los archivos *gerbers* de los diseños de las antenas, previamente desarrolladas, y se envían por correo electrónico al laboratorio de fabricación de PCB de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.

Tras la construcción de nuestros diseños en dicho laboratorio, procedimos a soldar los conectores SMA de 50 Ω en las alimentaciones de los elementos radiantes de las antenas.

Posteriormente, en el laboratorio C-103, llevamos a cabo la medición y caracterización de las antenas mediante un analizador de frecuencias, así como sus correspondientes cables y cargas necesarias para la calibración previa al proceso de medida.

Primeramente, conectamos la antena fractal de un elemento para obtener su coeficiente de reflexión y comprobar que el nivel de adaptación de la antena cumpla con nuestros requisitos conseguidos en el paso previo de diseño.

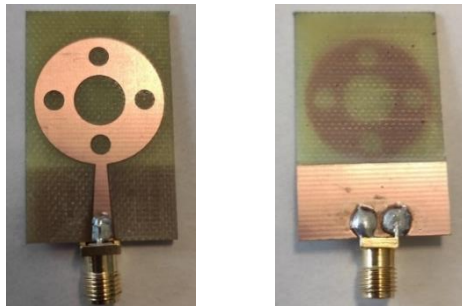


Figura 4.1 Antena fractal de un elemento

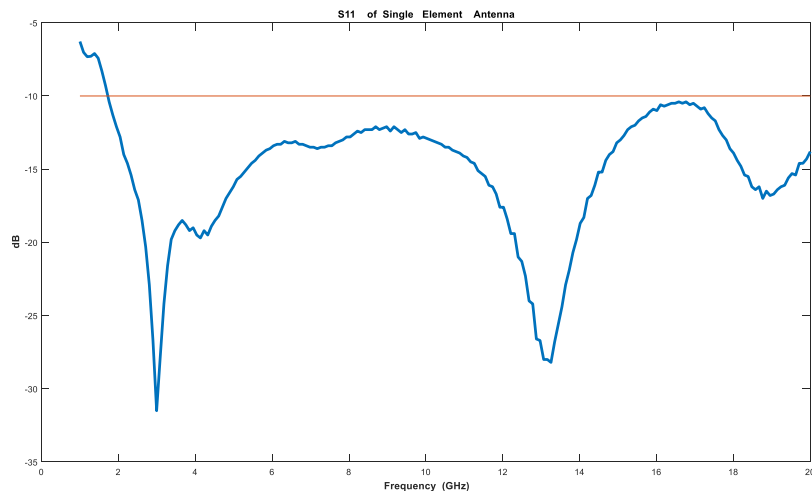


Figura 4.2 Parámetro S_{11} de la antena fractal de un elemento

Podemos apreciar en la medida del coeficiente de reflexión de la antena, que cumple nuestro requisito de diseño $S_{ii} \leq -10$ dB; y, además, se obtienen medidas mejores que en la simulación, puesto que tiene mejor nivel general de adaptación en todo el rango de frecuencias y, el rango de trabajo frecuencial por debajo de nuestro límite comienza antes.

A continuación, realizamos las medidas de los parámetros S_{11} y S_{21} para caracterizar a la antena fractal MIMO de dos elementos, ya que debido a la simetría de la antena $S_{11} = S_{22}$ y $S_{21} = S_{12}$.

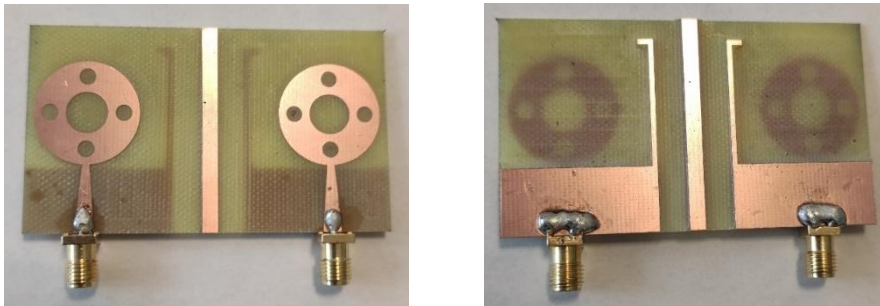


Figura 4.3 Antena fractal MIMO de dos elementos

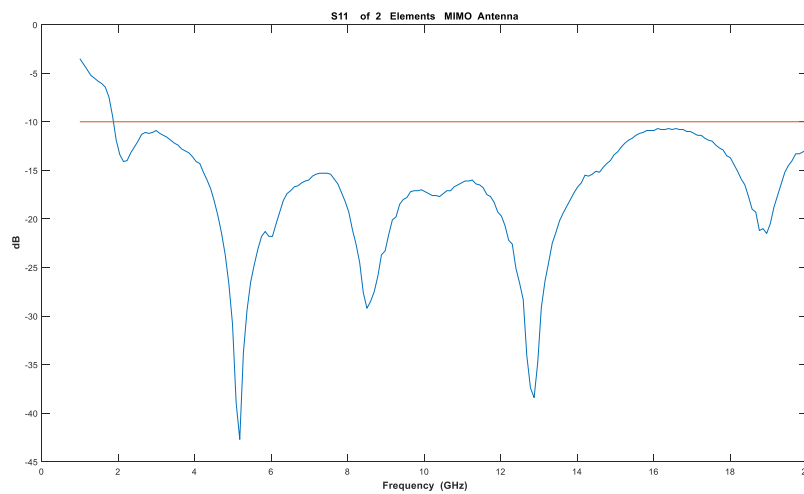


Figura 4.4 Parámetro S_{11} de la antena fractal MIMO de dos elementos

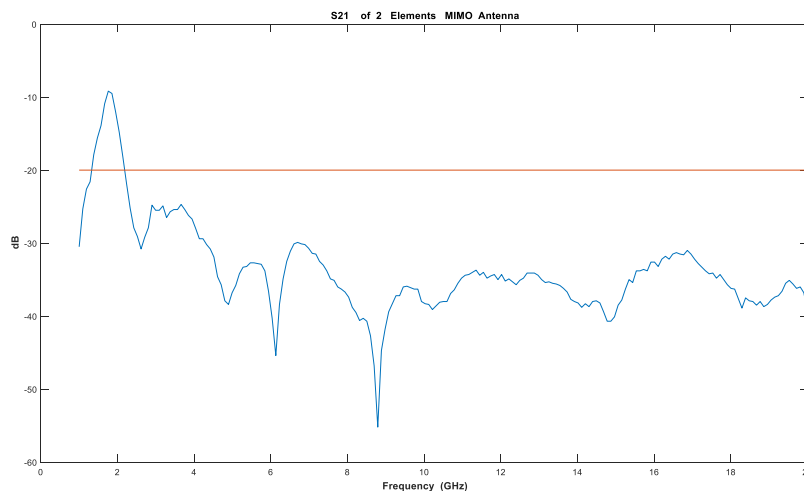


Figura 4.5 Parámetro S_{21} de la antena fractal MIMO de dos elementos

Tanto el nivel de adaptación, representado por el S_{11} , como el nivel de aislamiento, indicado por el S_{21} ; vemos cómo no sólo cumplen los requisitos con los que habíamos realizado el diseño de la antena, sino que estos parámetros se mejoran sustancialmente;

obteniendo un ancho de banda de trabajo que comienza entorno a los 2.2 GHz consiguiendo así un incremento de 500 MHz, así como un mayor nivel de aislamiento.

Asimismo, representamos el coeficiente de correlación de envolvente (ECC) y la ganancia de diversidad para poder caracterizar la calidad de nuestro diseño de la antena:

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

$$DG = 10 \log_{10} (10 \sqrt{1 - |ECC|^2})$$

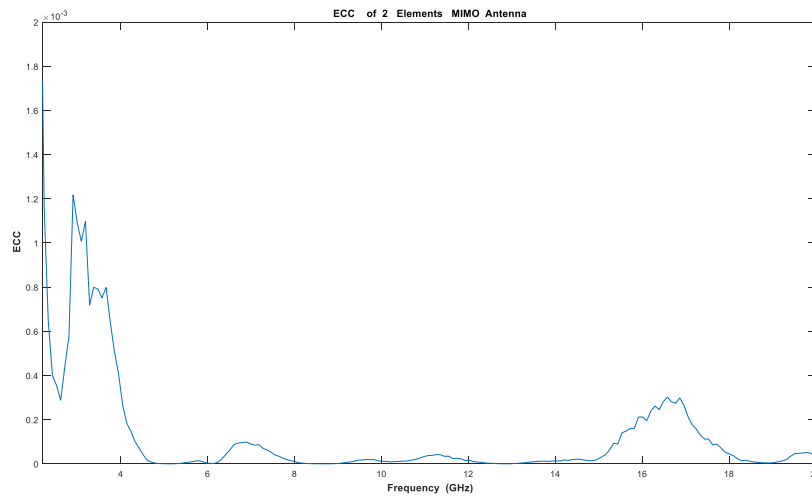


Figura 4.6 Parámetro ECC de la antena fractal MIMO de dos elementos

Podemos apreciar cómo la ECC se encuentra en torno a 0, lo cual es muy positivo puesto que una antena perfecta tendría la ECC en 0.

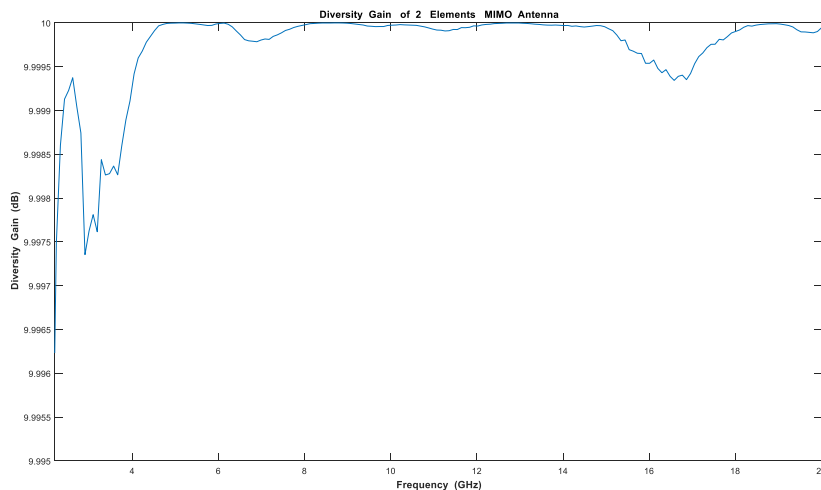


Figura 4.7 Parámetro ganancia de diversidad de la antena fractal MIMO de dos elementos

Observamos una ganancia de diversidad mínima dentro de la banda de trabajo UWB de 9.9974 dB y, el resto de los puntos en el rango frecuencial deseado se encuentran en torno al valor óptimo de 10 dB, por lo que afirmamos que el diseño de la antenna es correcto.

Seguidamente, realizamos las medidas de los parámetros S_{11} , S_{21} , S_{31} y S_{41} para caracterizar a la antenna fractal MIMO de cuatro elementos ya que, debido a la simetría de la antenna tanto en el eje horizontal como vertical, los demás parámetros S son iguales en los diferentes puertos de entrada.



