



ESCUELA DE INGENIERÍA DE
FUENLABRADA

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS
AUDIOVISUALES Y MULTIMEDIA

Curso académico: 2022/2023

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO DE ANTENA DE PARCHE
PARA ESTACIONES BASE 5G

Autor: Jorge Javier Rodríguez Monereo

Tutor: Eduardo Martínez de Rioja del Nido

Cotutora: Ana Arboleya Arboleya

Agradecimientos

Con razón de la finalización de esta etapa, probablemente la etapa más importante en cuanto a mi vida profesional, al menos, de momento, me gustaría recordar a las personas que de una forma u otra han facilitado su realización. Con este TFG, se cierra un ciclo que me ha supuesto un avance tanto intelectual como personal.

En primer lugar, por supuesto, me gustaría agradecer el apoyo incondicional que ha presentado mi familia en esta etapa ya que, sin él, posiblemente, hubiese sido imposible cumplir esta meta.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a mis compañeros de clase más cercanos, su compañía en los momentos más complicados y difíciles, como pueden ser exámenes, tardes y noches de estudios.

Por último, y no menos importante, me gustaría agradecer a mis tutores sus consejos para la realización del trabajo fin de grado y el tiempo que ha dedicado para sacarlo adelante.

Resumen

Hoy en día, una de las tecnologías que más se mencionan como el futuro de las comunicaciones es el 5G. Esta tecnología llegará a un gran número de hogares, dispositivos móviles, etc. Gracias a ella podremos tener comunicaciones más rápidas y conectividad para más dispositivos, pero ¿cómo podemos realizar esta comunicación? De esta pregunta surge la idea de realizar este TFG.

El objetivo principal de este proyecto será realizar el diseño de una antena, concretamente de parche, que nos permita realizar esta comunicación en la banda de frecuencia de 2.4 GHz, banda actualmente utilizada a nivel mundial para la transmisión de Wi-Fi y Bluetooth. Para el diseño del elemento radiante se hará uso de FEKO, un simulador de electromagnetismo de alta frecuencia, que cuenta con dos interfaces: CADFEKO, donde se creará y simulará el modelo, y POSTFEKO, la interfaz encargada de representar los resultados obtenidos a partir del modelo creado anteriormente.

Se establecerán los requisitos que debe cumplir la antena, tanto de diseño (materiales a utilizar, forma de la apertura, tipo de alimentación, voltaje e impedancia), como de funcionamiento (tipo de polarización, coeficiente de reflexión, ganancia máxima y forma del diagrama de radiación), y, una vez fijados los objetivos a cumplir, se comenzará a diseñar la antena. En primer lugar, se calcularán teóricamente los valores iniciales de los diferentes elementos de la antena, y más tarde, se realizarán ajustes más finos a través de barridos paramétricos y otras técnicas, mediante los que se obtendrán los valores definitivos. Una vez se obtengan los resultados requeridos para un solo elemento radiante, se obtendrán dos *arrays*, un *array* plano de 4x4 parches *microstrip* y un *array* lineal de 5x1 parches.

Tras la obtención de los *arrays*, se realizará un análisis de los diseños obtenidos y una conclusión sobre el proyecto, en la se tendrán en cuenta qué factores han sido claves para la limitación de la efectividad de los resultados obtenidos, así como recomendaciones para futuras líneas de trabajo.

Abstract

Today, one of the technologies that is most often mentioned as the future of communications is 5G. This technology will reach a large number of homes, mobile devices, etc. Thanks to it we will be able to have faster communications and connectivity for more devices, but how can we conduct this communication? From this question arises the idea of this TFG.

The main objective of this project will be to design an antenna, specifically a patch antenna, which will allow us to conduct this communication in the 2.4 GHz frequency band, a band currently used worldwide for Wi-Fi and Bluetooth transmission. To design the radiating element, we will use FEKO, a high-frequency electromagnetism simulator, which has two interfaces: CADFEKO, where the model will be created and simulated, and POSTFEKO, the interface in charge of representing the results obtained from the previously created model.

The requirements to be met by the antenna will be established, both in terms of design (materials to be used, shape of the aperture, type of feed, voltage and impedance) and operation (type of polarization, reflection coefficient, maximum gain and shape of the radiation pattern), and, once the objectives to be met have been set, the design of the antenna will begin. First, the initial values of the different elements of the antenna will be calculated theoretically, and later, finer adjustments will be made through parametric sweeps and other techniques, by means of which the definitive values will be obtained. Once the required results are obtained for a single radiating element, two arrays will be obtained, a flat array of 4x4 microstrip patches and a linear array of 5x1 patches.

After obtaining the arrays, an analysis of the designs and a conclusion on the project will be made, considering which factors have been key to the limitation of the effectiveness of the results obtained, as well as recommendations for future lines of work.

Índice

1.	Introducción	1
1.1.	Motivación del proyecto	2
1.2.	Objetivos	2
1.3.	Metodología y plan de trabajo	3
1.4.	Estructura de la memoria	4
2.	Estado del arte.....	6
2.1.	Introducción a las antenas.....	6
2.1.1.	Historia de las antenas	7
2.1.2.	Radiación de las antenas.....	8
2.2.	Antenas de parche.....	11
2.2.1.	Introducción	11
2.2.2.	Origen de las antenas de parche	11
2.2.3.	Método de radiación	12
2.2.4.	Método de alimentación	14
2.2.5.	Forma del parche.....	15
2.2.6.	Substrato	16
2.2.7.	Impedancia de entrada.....	16
2.2.8.	Polarización.....	17
2.3.	Antenas para 5G	17
2.4.	Arrays de antenas	19
3.	Diseño de la antena de parche	22
3.1.	Requisitos de la antena	22
3.2.	Fases del diseño.....	22
3.3.	Diseño de la antena	23
3.3.1.	Configuración inicial	23
3.3.2.	Estudio paramétrico de los dieléctricos	30
3.3.3.	Optimización de la línea de transmisión	34
3.3.4.	Optimización del parche.....	36
3.3.5.	Optimización de la apertura	40
3.4.	Diseño de dos arrays de parches.....	46
3.4.1.	Array lineal 5x1	47
3.4.2.	Array 4x4.....	49