Figura 4.8 Antena fractal MIMO de cuatro elementos

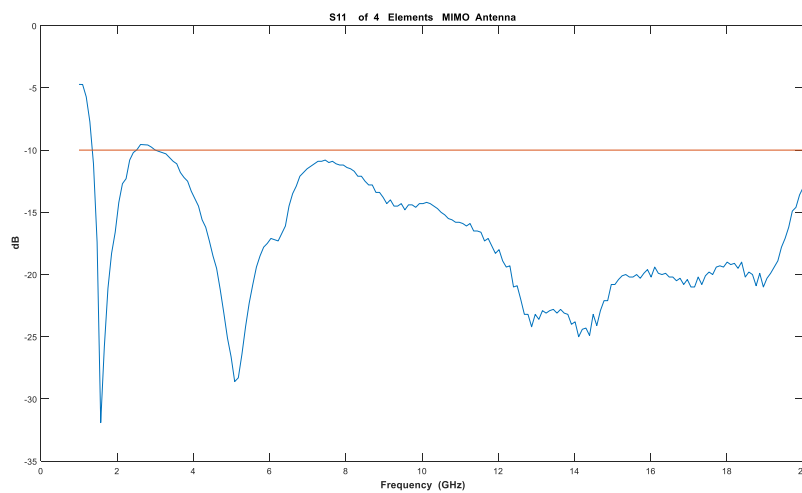


Figura 4.9 Parámetro S_{11} de la antenna fractal MIMO de cuatro elementos

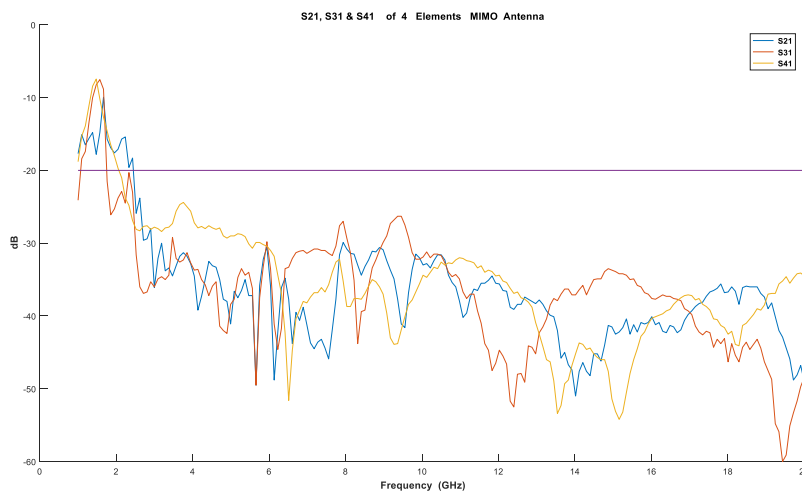


Figura 4.10 Parámetros S_{21} , S_{31} y S_{41} de la antenna fractal MIMO de cuatro elementos

Podemos apreciar cómo el nivel de adaptación, representado por el parámetro S_{11} , así como el nivel de aislamiento, representado por los parámetros S_{21} , S_{31} y S_{41} ; no sólo cumplen los requisitos con los que habíamos realizado el diseño de la antenna, sino que, además, existe una mejoría en estos parámetros en la caracterización física de ésta. Obteniendo un ancho de banda de trabajo que comienza entorno a los 3 GHz, así como un mayor nivel de aislamiento entre los distintos elementos radiantes.

A continuación, procedemos a la medida del nivel de adaptación, caracterizado por el parámetro S_{11} , de la antenna slot fractal de elemento unitario.



Figura 4.11 Antena slot fractal de un elemento

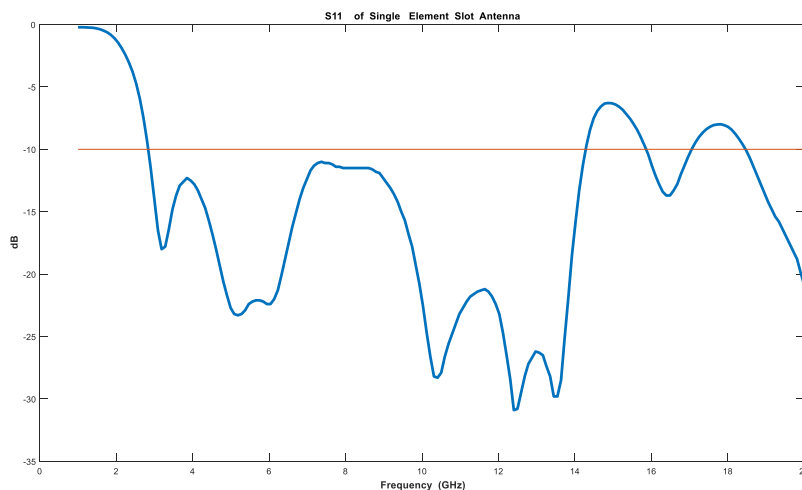


Figura 4.12 Parámetro S_{11} de la antenna slot fractal de un elemento

Observamos que conseguimos cumplir nuestro objetivo de nivel de adaptación en una banda de trabajo comprendida entre los 2.7 GHz hasta más allá de los 14 GHz, por lo que vemos un incremento en el ancho de banda que cumple nuestros requisitos de 300 MHz respecto al diseño simulado anteriormente.

Después, realizamos la caracterización de los parámetros S_{11} y S_{21} de la antenna slot fractal MIMO de dos elementos con el fin de poder cuantificar tanto el nivel de adaptación, como el nivel de aislamiento de la antenna MIMO diseñada. Debido a la simetría de la antenna $S_{11} = S_{22}$ y $S_{21} = S_{12}$.

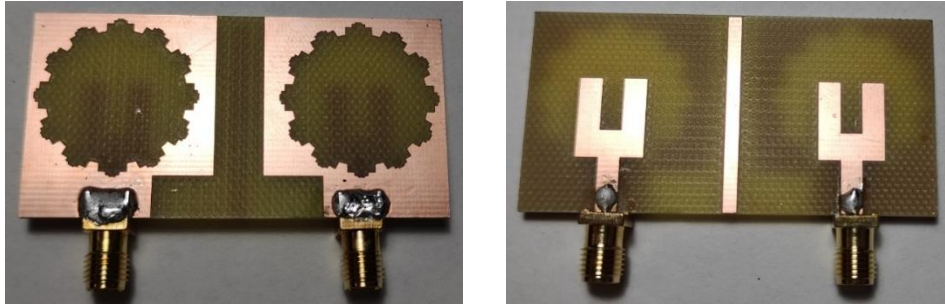


Figura 4.13 Antena slot fractal MIMO de dos elementos

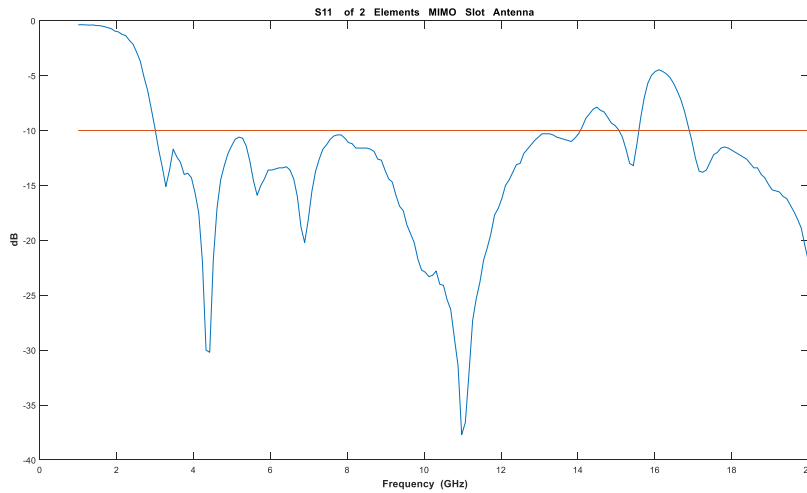


Figura 4.14 Parámetro S_{11} de la antena slot fractal MIMO de dos elementos

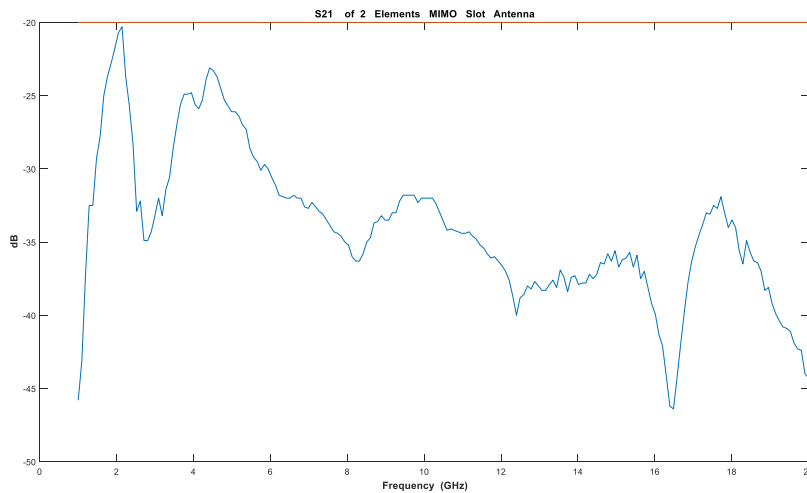


Figura 4.15 Parámetro S_{21} de la antena slot fractal MIMO de dos elementos

Tanto en el caso del parámetro S_{11} como en el S_{21} , ratificamos que se cumplen nuestros requisitos de nivel de adaptación y aislamiento. Además, conseguimos un considerable mayor nivel de aislamiento entre los elementos de la antena en la banda de trabajo deseada.

Asimismo, al igual que en el caso de la antenna fractal MIMO de dos elementos anteriormente medida, representamos el coeficiente de correlación de envolvente (ECC) para poder caracterizar la calidad de nuestro diseño.

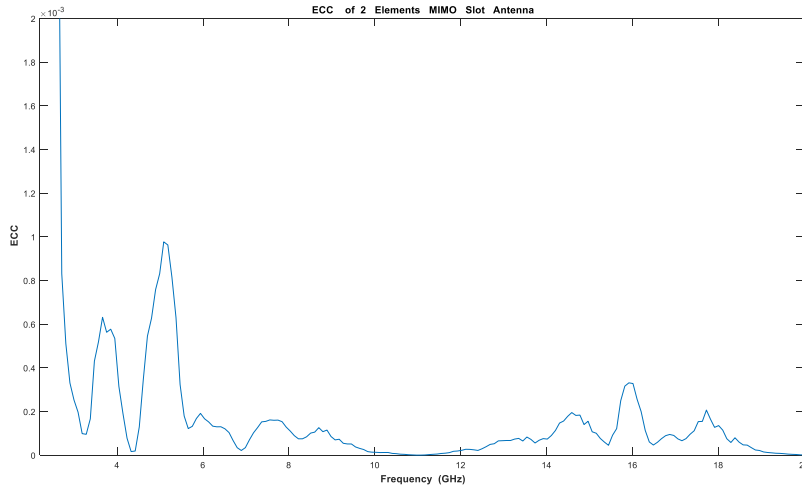


Figura 4.16 Parámetro ECC de la antenna slot fractal MIMO de dos elementos

Podemos observar cómo a partir de los 3 GHz en adelante el ECC se encuentra en valores cercanos a 0, lo cual es muy positivo puesto que una antenna perfecta tendría la ECC en 0.

Por otro lado, también mostramos la ganancia de diversidad con el fin de parametrizar la calidad de la antenna.

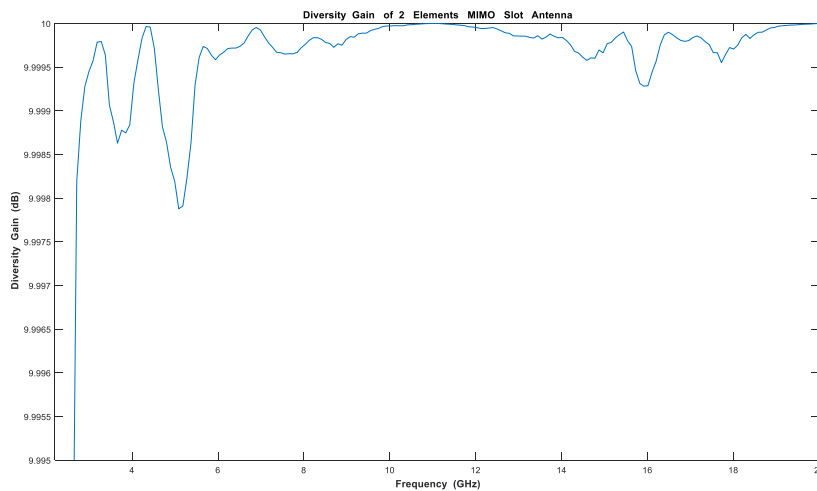


Figura 4.17 Parámetro ganancia de diversidad de la antenna slot fractal MIMO de dos elementos

En nuestro caso la ganancia de diversidad mínima dentro de la banda de trabajo deseada es de 9.9979 dB, con el resto de los puntos del rango frecuencial en torno al valor óptimo de 10 dB, por lo que podemos afirmar que el diseño de la antenna slot es correcto.