4. Conclusiones y líneas futuras	52
4.1. Conclusiones	52
4.2. Líneas futuras	53
Bibliografía.....	56
ANEXO 1. FEKO	58

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de Gantt del TFG.	4
Figura 2. Tipos de antena	7
Figura 3. Planos de acimut y elevación [4]	9
Figura 4. Campo eléctrico en una antena de parche rectangular. [1].....	13
Figura 5. Aperturas radiantes y densidades de corrientes magnéticas. [1].....	13
Figura 6. Métodos de alimentación de una antena de parche [1].....	15
Figura 7. Formas de parche. [1].....	16
Figura 8. Modelos de antena microstrip a diseñar, con alimentación mediante acoplo por apertura: (a) vista superior, (b) vista en perspectiva con la configuración de las distintas capas.	23
Figura 9. Cuboides que forman el dieléctrico de la antena: (a) cuboide superior y (b) cuboide inferior.	25
Figura 10. Geometría del parche.....	26
Figura 11. Rectángulo que forma el plano de tierra (a) y la apertura (b).	27
Figura 12. Geometría de la línea de transmisión	28
Figura 13. Rectángulo dividido en dos que formará el puerto (a) negativo y (b) positivo	29
Figura 14. Primer diseño de antena: (a) vista superior y (b) vista inferior.....	29
Figura 15. Diagrama de radiación 3D a 2.4 GHz del primer diseño de la antena de parche.....	30
Figura 16. Substrato del segundo modelo: (a) substrato de arriba y (b) substrato de abajo.	31
Figura 17. Modelo de la segunda antena: (a) vista en perspectiva y (b) vista superior. 31	
Figura 18. Diagrama de radiación 3D del segundo modelo de variación de ϵ_r	32
Figura 19. Diagrama de radiación 3D del tercer modelo de variación de ϵ_r	32
Figura 20. Diagrama de radiación 3D del cuarto modelo de variación de ϵ_r	33
Figura 21. Radiación 3D del quinto modelo de variación de ϵ_r	33
Figura 22. Radiación 3D del sexto modelo de variación de ϵ_r	34
Figura 23. Diagrama de radiación 3D a 2.4 GHz para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la línea de alimentación.	35
Figura 24. Corte en el plano XZ del diagrama de radiación en ganancia para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la línea de alimentación.	35

Figura 25. Coeficiente de reflexión para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la línea de alimentación.....	35
Figura 26. Diagrama de radiación 3D a 2.4 GHz para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones del parche.....	36
Figura 27. Corte en el plano XZ del diagrama de radiación en ganancia para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones del parche... ..	36
Figura 28. Coeficiente de reflexión para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones del parche.....	37
Figura 29. Diagrama de radiación 3D a 2.4 GHz para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la apertura.....	37
Figura 30. Corte en el plano XZ del diagrama de radiación en ganancia para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la apertura.	38
Figura 31. Coeficiente de reflexión para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la apertura.....	38
Figura 32. Coeficiente de reflexión del rango de frecuencias.....	39
Figura 33. Diseño de la apertura en forma de H.	41
Figura 34. Coeficiente de reflexión con la apertura en forma de H.....	42
Figura 35. Diagrama 3D de radiación a 2.4 GHz con la apertura en forma de H.	42
Figura 36. Diagrama 3D de radiación a 2.2 GHz con la apertura en forma de H.	42
Figura 37. Diagrama 3D de radiación a 2.6 GHz con la apertura en forma de H.	43
Figura 38. Ganancia máxima en todas las frecuencias analizadas.....	43
Figura 39. Corte en el plano $\phi = 0^\circ$ del diagrama de radiación a 2.4GHz.	44
Figura 40. Corte en el plano $\phi = 90^\circ$ del diagrama de radiación a 2.4GHz.	44
Figura 41. Relación axial en unidades naturales.	45
Figura 42. Relación axial en decibelios.....	46
Figura 43. Representación 3D de la relación axial a 2.4 GHz.	46
Figura 44. Array Lineal 5x1.	47
Figura 45. Diagrama de radiación 3D del Array Lineal 5x1: (a) vista frontal, (b) vista lateral.....	47
Figura 46. Ganancia máxima en las frecuencias simuladas.	48
Figura 47. Corte en el plano $\phi = 90^\circ$ del diagrama de radiación a 2.4 GHz.	48
Figura 48. Corte en el plano $\phi = 0^\circ$ del diagrama de radiación a 2.4 GHz.	48
Figura 49. Array Lineal 4x4.	49
Figura 50. Diagrama de radiación 3D del array 4x4: (a) vista frontal, (b) vista lateral ..	50
Figura 51. Ganancia máxima en las frecuencias simuladas.	50
Figura 52. Ancho del haz con corte $\phi 90^\circ$	50
Figura 53. Ancho del haz con corte $\phi 0^\circ$	51

Figura 54. Menú Home de Feko.	58
Figura 55. Menú Construct de Feko.	58
Figura 56. Menú Source/Load de Feko.....	58
Figura 57. Menú Request de Feko.....	59
Figura 58. Menú Mesh en Feko.	59
Figura 59. Menú Solve/Run de Feko.	59
Figura 60. Menú View de Feko.	59
Figura 61. Variables de Feko.....	60
Figura 62. Características de diseño en Feko.	60
Figura 63. Geometría del diseño.	60

Índice de tablas

Tabla 1. Comparativa de barridos paramétricos del elemento radiante.....	39
Tabla 2. Comparativa de resultados finales.	51

1. Introducción

El objetivo de este primer capítulo es conocer el contenido de este Trabajo de Fin de Grado (TFG). En él, se explicarán los motivos que dieron lugar a la realización de este TFG, así como los objetivos que se desarrollarán a lo largo de este documento.

A través de este documento se realizará el diseño de una antena de parche que nos permita transmitir y recibir señales 5G en la banda de 2.4 GHz. El parche estará alimentado mediante una configuración de acoplo por apertura. La antena radiará en polarización lineal y su diseño se optimizará para lograr que esté adaptada en una banda lo más ancha posible en torno a 2.4 GHz. Posteriormente, se empleará el parche diseñado para conformar dos agrupaciones (*arrays*) de antenas, un *array* lineal de 5x1 elementos y un *array* plano de 4x4 elementos, y se estudiarán los diagramas de radiación de dichos *arrays* para evaluar las ventajas de su utilización con respecto a la antena de parche individual.

El proyecto se estructura en cinco capítulos y un anexo, por medio de los cuales se explicarán los objetivos que se pretenden alcanzar en el TFG, la motivación que ha llevado a su realización, se darán nociones de las ondas utilizadas en este tipo de antenas y se explicará el flujo de ondas que se originan, desde la alimentación de la antena hasta la radiación que produce. Se analizará, a la finalización de este documento, si se han conseguido realizar los objetivos propuestos al comienzo de éste y, finalmente, se evaluarán los trabajos futuros que pueden llevarse a cabo a través del uso de esta antena de parche.

La realización del diseño de la antena de parche del presente proyecto se hace para un caso de funcionamiento determinado, ya que dependiendo de las necesidades de cada transmisión y de las frecuencias en las que se trabaje, este diseño puede sufrir cambios. Lo que se pretende no es realizar un modelo genérico, ya que éste no existe, sino

proporcionar un diseño de una antena *microstrip* con unas características detalladas que tenga unos resultados adecuados en la banda de 2.4 GHz.