Por último, realizamos las medidas de los parámetros S_{11} , S_{21} , S_{31} y S_{41} para caracterizar a la antenna slot fractal MIMO de cuatro elementos ya que, debido a la simetría de la antenna tanto en el eje horizontal como vertical, los demás parámetros S son iguales en los diferentes puertos de entrada.

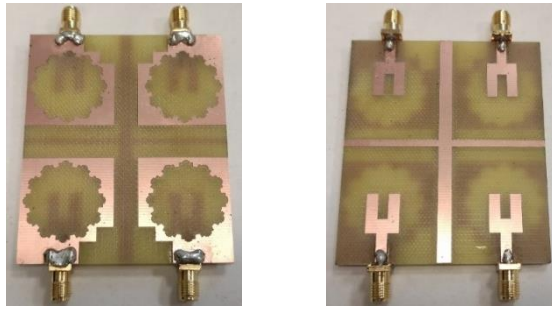


Figura 4.18 Antena slot fractal MIMO de cuatro elementos

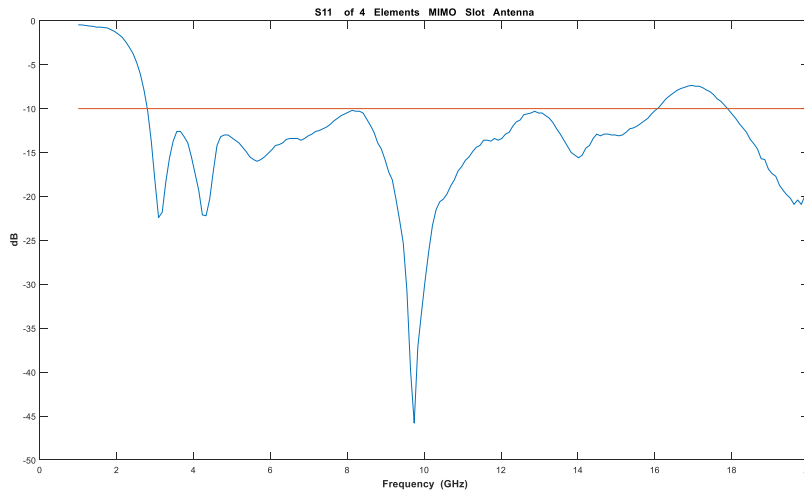


Figura 4.19 Parámetro S_{11} de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos

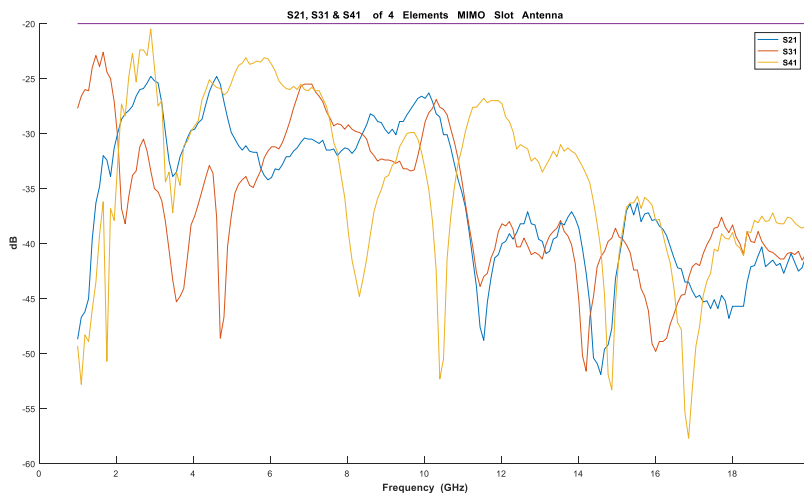


Figura 4.20 Parámetros S_{21} , S_{31} y S_{41} de la antena slot fractal MIMO de cuatro elementos

Vemos cómo el nivel de adaptación, representado por el parámetro S_{11} , así como el nivel de aislamiento, representado por los parámetros S_{21} , S_{31} y S_{41} ; no sólo cumplen los requisitos con los que habíamos realizado el diseño de la antena, sino que incluso hay una mejoría en estos parámetros en la caracterización física de la misma. Obteniendo un incremento en el ancho de banda aproximado de 500 MHz al funcionar correctamente bajo nuestros requisitos hasta los 16 GHz, así como un mayor nivel de aislamiento entre los distintos elementos radiantes.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro

En el presente trabajo hemos conseguido diseñar correctamente distintas configuraciones de antenas fractales compactas con un ancho de banda que comprende el usado en la tecnología UWB y que, gracias a sus tamaños, pueden implementarse en dispositivos de comunicaciones de dimensiones reducidas. De hecho, hemos conseguido ampliar el ancho de banda frecuencial bajo el cual nuestras antenas cumplen los requisitos, fijados previamente, de adaptación y aislamiento entre los elementos radiantes.

Además, tras la construcción de las antenas y su posterior medición, comprobamos una mejora en los parámetros de caracterización de las antenas con respecto a las simulaciones realizadas, por lo que podemos afirmar que se han conseguido los objetivos marcados con un grado de mejora.

Respecto a posibles trabajos surgidos a partir de éste, podría buscarse disminuir aún más el tamaño de las antenas manteniendo el ancho de banda propio de UWB, así como realizar antenas con otras formas fractales o añadir filtros a estos diseños con el objetivo de usar sólo unas bandas frecuenciales concretas.

Bibliografía

1. Stutzman W. L. y Thiele G. A. Antenna Theory and Design. 3rd edition. New York: John Wiley & Sons; 2012.
2. Pozar D. M. Microwave Engineering. 4th edition. John Wiley & Sons; 2011.
3. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. 3rd edition. New York: John Wiley & Sons; 2005.
4. García Pardo C., Moreno Cano M. V., Molina García-Pardo J. M., Rodríguez J. V., Pascual García J. y Llácer L. J. Sistemas de comunicaciones UWB. Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Universidad Politécnica de Cartagena. Revista de la ETSIT-UPCT; 2010.
5. Díaz J. Tecnología Ultra-Wideband (UWB) la revolución a corto alcance. Center for Communications and Signal Processing Reseach New Jersey Institute of Technology. 2003.
6. García Pardo C., Garrido Cervantes A., Molina García-Pardo J. M., Rodríguez J. V., Pascual García J. y Llácer L. J. Estudio de las Pérdidas de Propagación en Función de la Frecuencia en Interiores para Canales MIMO-UWB. Grupo Sistemas de Comunicaciones Móviles. Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Universidad Politécnica de Cartagena.
7. Breed G. A Summary of FCC Rules for Ultra Wideband Communications. High Frequency Electronics; 2005.
8. Anguís Horno J. J. Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla; 2008.
9. Agredo-Méndez G. L., Jojoa-Gómez P. E. y Almenar-Terré V. Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica. Entramado. 2015; 11 (2): 250-261.
10. Hernández Aquino R. Diseño, simulación y construcción de antenas tipo parche para bluetooth y WI-FI, bandas 2.4 ghz y 5.8 ghz. Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica. Escuela de Ingeniería y Ciencias. Universidad de las Américas Puebla; 2008.
11. Montoya Lince, A. Antenas fractales: un paso en la evolución de las telecomunicaciones. Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia.

Anexo

En este anexo, adjuntamos las representaciones de los diagramas de radiación en 3D y planos E y H de radiación de las antenas diseñadas en las frecuencias de trabajo de 4; 7; 10; 14 y 19 GHz, así como la representación de los parámetros S de las antenas MIMO de dos y cuatro elementos hasta los 50 GHz.

Además, incluimos el diseño previo al final de la antenna fractal MIMO de dos elementos, ya que lo consideramos relevante en la consecución de éste.