Todo el trabajo realizado y que ha hecho posible la realización de este proyecto, tanto el diseño de la antena como la explicación de su funcionamiento, ha surgido en base a los conocimientos adquiridos en estos cinco años de carrera, junto a las diferentes fuentes de conocimiento que he utilizado, como pueden ser libros o internet. Esta bibliografía se encuentra en el final de este documento.

1.1. Motivación del proyecto

Desde la aparición de la tecnología 5G, ésta se ha impuesto como la tecnología con más futuro en el mundo de la transmisión de señales. La tecnología 5G nos ofrece una mayor velocidad de transmisión de las señales y una cantidad mucho mayor de dispositivos conectados entre sí.

Es muy común escuchar los tipos de avances que va a suponer la instauración de esta tecnología, pero muy poco común conocer cómo se produce la transmisión y recepción de señales de comunicaciones 5G, es decir, cuál es la infraestructura que conlleva esta tecnología y su modo de funcionamiento.

Siendo prácticamente el presente de nuestra telecomunicación, se hace necesario explicar el sistema de propagación que hace posible que todos estos avances sean una realidad, siendo esta la motivación que nos hace realizar el diseño de una antena para una estación base 5G.

1.2. Objetivos

El objetivo principal del TFG es el diseño de una antena de parche que permita realizar la transmisión y recepción de señales a la frecuencia de 2.4 GHz, en un determinado

bando de ancha, y con las menores pérdidas posibles. Para conseguirlo, es necesario abarcar los siguientes objetivos secundarios:

- Adquirir nociones de los tipos de antena que se utilizan en 5G.
- Analizar y entender la estructura de una antena de parche.
- Realizar el diseño de la antena de parche para operar a 2.4 GHz, realizando para ello un estudio detallado del mismo.
- Desarrollar una configuración de alimentación mediante acoplo por apertura para la antena de parche.
- Optimizar el diseño para lograr el mayor ancho de banda posible de adaptación de la antena.
- Realizar el diseño de un *array* de antenas.
- Realizar una evaluación de los trabajos futuros que podrán realizarse a partir de este tipo de antenas con esta tecnología.

1.3. Metodología y plan de trabajo

Para poder llevar a cabo este TFG y su investigación, se han estudiado varios artículos relacionados con la temática de éste. En concreto, artículos que explican cómo realizar diseños y aumentar la directividad y el ancho de banda de las antenas de parche, a través de diferentes técnicas para llegar a conseguir los resultados esperados.

Para poder analizar, diseñar y simular las estructuras, se ha utilizado la herramienta FEKO [3]. Este software permite crear estructuras complejas en 2D y 3D, además de realizar simulaciones de éstas, viendo de esta manera parámetros como la directividad, el diagrama de radiación, el coeficiente de reflexión, etc.

El plan de trabajo que se ha seguido ha sido en función de las directrices que han marcado los tutores. En el siguiente diagrama de Gantt se puede comprobar el diagrama de las tareas realizadas:

	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Planteamiento de propuestas	■									
Propuesta inicial del trabajo de fin de grado	■									
Documentación sobre antenas microstrip		■								
Aprendizaje de la herramienta FEKO		■								
Creación y simulaciones del diseño				■						
Realización de la memoria del TFG			■			■			■	
Preparación de la presentación										■
Entrega										■

Figura 1. Diagrama de Gantt del TFG.

1.4. Estructura de la memoria

En este apartado se explicará el contenido del presente documento. Para ello, se explica cómo está estructurado, detallando cada uno de los capítulos y bloques de los que consta:

1. **Introducción:** en este primer capítulo, se da a conocer la motivación que dio lugar a la realización del trabajo, los objetivos que se esperan desarrollar en el mismo y una clarificación de la estructura de la memoria.
2. **Estado del arte:** en este capítulo se tratarán diversos temas sobre las antenas. A continuación, se describirán los tres principales bloques de este capítulo.
 - **Introducción de las antenas:** en este bloque, se podrá ver el desarrollo de las antenas a lo largo de la historia, hasta llegar a las antenas de parche para usos con tecnología 5G que se tratarán en este proyecto.
 - **Antenas de parche:** en este segundo bloque, se podrán ver más en profundidad en las antenas de parche, ya que es el tipo de antena en el que se basará nuestro TFG.
 - **Antenas para 5G:** a lo largo de este bloque, se verá la tecnología utilizada y los diferentes desarrollos que se han ido incorporando a este tipo de antenas.

3. **Diseño de la antena de parche:** en este tercer capítulo, se verán las diferentes fases que se han llevado a cabo para construir la antena de parche. El diseño de la antena se ha llevado a cabo en varias etapas:
- **Requisitos de la antena:** en este primer bloque, se detallan los objetivos que debe cumplir la antena a diseñar.
 - **Fases de diseño:** en este segundo bloque, se pueden ver las diferentes etapas que se han llevado a cabo para realizar la antena.
 - **Diseño de la antena:** en este tercer apartado, se ha creado el elemento radiante de la antena, el cual va a ser el encargado de cumplir todos los objetivos marcados en la primera parte de este apartado.
 - **Diseño del *array*:** en este último bloque del diseño de la antena, tras haber diseñado el elemento radiante de la antena, se crean dos *arrays* diferentes para mejorar los resultados obtenidos en el bloque anterior.
4. **Conclusiones y líneas futuras:** en este capítulo, una vez finalizado el desarrollo de este trabajo, se considera necesario realizar una autoevaluación y análisis de la consecución de los objetivos propuestos en el trabajo. Una vez finalizado el diseño de la antena de parche es necesario establecer qué cambios podrían realizarse en un futuro próximo.

2. Estado del arte

2.1. Introducción a las antenas

Una antena se puede definir como un dispositivo que sirve para radiar o recibir ondas, es decir, es el elemento que se encuentra entre el espacio y un dispositivo de guía que se usa para transportar la energía electromagnética [1]. Existen varios tipos de antenas:

- Las antenas de hilo: son muy comunes, se encuentran en coches, barcos... Estas antenas pueden adoptar las formas que deseen. Están formadas por un único filamento conductor, su mecanismo se basa en generar corriente electromagnética a través del movimiento de cargas.
- Las antenas de apertura: estas antenas son muy comunes ya que se utilizan para las bajas, medias y altas frecuencias, empleadas para, por ejemplo, fines aeroespaciales, telefonía, TV o satélites. Utilizan la apertura en el conductor para direccionar el haz electromagnético. Los tipos más importantes de antenas de apertura son los reflectores, las bocinas y las lentes.
- Antenas de parche, utilizadas para aplicaciones comerciales, como la telefonía móvil. Se basan en líneas de transmisión *microstrip*, compuestas por un parche metálico que puede tomar diferentes formas, situado sobre un substrato dieléctrico y un plano de masa.
- *Arrays* o agrupaciones de antenas, utilizadas para aplicaciones que requieren de alta ganancia, es decir, que la radiación se dirija al máximo. Consisten en una agrupación de antenas con una determinada geometría que permite generar un haz de radiación en la dirección deseada [1].

Algunos de los principales tipos de antenas se muestran en la Figura 2.

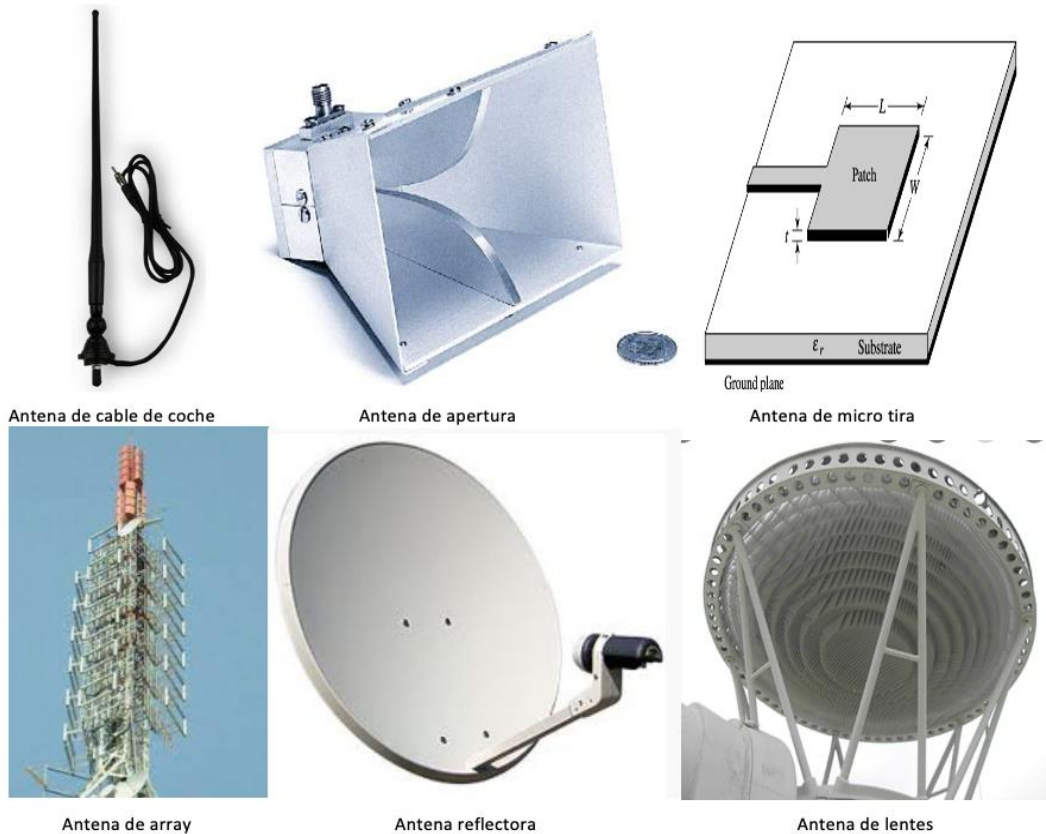


Figura 2. Tipos de antena

2.1.1. Historia de las antenas

La antena es un elemento imprescindible en el campo de la telecomunicación. Se comenzó a desarrollar cuando se descubrieron los primeros elementos radiantes.

La primera comunicación eléctrica fue la telegrafía, introducida en 1844 por Morse y Vail. Se basaba en una comunicación eléctrica fundamentada en la transmisión directa de corriente eléctrica a través de señales eléctricas que se propagaban con distinta longitud, lo que conocemos como puntos y rayas, que se traducirían mediante el código Morse [3].

La segunda comunicación eléctrica fue la telefonía, creada en el año 1876 por Graham Bell. Esta tecnología se basó en un aparato que transmitía sonidos por un cable mediante ondas eléctricas: el teléfono.

Se considera que la primera vez en la que se utilizó una antena fue en 1830, cuando Faraday, en un experimento, unió la electricidad y el magnetismo mediante una bobina que se utilizaba como bucle para recibir radiación [3].

La teoría de antenas surge a partir de los avances matemáticos de Maxwell en 1873. Mediante sus ecuaciones, denominadas “*Ecuaciones de Maxwell*”, logró unificar las teorías eléctricas y magnéticas de los avances de Hertz. Los primeros avances clave en las radiocomunicaciones se realizaron en 1897 con pequeñas distancias, pero no fue hasta 1901, con los avances de Marconi, quien consiguió enviar a través del Océano Atlántico información mediante antenas de hilo [2].

Fue unos años después, a partir de la Segunda Guerra Mundial, cuando ocurrieron los grandes avances en el campo de las antenas, se crearon nuevos elementos radiantes (las guías de ondas, bocinas, reflectores, etc.), se desarrollaron generadores de microondas como el magnetrón y el klystron a frecuencias superiores a 1 GHz, y con ello, nuevos tipos de antena: la antena Yagi, la antena de bocina, los *arrays* de antenas, las antenas de parche o la antena plana con forma de F invertida (PIFA) [2].

2.1.2. Radiación de las antenas

Un concepto muy importante para tener en cuenta en la propagación de las ondas en el espacio es la radiación, que es el flujo de partículas que viajan en forma de onda. La radiación en una antena sigue un patrón que responde a una función de coordenadas espaciales con tres variables. En la mayoría de los casos, este patrón corresponde al direccionamiento angular, y se representa gráficamente mediante el diagrama de radiación. En él, es importante definir el plano de acimut (plano entre eje x y eje y) y el plano de elevación (plano entre eje x y eje z) [4]. El plano de acimut y el de elevación se muestran en la Figura 3.

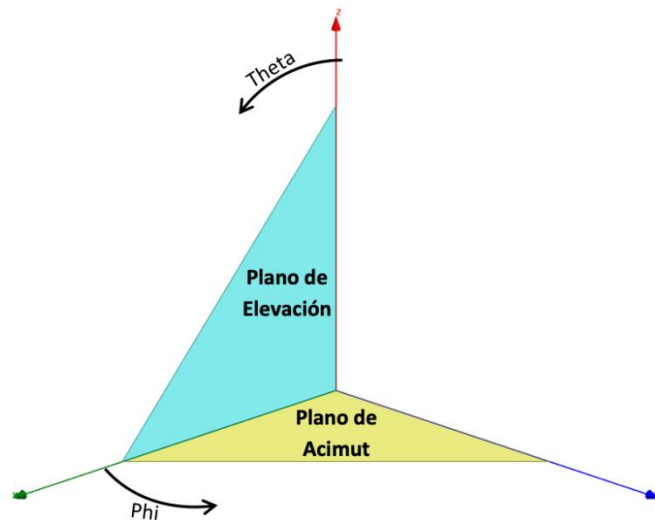


Figura 3. Planos de acimut y elevación [4]

Según la forma del diagrama de radiación, definimos las prestaciones de la antena. Hay varios tipos de diagramas de radiación:

- Isotrópicos: se radia de la misma forma en todas las direcciones.
- Omnidireccionales: se radia de forma direccional en un plano y en el otro de forma isotrópica.
- Direccionales: radia principalmente en un cono angular.