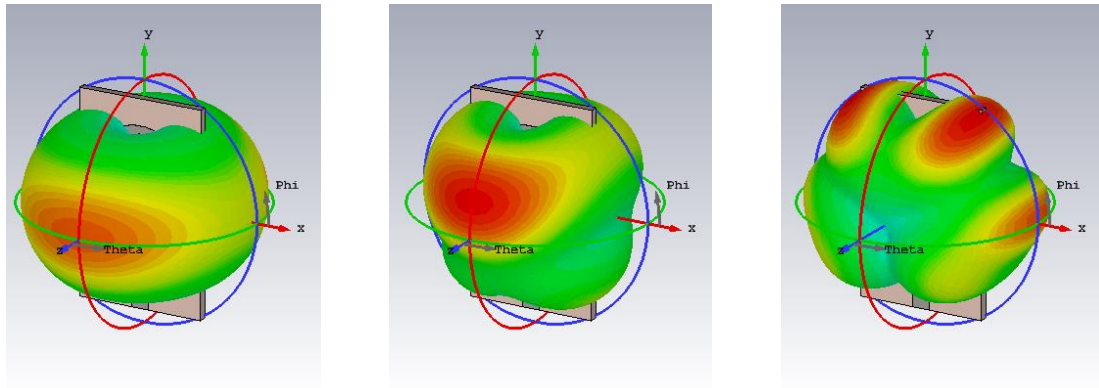


Figura A1. Diagramas de radiación a 4; 7 y 10 GHz para un elemento

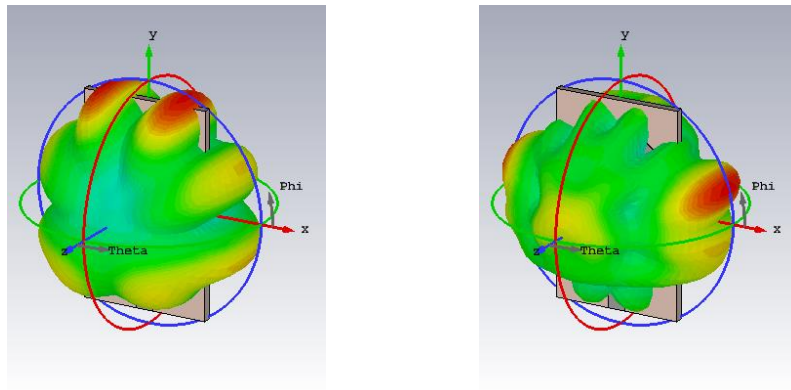


Figura A2. Diagramas de radiación a 14 y 19 GHz para un elemento

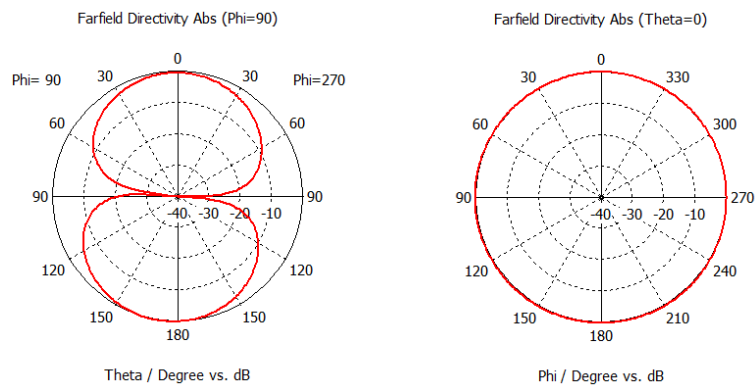


Figura A3. Plano E y H de radiación a 4 GHz para un elemento

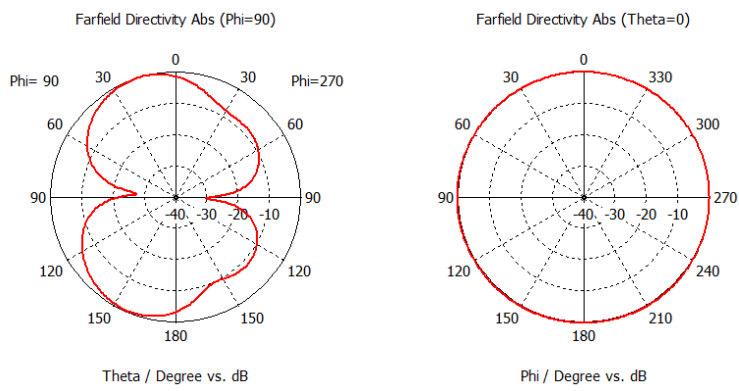


Figura A4. Plano E y H de radiación a 7 GHz para un elemento

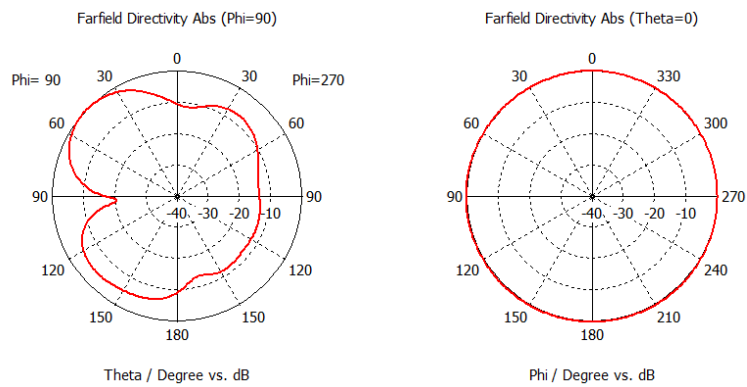


Figura A5. Plano E y H de radiación a 10 GHz para un elemento

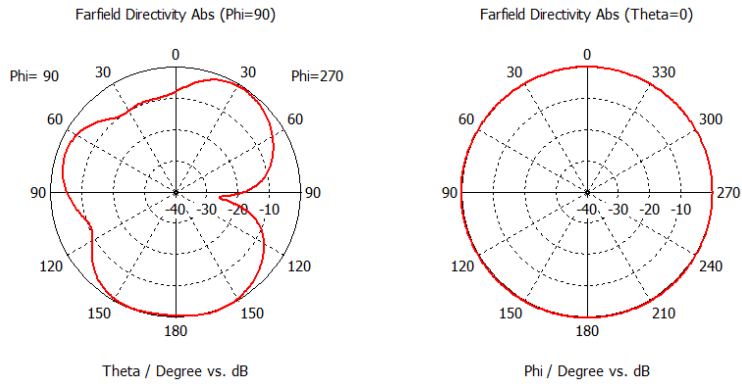


Figura A6. Plano E y H de radiación a 14 GHz para un elemento

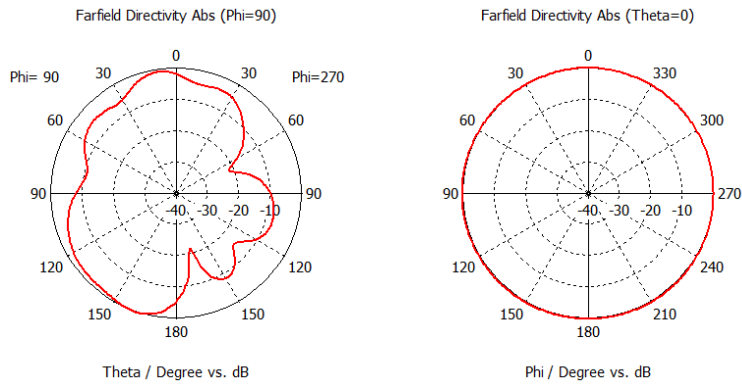


Figura A7. Plano E y H de radiación a 19 GHz para un elemento

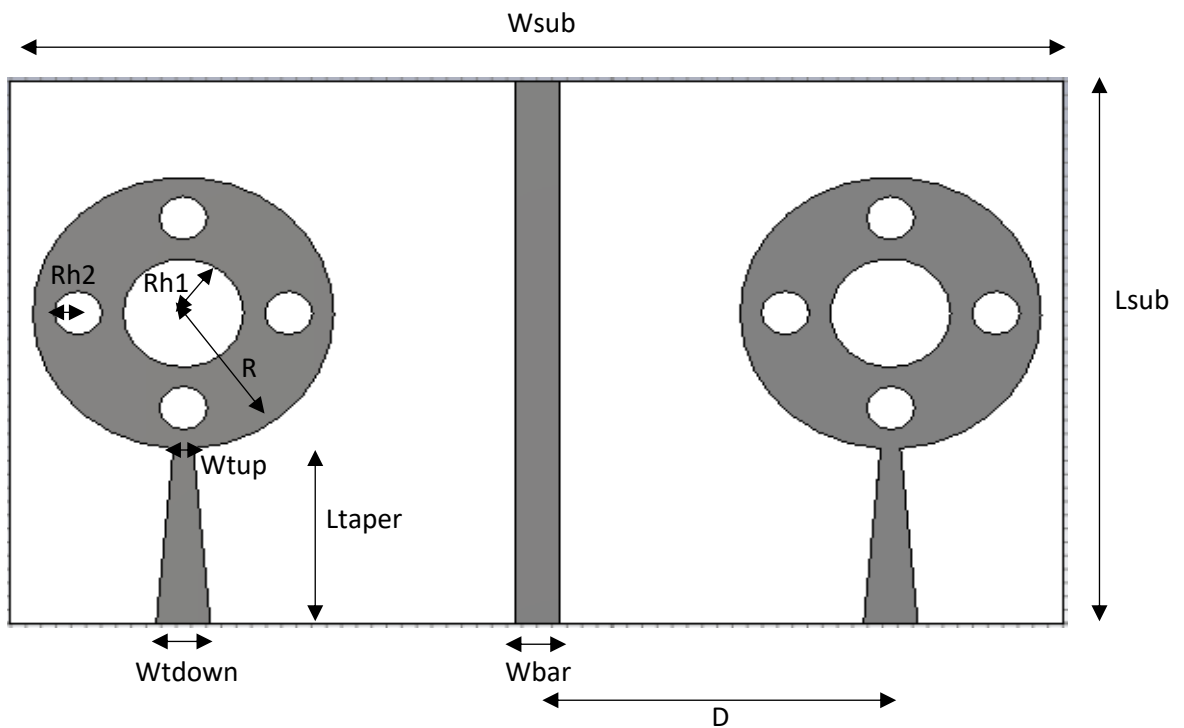


Figura A8. Diseño de la cara superior de la antena fractal MIMO de dos elementos

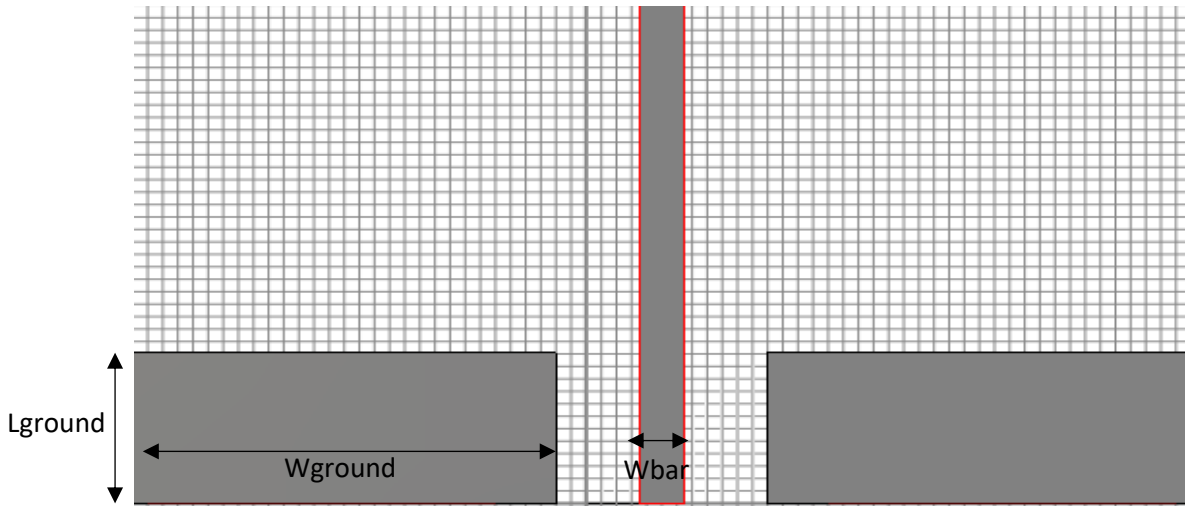


Figura A9. Diseño de la cara inferior de la antena fractal MIMO de dos elementos

A continuación, se adjuntan las medidas físicas del elemento:

Tabla A1. Dimensiones de la antena fractal MIMO de dos elementos

Parámetro	mm
Wsub	70
Lsub	40
R	10
Rh1	4
Rh2	1.6
gap	0.9
D	23.5
Wtup	1.3
Wtdown	3.6
Ltaper	13
Wground	28
Lground	12.1
Wbar	3

Con estas medidas obtenemos la siguiente simulación de parámetros S en CST:

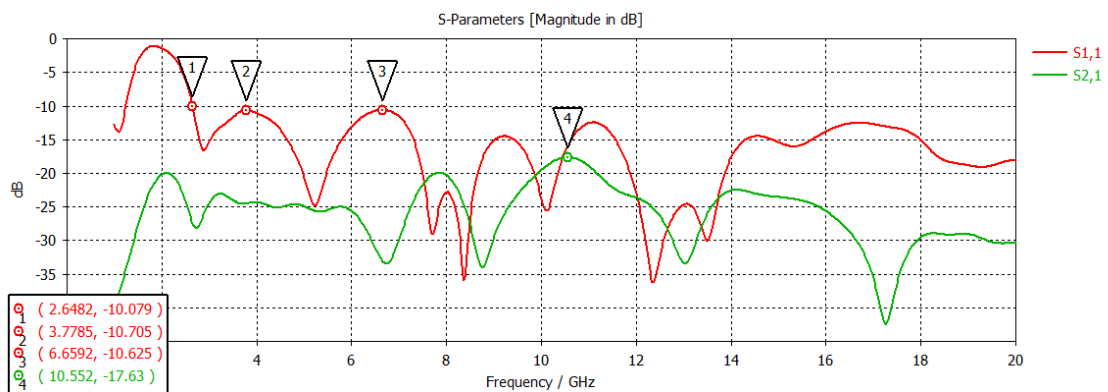


Figura A10. Parámetros S_{11} y S_{21} de la antena fractal MIMO de dos elementos