El diagrama radiación consta de varias partes [1]:

- Lóbulo principal: es el lóbulo que contiene la dirección de máxima radiación
- Lóbulos laterales: son los lóbulos con cualquier direccionamiento diferente al de máxima radiación.
- *Side Lobe Level* o SSL: es el valor más alto de ganancia o directividad del lóbulo lateral de mayor nivel.
- Ancho de haz: es el margen angular de direcciones que abarca el lóbulo principal del diagrama de radiación de la antena, típicamente se mide entre los puntos en los que la ganancia cae 3 dB.
- Relación *front to back*: relación entre las ganancias en la dirección de máxima radiación y en la dirección opuesta.
- Directividad: es la relación entre la intensidad de radiación en una dirección dada desde la antena con respecto a la intensidad de radiación media en todas las direcciones. La intensidad de radiación media es igual a la potencia total radiada

por la antena dividida por 4π . Si no se especifica la dirección de máxima intensidad de radiación ésta será implícita, es decir, en una dirección dada sobre una fuente isótropa.

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1)$$

- Ganancia: se define como la relación entre la intensidad, en una en una dirección dada, y la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada radiada por la antena fuera isótropa. La intensidad de radiación correspondiente a la potencia radiada isótropa es igual a la potencia aceptada (de entrada) por la antena dividida por 4π .

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{W_e}{4\pi r^2}} \quad (2)$$

- Polarización: es la dirección del vector de campo eléctrico que toma una onda local plana en una dirección específica y en el campo lejano de la antena. La polarización se define a partir de un parámetro llamado relación axial (en inglés, *axial ratio*, AR) el cual define la relación existente entre la amplitud de las dos componentes ortogonales del campo eléctrico. En función de este parámetro existen tres tipos de polarización:
 - Circular: si el AR ≈ 0 dB
 - Elíptica: si el AR > 0 dB
 - Lineal: si el AR $\rightarrow \infty$ dB

A partir de la radiación, obtenemos la eficiencia de la antena, la cual mide la relación entre la potencia que se radia con respecto al total de potencia suministrada a la entrada de la antena, y responde a la siguiente ecuación (3) [1]:

$$\eta = \frac{R_r}{R_L + R_r} \quad (3)$$

Donde:

R_r = resistencia de radiación de la antena
 R_L = resistencia de pérdidas de la antena

2.2. Antenas de parche

2.2.1. Introducción

La antena de parche es un elemento radiante construido en un metal de alta conductividad sobre un sustrato dieléctrico. Las antenas de parche, también conocidas como *microstrip*, tienen como principal ventaja su versatilidad, es decir, en función del diseño de los diferentes elementos que conforman la antena, forma del parche, el sustrato y el modo de excitación, se pueden modificar los parámetros de la polarización, del diagrama de radiación, de la frecuencia de resonancia y de la impedancia [4].

Otras de las principales ventajas de este tipo de antenas son: la capacidad de miniaturización que tienen (es decir, se pueden realizar los dispositivos cada vez más pequeños), el hecho de que son fáciles de integrar en todo tipo de superficies (tanto planas como no planas), su producción en masa es muy fácil debido a su bajo coste y son fáciles de adaptar con circuitos integrados de microondas.

Por otro lado, a parte de este gran número de ventajas, también tienen desventajas: este tipo de antenas tienen baja potencia de radiación debido a que su estructura no puede soportar altas potencias en sus componentes, tienen baja eficiencia, un ancho de banda estrecho con considerables pérdidas y son muy sensibles al factor térmico [8].

2.2.2. Origen de las antenas de parche

La tecnología *microstrip*, es decir, la base de las antenas de parche es el resultado de la evolución del principio de realizar diseños de antenas de tamaños cada vez más reducidos, tanto en antenas como en líneas de transmisión, para que fuesen capaces de acoplarse en cualquier dispositivo [7].

Los circuitos *microstrip* tuvieron sus primeros avances en los años 50, cuando aparecieron los primeros circuitos impresos para microondas bajo el nombre de *striplines* y esta *stripline* se define como una tira delgada conductora situada en un dieléctrico con dos capas metalizadas, situadas en la parte superior e inferior del dieléctrico. Teniendo

como punto de referencia esta *stripline*, se comenzaron a desarrollar los nuevos circuitos de microondas.

La primera vez que fueron publicadas las líneas *microstrip* fue en el año 1952, donde se retiró la parte superior del sustrato de las *striplines*, dejando la línea conductora en el exterior. Debido a su estructura abierta, poseían grandes pérdidas por radiación. Para solucionar este problema, se fueron creando sustratos de menores pérdidas.

El primer modelo de líneas de *microstrip* se llevó a cabo por parte de Wheeler, un modelo basado en una aproximación casi-TEM que todavía es usada en modelos actuales [7].

2.2.3. Método de radiación

La antena de parche está configurada como un *array* de aperturas radiantes, ambas aperturas constan de los mismos elementos: el ancho, denominado como a , y la altura, denominada como h . Estos dos elementos están separados una distancia denominada b . Los campos radiados por ambas aperturas tienen una aportación al campo total de la antena poco significativa debido a que ambas aperturas anteriormente mencionadas se cancelan a lo largo del plano.

La radiación se realiza mediante los *slots* radiantes, los cuales se encuentran separados por una línea de transmisión de placas paralelas que se caracteriza por tener una impedancia característica muy baja y una longitud que transforma estas impedancias para que las aperturas tengan polarizaciones opuestas, con un valor cercano a la media longitud de onda en el sustrato [1]. La Figura 4 muestra el campo eléctrico de una antena de parche rectangular.

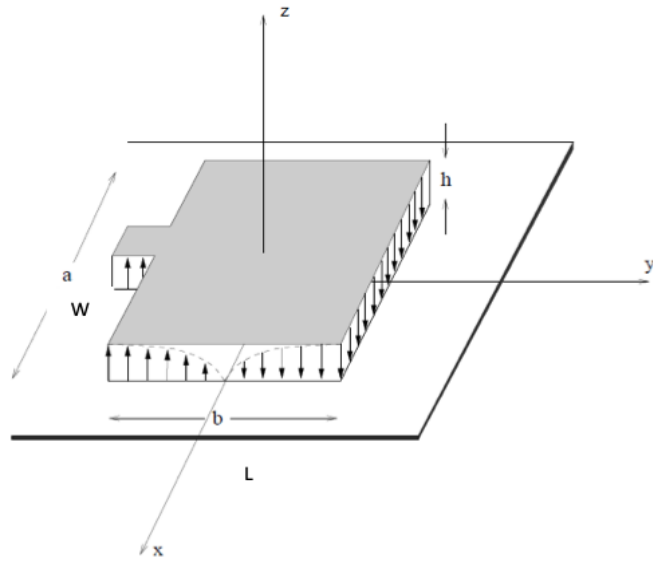


Figura 4. Campo eléctrico en una antena de parche rectangular. [1]

El principio de Huygens nos dice que cada apertura radiante puede modelarse como un dipolo magnético, respondiendo a la fórmula $\mathbf{M} = -2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}$. Donde \mathbf{M} responde a la densidad de corriente magnética y \mathbf{E} al campo eléctrico en la apertura. Ambas densidades de corriente tienen la misma magnitud y fase y los campos radiados se suman en fase en la dirección del eje z . Un ejemplo de la antena se muestra en la Figura 5.

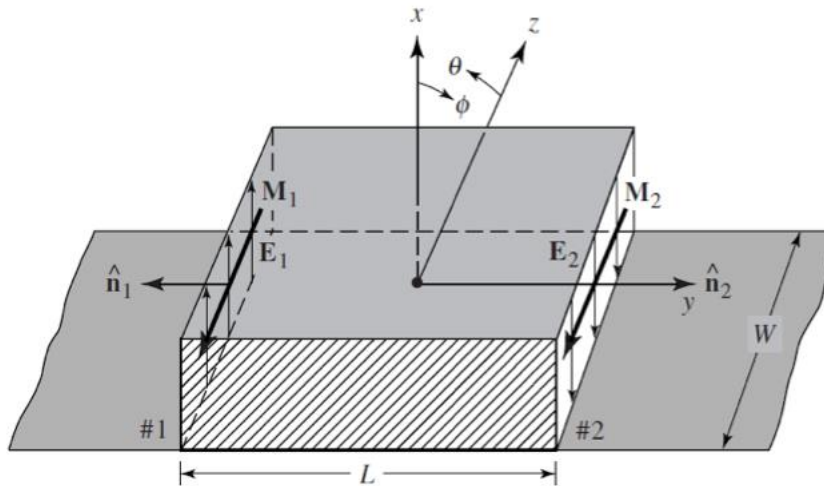


Figura 5. Aperturas radiantes y densidades de corrientes magnéticas. [1]

2.2.4 Método de alimentación

Hay numerosas configuraciones para alimentar una antena de parche, a continuación, se presentan las cuatro principales [9]:

- Línea *microstrip*: fácil de fabricar, simple de adaptar mediante el control de posición de inserción y bastante sencillo de modelar. Sin embargo, como desventaja tiene que a medida que aumenta el grosor del sustrato, aumentan las ondas superficiales y la radiación espuria de la alimentación, lo que en los diseños prácticos provoca una limitación de ancho de banda.
- Sonda coaxial: el conductor interior de la sonda coaxial está unido al parche de radiación mientras que el conductor exterior está conectado al plano de tierra. Es un método bastante común, ya que esta alimentación tiene una sencilla fabricación. Como desventaja, posee un ancho de banda estrecho y es difícil de modelar.
- Acoplamiento por proximidad: la línea de alimentación se encuentra entre dos sustratos dieléctricos, el plano de masa se encuentra debajo del primer sustrato y el parche se ubica en el segundo sustrato. Se puede aumentar el ancho de banda aumentando el grosor del sustrato, y como desventaja, el grosor de la antena aumenta respecto a las anteriores.
- Acoplamiento por apertura: contiene los mismos elementos que el anterior, pero cambia su distribución, la línea de alimentación se encuentra debajo del primer sustrato, el parche se encuentra encima del segundo sustrato y la masa se encuentra entre los dos sustratos. El tamaño de la apertura permite ajustar el ancho de banda y disminuir pérdidas. Como desventaja, al igual que el anterior, tiene el tamaño de la antena. Los diferentes métodos de alimentación de una antena se muestran en la Figura 6.

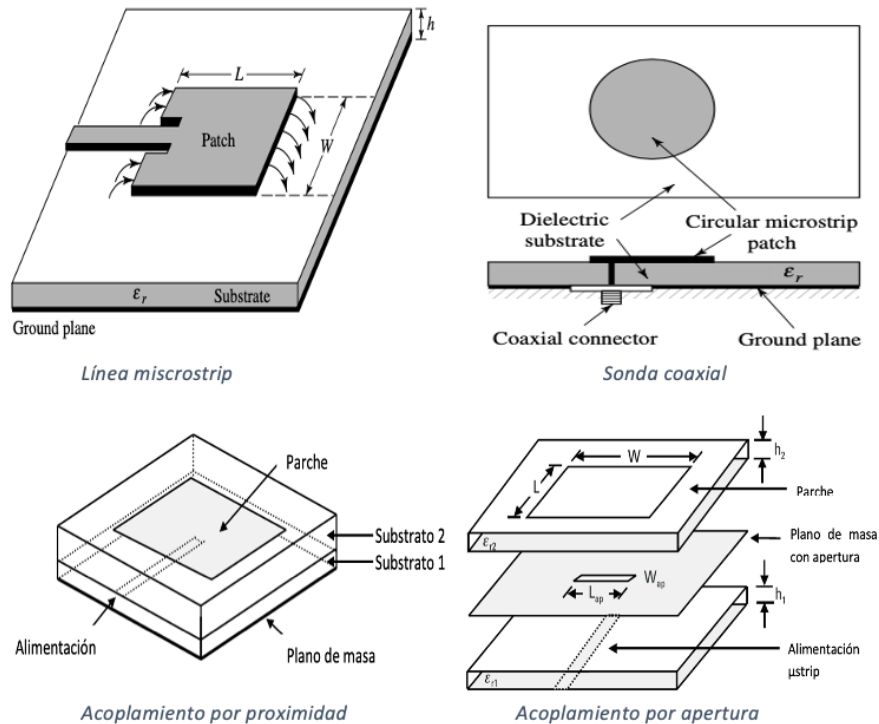


Figura 6. Métodos de alimentación de una antena de parche [1]

2.2.5. Forma del parche

A la hora de diseñar el parche de una antena, las dos formas más comunes son dos formas geométricas sencillas como el rectángulo y el círculo. Esto se debe a que a partir de estas dos formas se pueden realizar infinitas de variaciones para modelarlas a gusto del fabricante y de esta manera conseguir las características deseadas. En este apartado, veremos en detalle estas dos formas de parches [4].

En primer lugar, el **parche rectangular**, esta forma geométrica es la más utilizada ya que es muy fácil de fabricar y permite una gran variedad de diseños para conseguir parches más complejos que nos aporten características concretas.

En segundo lugar, el **parche circular**, se basa en un proceso totalmente empírico debido a que las formas derivadas del círculo (como la elipse) no se rigen por las expresiones del parche de diseño rectangular. Una de las ventajas de estos parches respecto a los rectangulares es que consiguen la misma frecuencia de resonancia con menor superficie,

lo que nos aporta una antena más pequeña. Tanto la forma circular como la forma rectangular de un parche se muestran en la Figura 7.