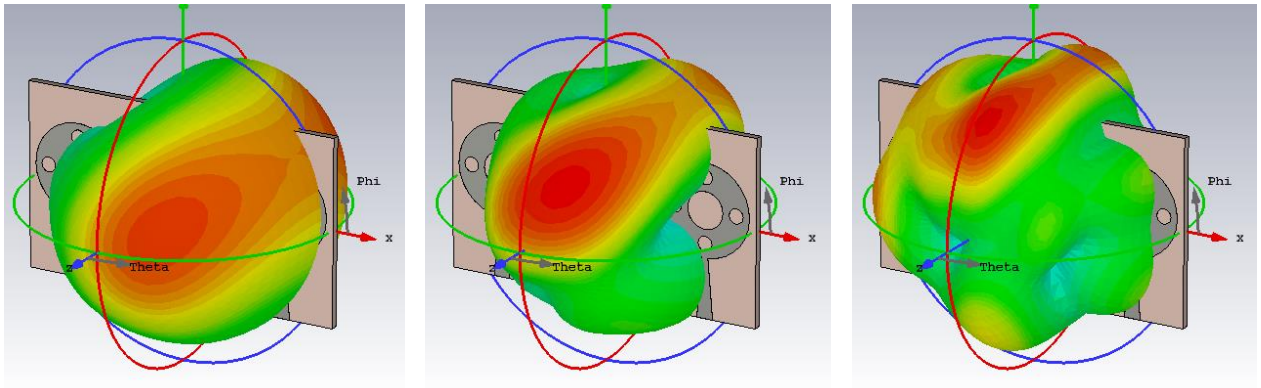


Figura A11. Diagramas de radiación a 4; 7 y 10 GHz para dos elementos

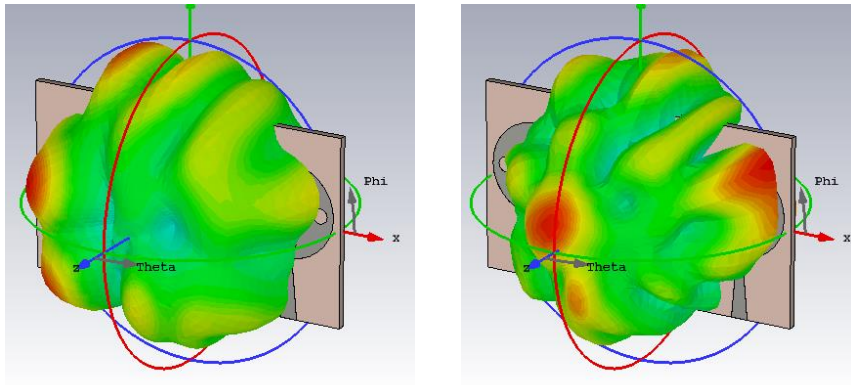


Figura A12. Diagramas de radiación a 14 y 19 GHz para dos elementos

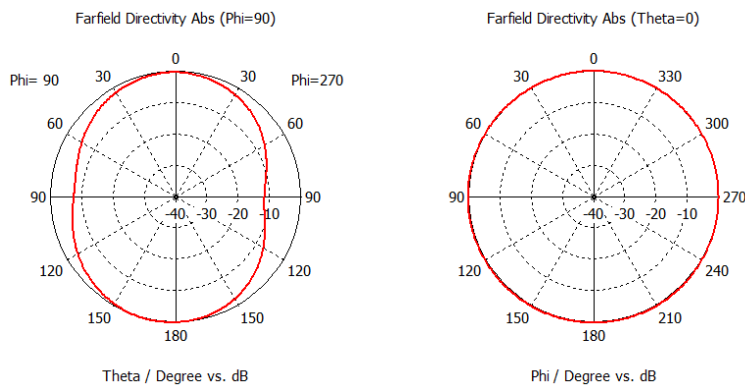


Figura A13. Plano E y H de radiación a 4 GHz para dos elementos

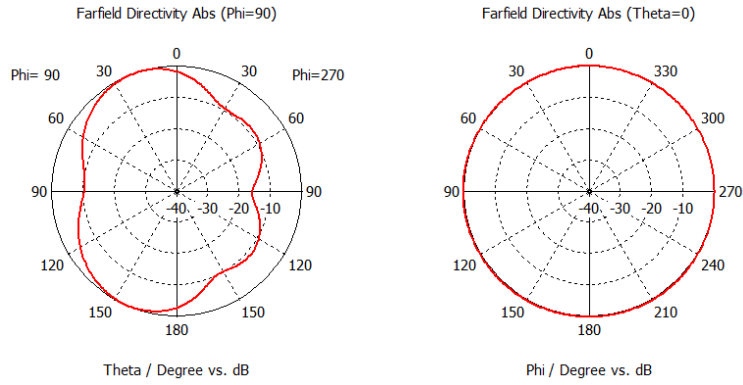


Figura A14. Plano E y H de radiación a 7 GHz para dos elementos

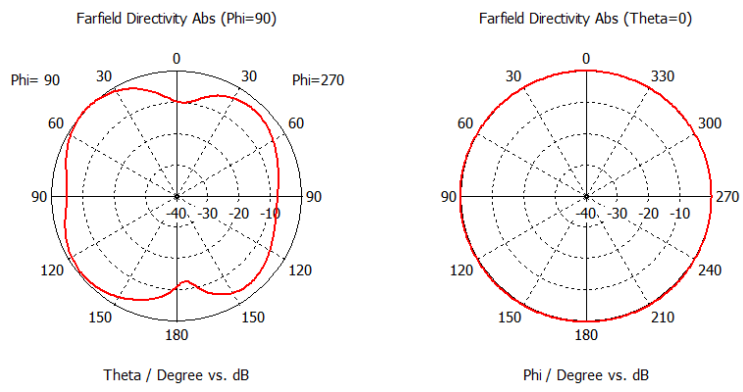


Figura A15. Plano E y H de radiación a 10 GHz para dos elementos

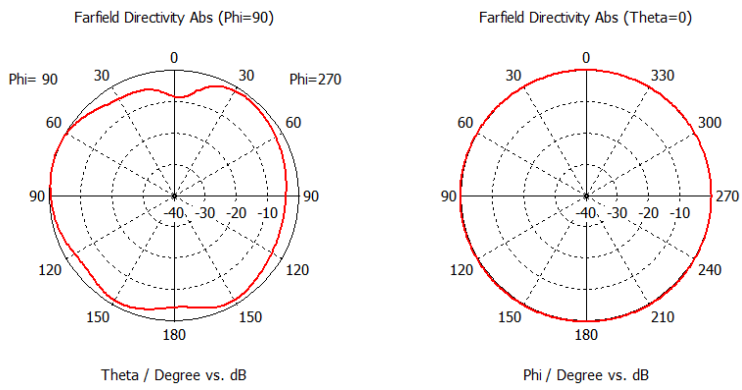


Figura A16. Plano E y H de radiación a 14 GHz para dos elementos

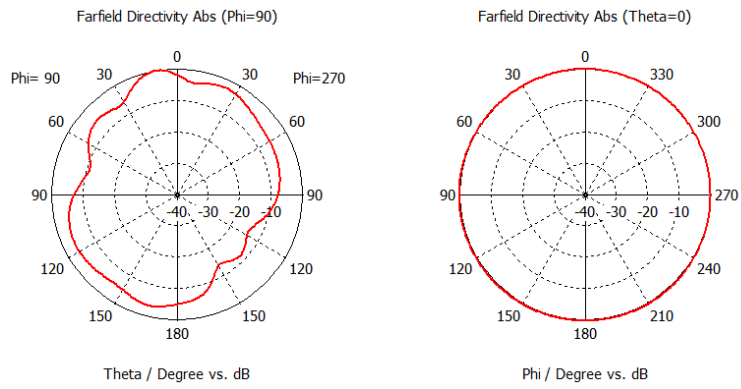


Figura A17. Plano E y H de radiación a 19 GHz para dos elementos

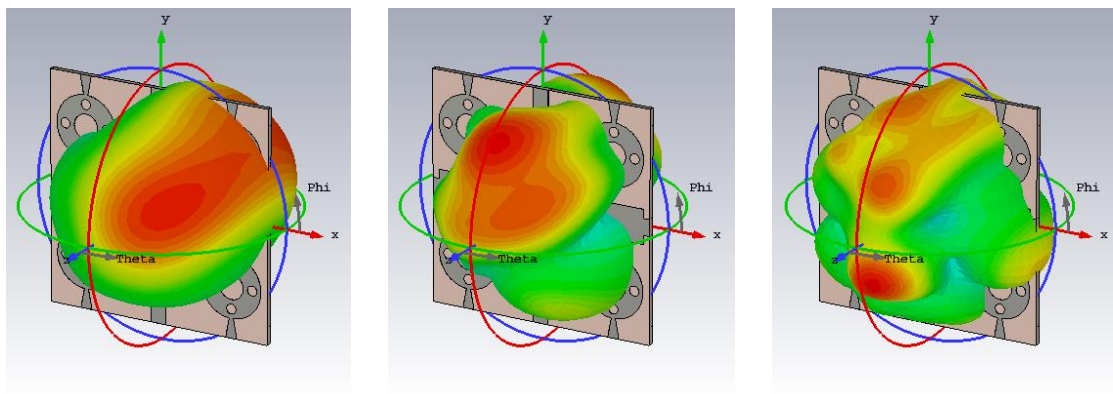


Figura A18. Diagramas de radiación a 4; 7 y 10 GHz para cuatro elementos

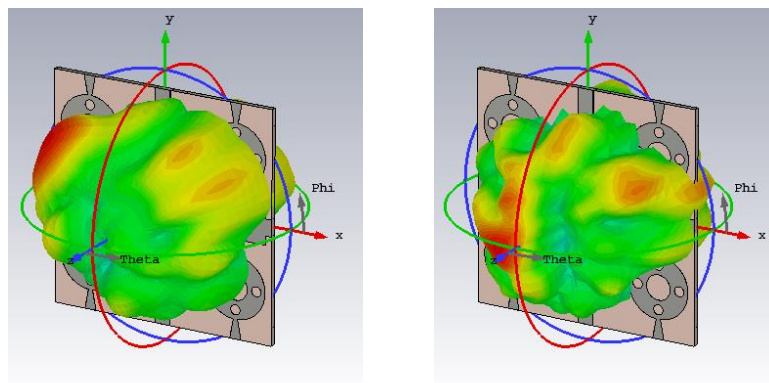


Figura A19. Diagramas de radiación a 14 y 19 GHz para cuatro elementos

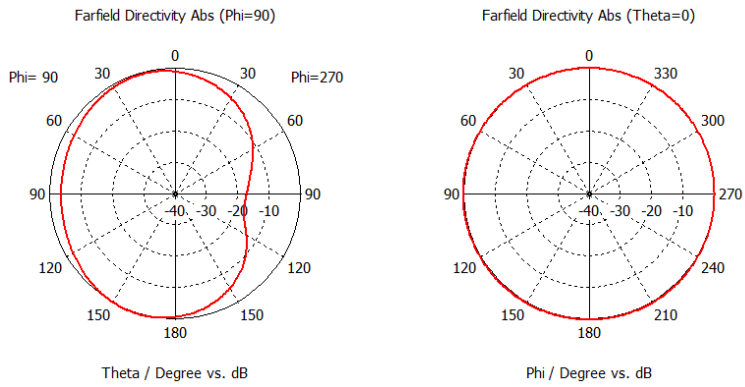


Figura A20. Plano E y H de radiación a 4 GHz para cuatro elementos

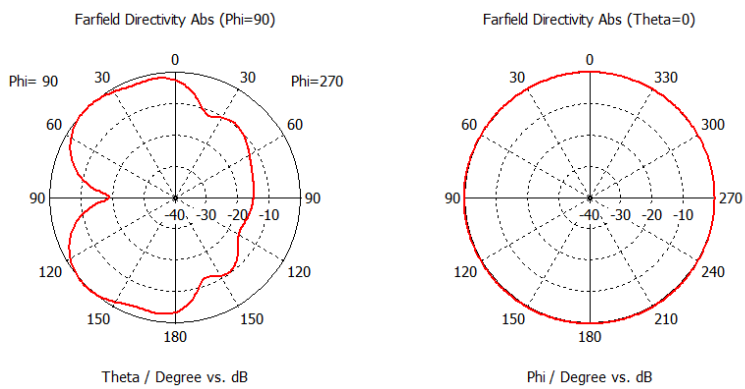


Figura A21. Plano E y H de radiación a 7 GHz para cuatro elementos