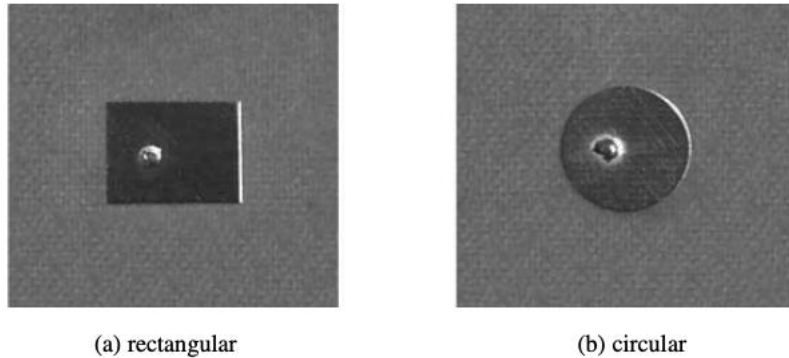


Figura 7. Formas de parche. [1]

2.2.6. Substrato

El substrato se sitúa debajo del parche para dotar de una estructura rígida a la antena y actuar como aislante para tener las menores pérdidas posibles. Es importante analizar detalladamente las características del substrato, ya que el rendimiento de la antena depende directamente de él. Estas características que hay que tener en cuenta a la hora de fabricar el substrato son las siguientes [8]:

- Grosor: cuanto mayor es el grosor del substrato, más podemos aumentar el ancho de banda de la antena.
- Permitividad eléctrica (ϵ): también conocida como constante dieléctrica, cuando menor es la permitividad eléctrica mayor es el ancho de banda de la antena, pero cuanto menor es la permitividad eléctrica, el tamaño de la antena es mayor.
- Tangente de pérdidas ($\tan \delta$): cuanto menor es esta tangente, la eficiencia de la antena es mayor, pero esta eficiencia es difícil de ganar ya que tener una baja tangente de pérdidas tiene un coste muy alto de fabricación.

2.2.7. Impedancia de entrada

La impedancia de entrada (Z_{in}) es la impedancia que presenta una antena en sus terminales, o la relación entre la tensión y la corriente en un par de terminales de entrada [1]. Tanto la parte real como la imaginaria de la impedancia de entrada varían en función de la frecuencia, es decir, la reactancia de alimentación es muy pequeña comparada con

la resistencia de resonancia para substratos muy finos. Sin embargo, para elementos gruesos la reactancia puede ser significativa y debe tenerse en cuenta en la adaptación de impedancias y en la determinación de la frecuencia de resonancia de un elemento cargado. Las variaciones de la reactancia de alimentación pueden variar en función de la posición considerando el modelo del parche rectangular con sus cuatro paredes conductoras perfectas. Cuando el punto de alimentación está lejos de uno de los bordes, el campo magnético no se superpone por lo que la inductancia asociada con la densidad de energía magnética almacenada cerca del alimentador se deberá a la corriente del alimentador [5].

2.2.8. Polarización

Los parches con sus formas geométricas correspondientes que hemos visto anteriormente irradian ondas de polarización lineal, sin embargo, se pueden obtener polarizaciones circulares y elípticas utilizando varios arreglos de alimentación.

La polarización circular se puede obtener si se excitan dos modos ortogonales con una diferencia de noventa grados, esto se puede lograr a través de ajustes de dimensiones físicas del parche o añadiendo una, dos o más líneas de alimentación. La forma más fácil de excitar idealmente la polarización circular es alimentar el elemento en dos bordes adyacentes [8].

2.3. Antenas para 5G

Con el paso de los años, se observa en la cantidad de dispositivos que están conectados a internet un aumento exponencial, y el 5G aparece primordialmente por la necesidad de establecer una red que sea capaz de dar soporte a infinidad de equipos y aumentar radicalmente el ancho de banda a la vez que disminuye la latencia en las comunicaciones de los dispositivos de la red.

En la actualidad, la tecnología se está estableciendo en el mundo, por lo que la investigación y el desarrollo de los dispositivos compatibles y adaptados al 5G es necesaria. La tecnología 5G opera en una gran variedad de bandas frecuenciales en el

espectro radioeléctrico, en este trabajo al tratarse de una antena diseñada para un escenario multifrecuencia, se diseña para el rango frecuencial 2.3 GHz - 2.5 GHz, el cual se sitúa en un rango que ofrece muy buena relación entre cobertura y capacidad (este rango es el 1 GHz - 6 GHz, el cual se espera utilizar en la gran mayoría de servicios 5G iniciales). Por tanto, es interesante comenzar a desarrollar sistemas de comunicaciones que operen en el rango 5G ya que son el futuro, y este trabajo es una muestra de ello [13].

Al tratarse de una tecnología perteneciente a un campo que se encuentra en un constante desarrollo y evolución, existen ocasiones en las que se investiga y avanza hacia nuevos ámbitos para los que no existe ninguna legislación específica al respecto, esto ocurre en la tecnología 5G en el campo de las telecomunicaciones. Actualmente se trata de un tema en el que las instituciones, tanto nacionales como internacionales, son conscientes de que se producirá un importante desarrollo a corto plazo y en el que es imprescindible enfocar correctamente esta innovación regulando todos los aspectos en la medida de lo posible, para que se realice con garantías y eficazmente. En Europa existe un gran interés por ser pioneros en el desarrollo de esta nueva tecnología, por lo que son varias las organizaciones que están legislando en el marco de esta nueva generación en el campo de las comunicaciones [14].

Las antenas *microstrip* poseen una gran gama de aplicaciones en la tecnología 5G. Uno de los usos aplicados en la tecnología 5G es su utilización en los sistemas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), los cuales son utilizados para mejorar la capacidad y el rendimiento de la red. Estas antenas son utilizadas mayoritariamente para enlaces punto a punto y enlaces punto a multipunto, como por ejemplo en las estaciones base.

Además, las antenas *microstrip* también se utilizan en aplicaciones del internet de las cosas (IoT), en sistemas de comunicaciones entre vehículos y otros dispositivos (V2X), etc. Estas aplicaciones requieren antenas de alta eficiencia que puedan operar en una amplia gama de frecuencias y en diferentes entornos [12].

En conclusión, las antenas *microstrip* son una opción popular para las aplicaciones de 5G debido a sus ventajas en términos de peso, tamaño y facilidad de fabricación. Su capacidad para operar en múltiples bandas de frecuencia las hace ideales para su uso en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo los sistemas MIMO y las antenas de

apertura. A medida que la tecnología 5G continúa evolucionando, las antenas *microstrip* seguirán siendo una parte integral de la infraestructura de telecomunicaciones.

2.4. Arrays de antenas

Un *array* es una antena compuesta por un cierto número de elementos radiantes idénticos, ordenados regularmente y alimentados de una manera específica para obtener un diagrama de radiación predefinido [10].