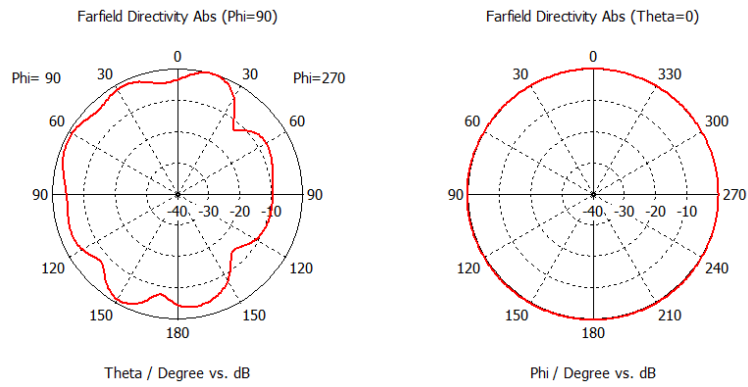


Figura A22. Plano E y H de radiación a 10 GHz para cuatro elementos

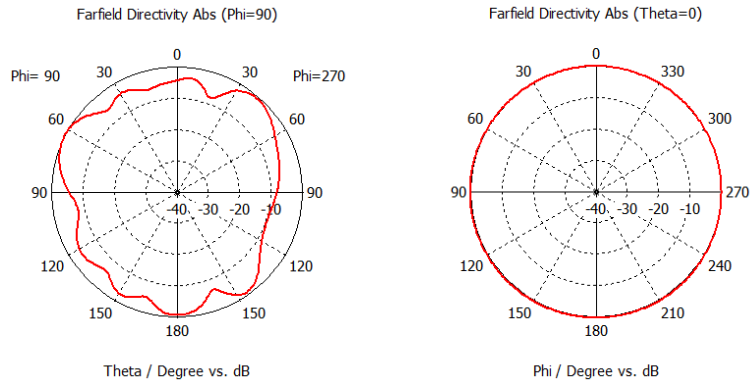


Figura A23. Plano E y H de radiación a 14 GHz para cuatro elementos

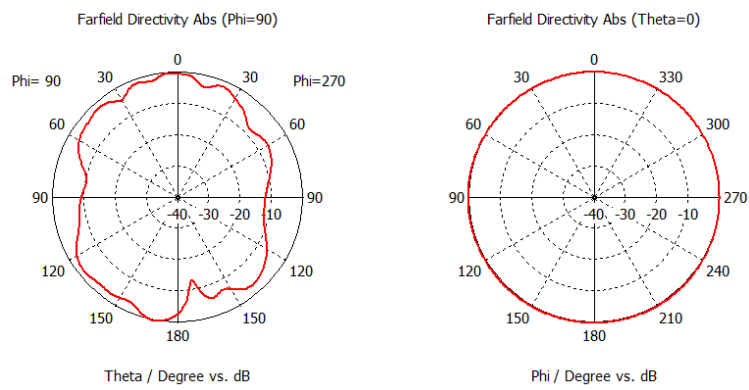


Figura A24. Plano E y H de radiación a 19 GHz para cuatro elementos

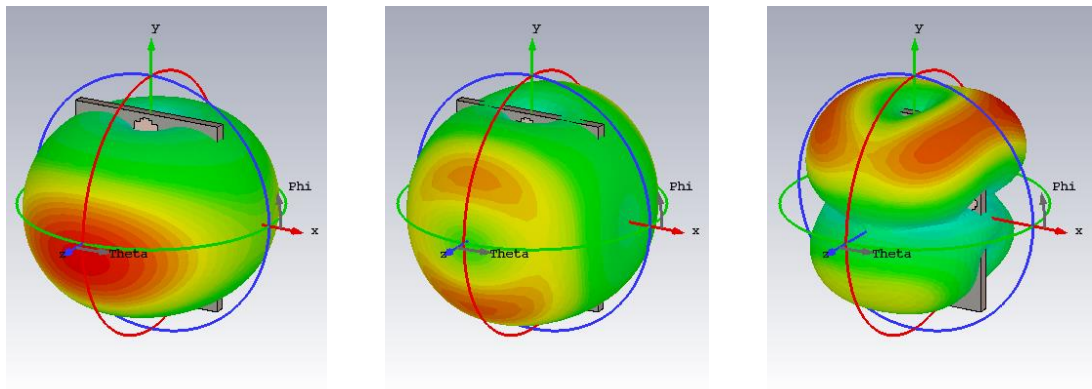


Figura A25. Diagramas de radiación a 4; 7 y 10 GHz para un elemento slot

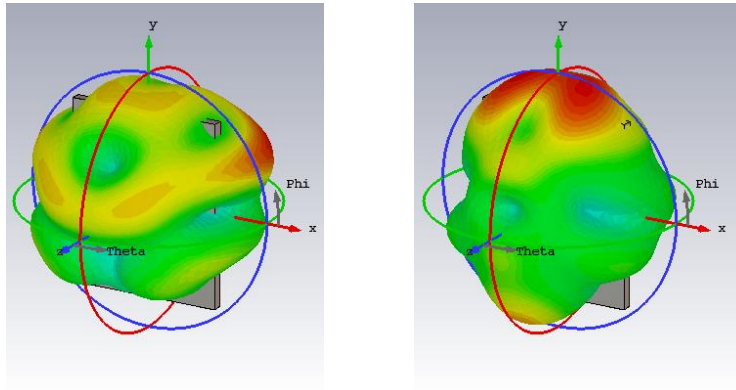


Figura A26. Diagramas de radiación a 14 y 19 GHz para un elemento slot

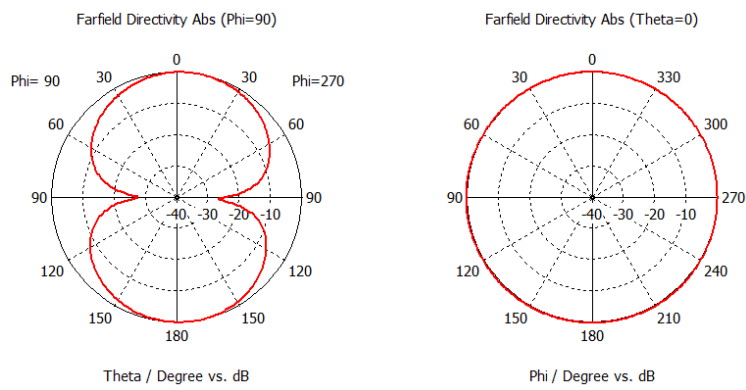


Figura A27. Plano E y H de radiación a 4 GHz para un elemento slot

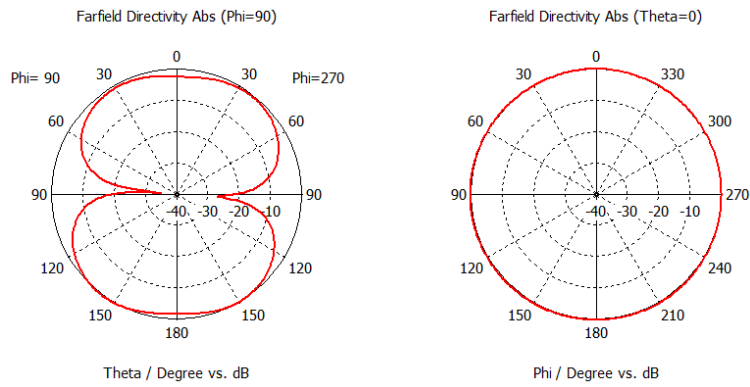


Figura A28. Plano E y H de radiación a 7 GHz para un elemento slot

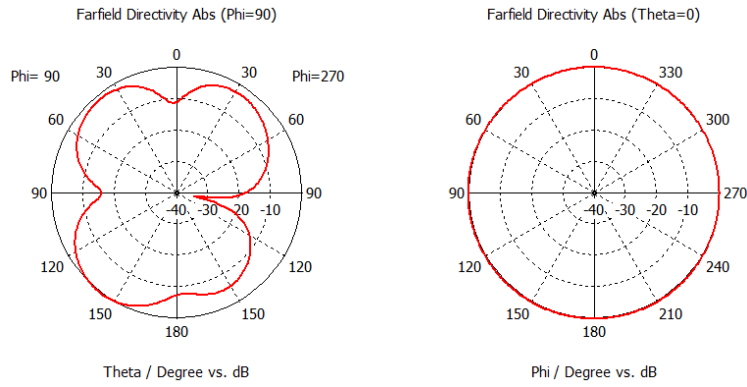


Figura A29. Plano E y H de radiación a 10 GHz para un elemento slot

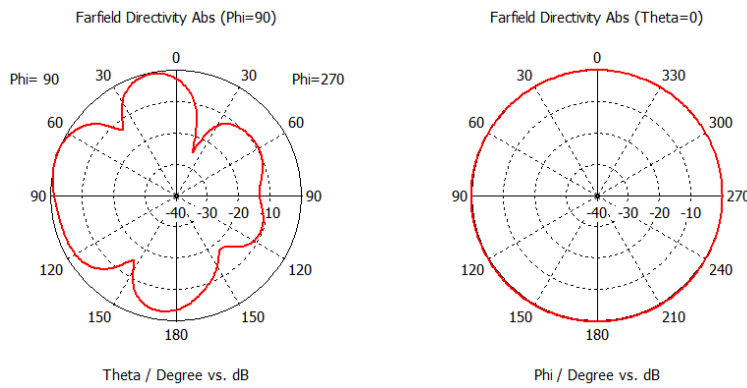


Figura A30. Plano E y H de radiación a 14 GHz para un elemento slot

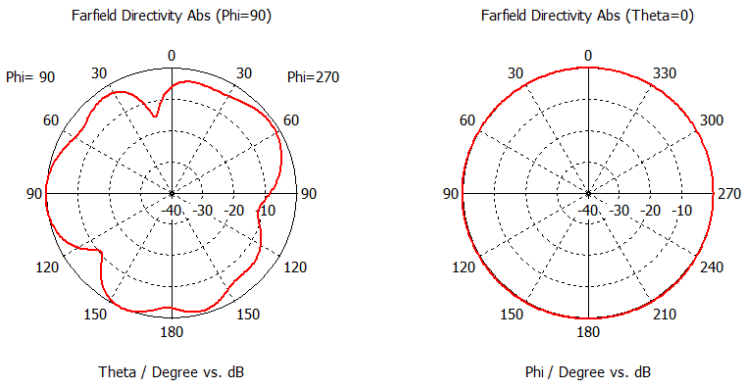


Figura A31. Plano E y H de radiación a 19 GHz para un elemento slot

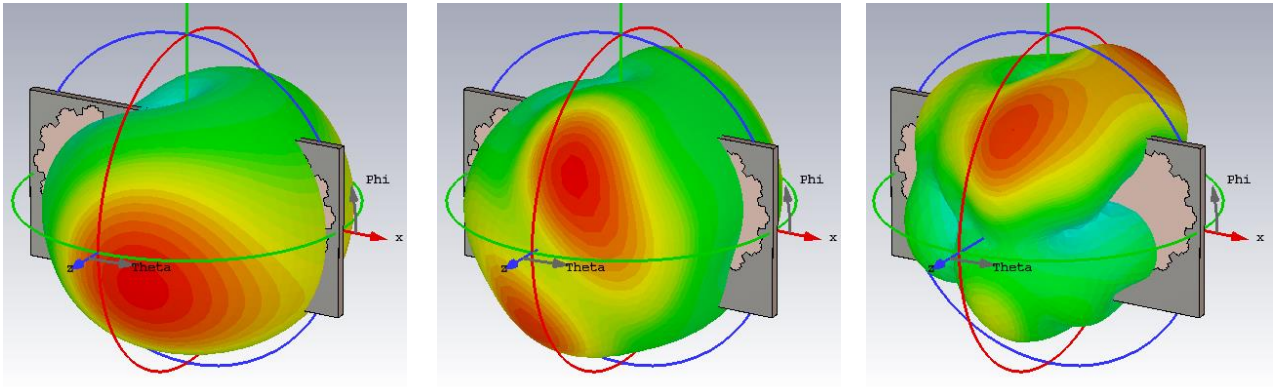


Figura A32. Diagramas de radiación a 4; 7 y 10 GHz para dos elementos slot

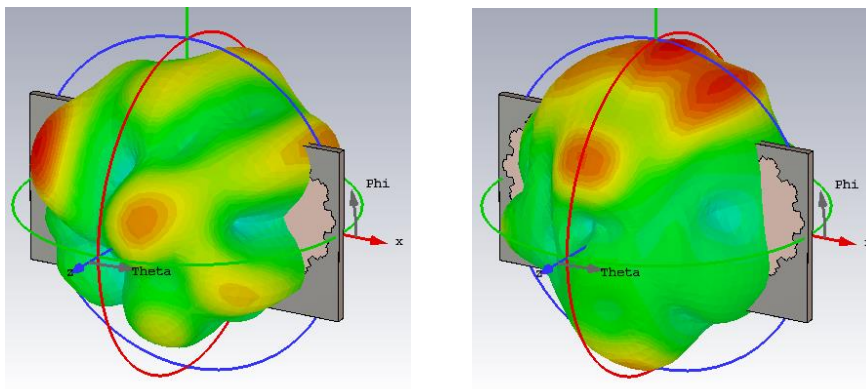


Figura A33. Diagramas de radiación a 14 y 19 GHz para dos elementos slot

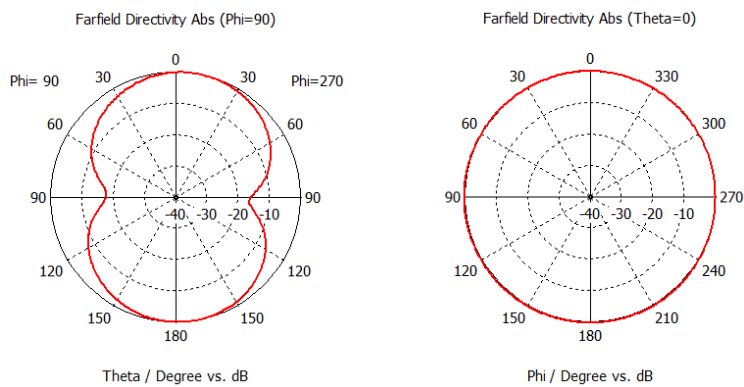


Figura A34. Plano E y H de radiación a 4 GHz para dos elementos slot

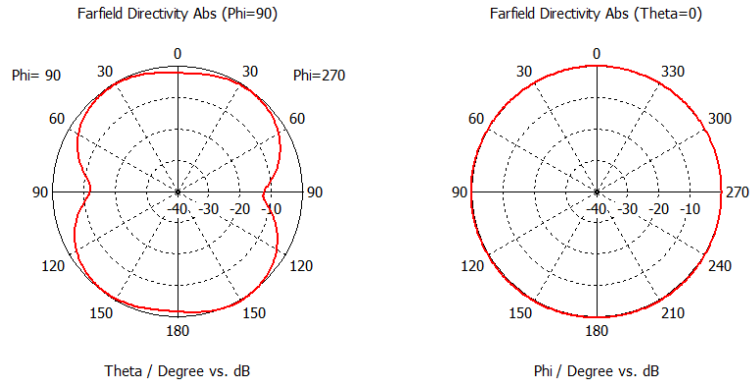


Figura A35. Plano E y H de radiación a 7 GHz para dos elementos slot

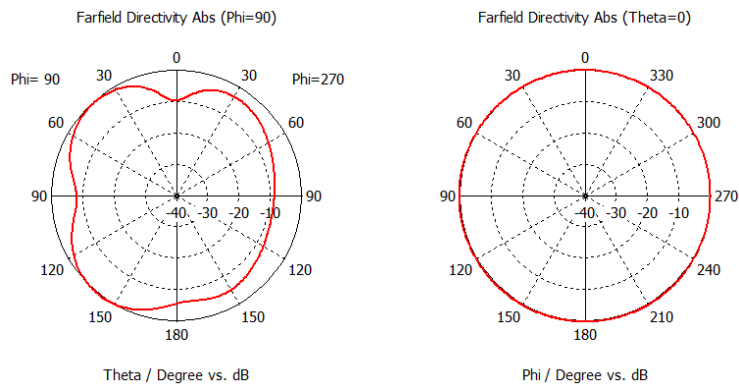


Figura A36. Plano E y H de radiación a 10 GHz para dos elementos slot

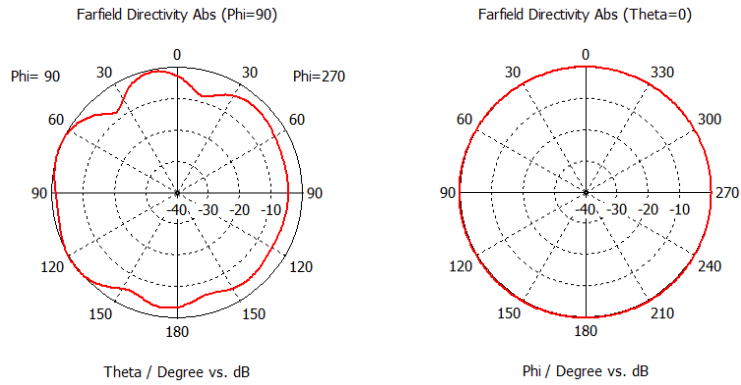


Figura A37. Plano E y H de radiación a 14 GHz para dos elementos slot

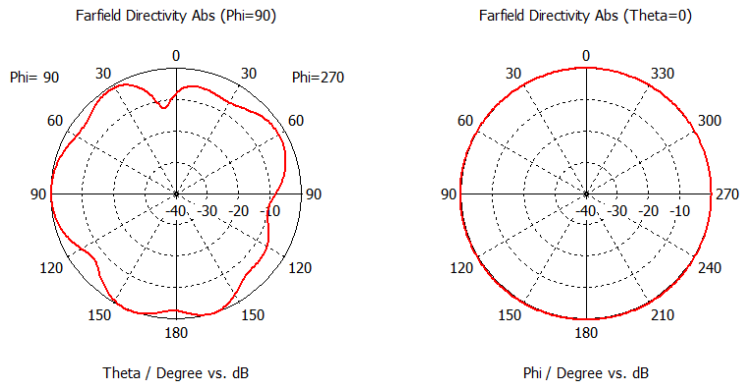


Figura A38. Plano E y H de radiación a 19 GHz para dos elementos slot

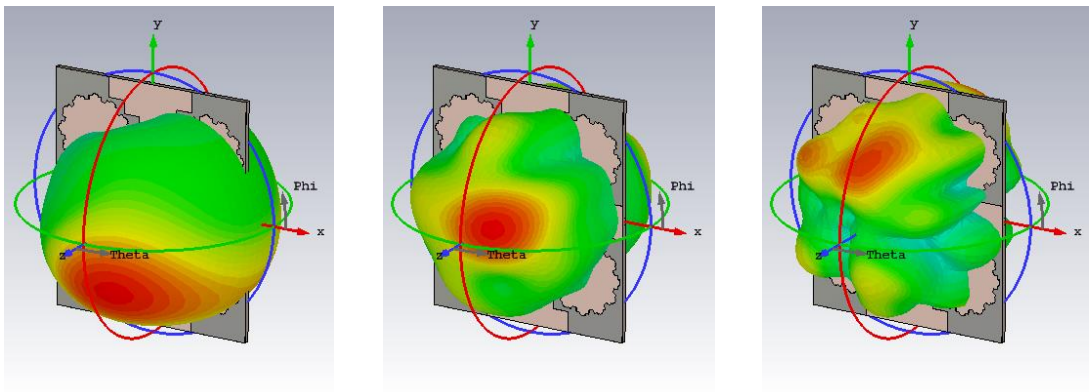


Figura A39. Diagramas de radiación a 4; 7 y 10 GHz para cuatro elementos slot

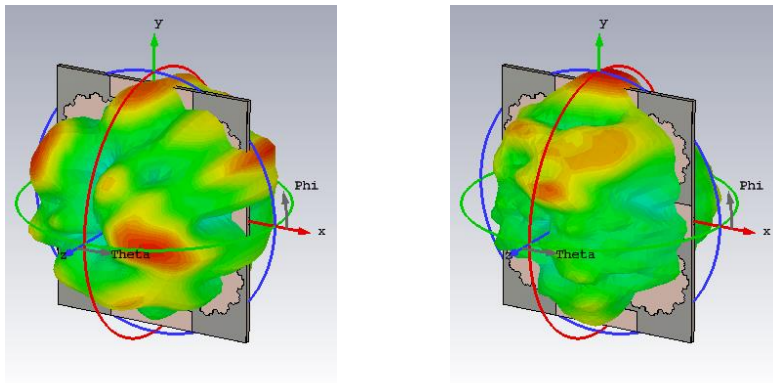


Figura A40. Diagramas de radiación a 14 y 19 GHz para cuatro elementos slot

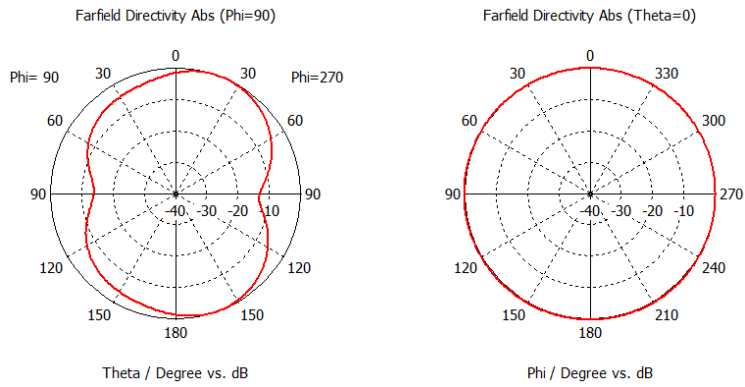


Figura A41. Plano E y H de radiación a 4 GHz para cuatro elementos slot

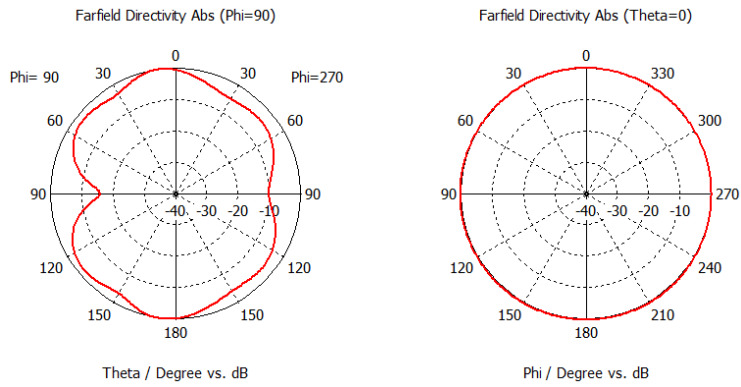


Figura A42. Plano E y H de radiación a 7 GHz para cuatro elementos slot

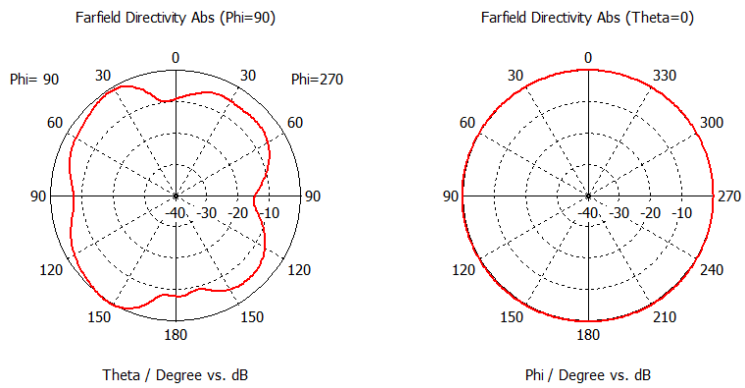


Figura A43. Plano E y H de radiación a 10 GHz para cuatro elementos slot

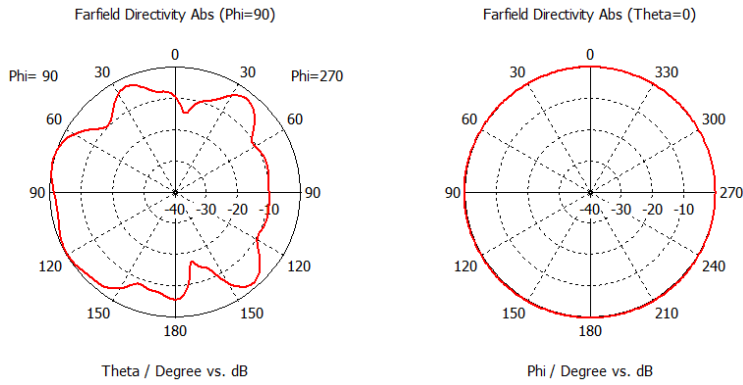


Figura A44. Plano E y H de radiación a 14 GHz para cuatro elementos slot

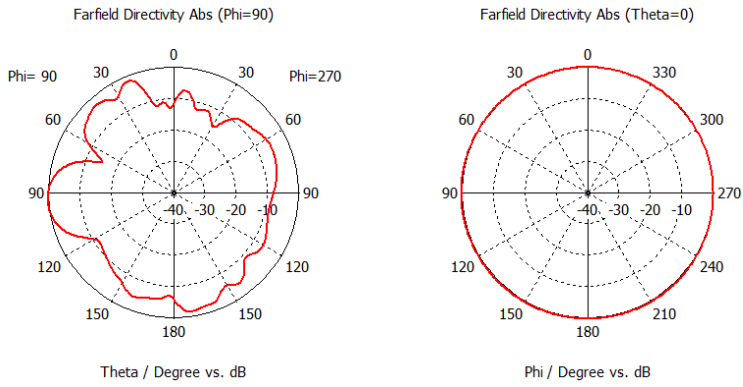


Figura A45. Plano E y H de radiación a 19 GHz para cuatro elementos slot

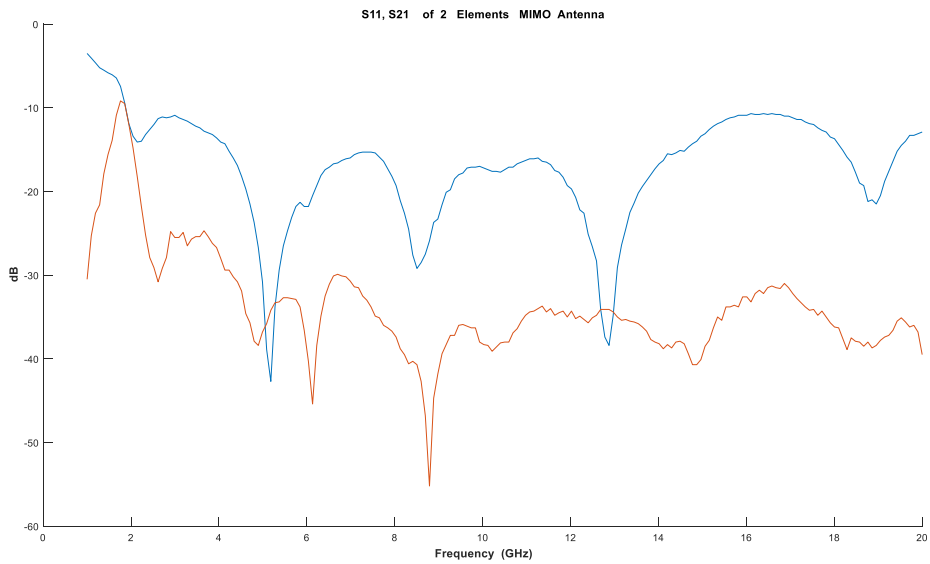


Figura A46. Parámetro S_{11} y S_{21} de antena MIMO de dos elementos

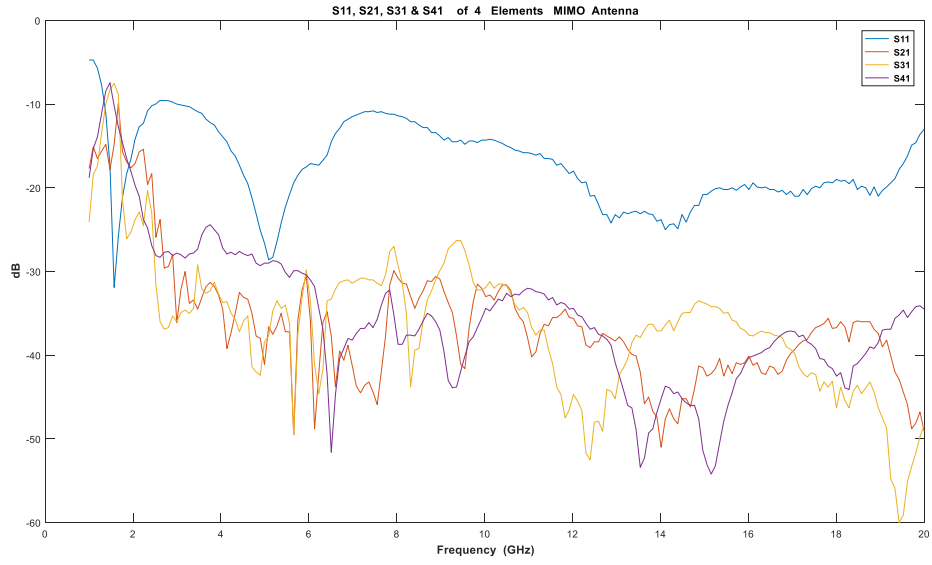


Figura A47. Parámetros S_{11} ; S_{21} ; S_{31} y S_{41} de antena MIMO de cuatro elementos

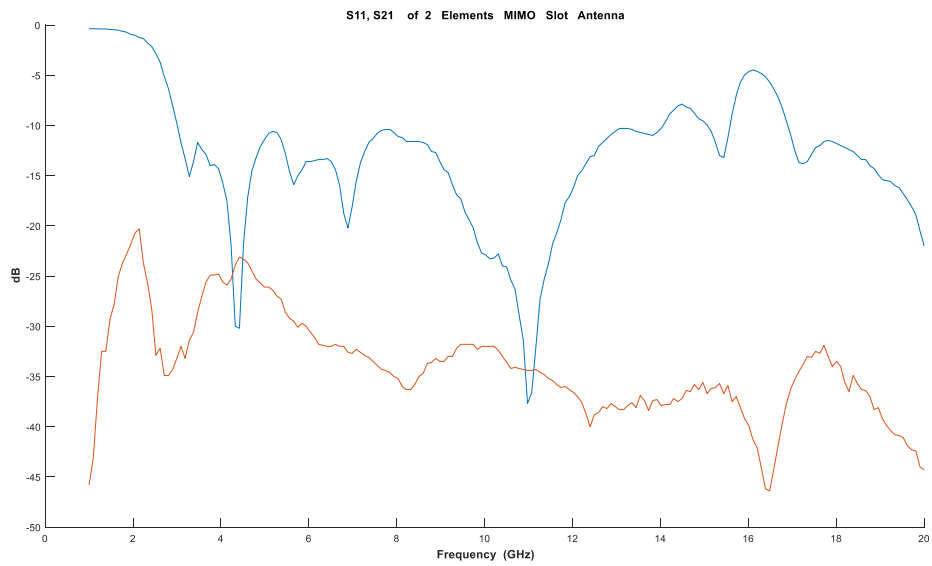


Figura A48. Parámetro S_{11} y S_{21} de antena slot MIMO de dos elementos

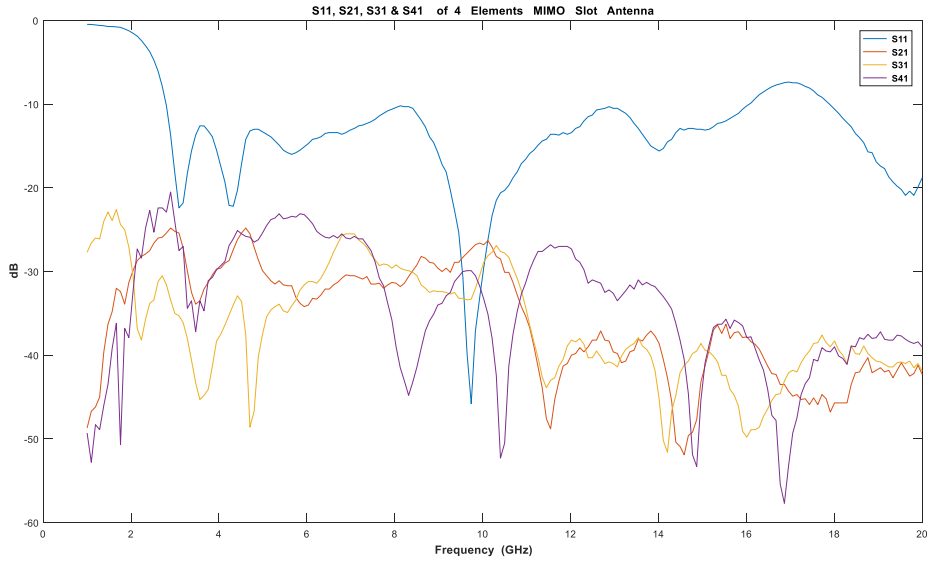


Figura A49. Parámetros S_{11} ; S_{21} ; S_{31} y S_{41} de antena slot MIMO de cuatro elementos

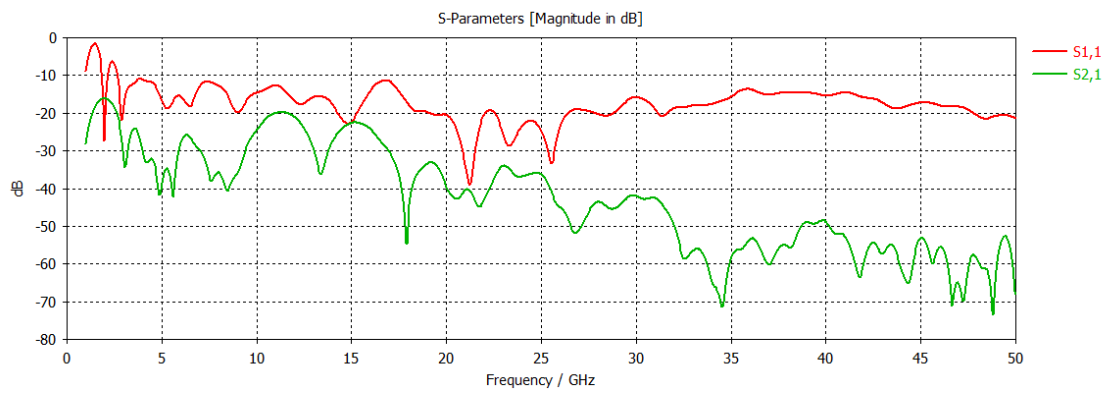


Figura A50. Parámetros S_{11} y S_{21} de antena MIMO de dos elementos hasta 50 GHz

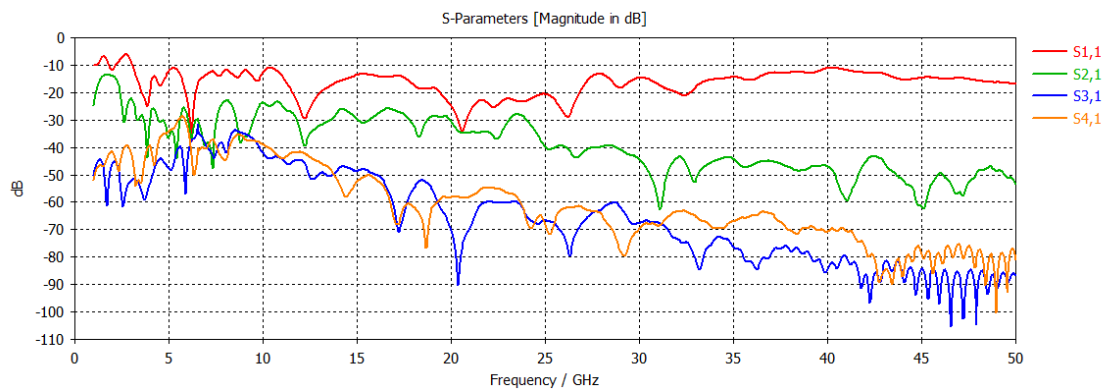


Figura A51. Parámetros S_{11} ; S_{21} ; S_{31} y S_{41} de antena MIMO de cuatro elementos hasta 50 GHz