En ciertos tipos de aplicaciones, necesitamos patrones de radiación o ganancias que antenas formadas por un único elemento no nos pueden ofrecer, debido a que la directividad de estos suele ser pequeña, presentando haces anchos y muy poco directivos. Cuando se necesitan antenas con ganancias más elevadas o patrones de directividad estrechos y concentrados, se hace indispensable el uso de agrupaciones de antenas para modelar la radiación de la señal. En la mayoría de las ocasiones, un *array* de antena está constituido por el mismo tipo de elemento radiante, a no ser que se quieran conseguir características muy específicas o diferentes factores, como de diseño o económicos, impidan su uso [10].

Los *arrays* de antenas, tienen numerosas ventajas. Con ellos se puede controlar la amplitud de las corrientes y la fase de cada elemento del *array*, y se puede conseguir que los parámetros de la antena dependan de la señal recibida a través de circuitos asociados a los elementos radiantes.

Cuando se dispone de un *array* de antenas, lo común es que éste se diseñe para que el campo electromagnético radiado total sea la suma de los campos individuales, trabajando en forma de interferencia constructiva para el lóbulo principal, y en forma de interferencia destructiva para el resto del espacio, de forma que la máxima transferencia de potencia se centre en el lóbulo principal. La radiación del conjunto de elementos se representa en un diagrama de radiación, el cual es conocido como factor de *array*. Para conseguir un correcto funcionamiento de un *array* de antenas según las especificaciones marcadas para nuestra aplicación, se deberán tener en cuenta una serie de factores clave en el diseño [9]:

- Configuración geométrica: este diseño es clave para el resultado final ya que de ella depende la obtención de los parámetros finales deseados, por lo que es importante saber de antemano si los diferentes elementos de radiación se distribuirán linealmente, circularmente, rectangularmente, etc.
- Distancia entre elementos: es importante calcular bien la diferencia entre los diferentes elementos radiantes, ya que de ello dependerá la interferencia que se hagan entre sí y que afectará al campo lejano.
- La amplitud de excitación: una incorrecta intensidad de excitación puede producir superposiciones indeseadas que deformen por completo el patrón de radiación.
- Fase de excitación: hay dos tipos de configuraciones de fase, una estática, en la que todos los elementos radiantes tendrán la misma fase y otra llamada *phased array*, en la que cada uno de los elementos puede tener una fase diferente.
- Patrón de radiación de cada elemento: el patrón de cada elemento de radiación tiene que estar debidamente caracterizado para que, de esta manera, se pueda predecir el resultado de la antena global.

Hay diferentes tipos de *arrays* [10]:

- *Arrays* lineales: Las agrupaciones lineales tienen los elementos radiantes sobre una línea, los elementos que lo conforman producen ondas esféricas que se sumarán de forma constructiva en determinadas direcciones y se cancelarán en otras.
- *Arrays* planos: Las agrupaciones planas tienen los elementos radiantes sobre un plano, los elementos proporcionan haces direccionales, es decir, diagramas de radiación simétricos con bajos lóbulos laterales y una directividad mucho mayor que los elementos individuales.

Varios ejemplos de uso de estos tipos de *arrays* son los radares de seguimiento, sensores remotos, comunicaciones, etc.

- *Arrays* conformados: Las agrupaciones conformadas tienen los elementos radiantes sobre una superficie curva. Un ejemplo de ello es el fuselaje del avión.

3. Diseño de la antena de parche

3.1. Requisitos de la antena

El diseño de la antena debe cumplir unos requisitos básicos y específicos que responden a los siguientes parámetros:

- Ancho de banda: la antena debe tener un ancho de banda comprendido en la franja [2.3 GHz - 2.5GHz], lo que supone una frecuencia central de 2.4 GHz. En esta banda, el coeficiente de reflexión en el puerto de alimentación de la antena deberá ser menor de -10 dB.
- Ganancia: se desea diseñar una antena con un objetivo de ganancia superior a 5 dBi.
- Radiación: se necesita diseñar una antena con el lóbulo principal de su diagrama de radiación apuntando en la dirección normal al parche.
- Substrato: el diseño de la antena se debe realizar a partir de un substrato dieléctrico de tipo FR4.

3.2. Fases del diseño

La fase de diseño debe conseguir una antena que cumpla las especificaciones anteriormente mencionadas, para el diseño de la antena se han realizado los siguientes pasos:

- En primer lugar, se ha seleccionado el método de alimentación y la forma geométrica del parche, y se ha realizado un diseño básico. Este diseño básico, cuenta con dos dieléctricos, un parche, una apertura y una línea de transmisión.
- En segundo lugar, se ha realizado mejoras del diseño (modificación de la forma del parche, modificación de la forma de la apertura, variación del ancho de los

substratos) para que cumpla con los requisitos establecidos y tenga una muy buena radiación y un muy buen coeficiente de reflexión.

- En último lugar, se han simulado 2 *arrays* (uno lineal y otro plano) formados por parches como el diseñado, para evaluar sus diagramas de radiación.

3.3. Diseño de la antena

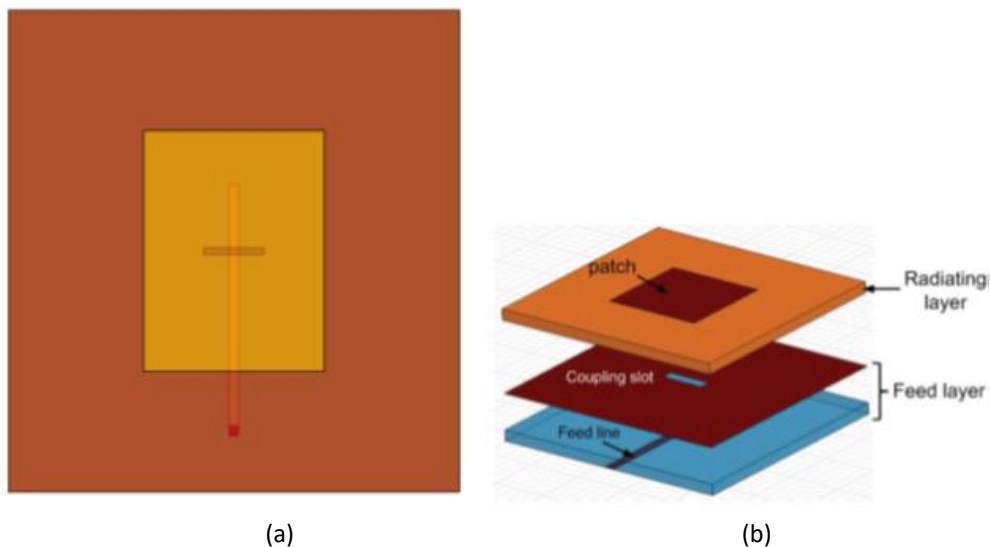


Figura 8. Modelos de antena microstrip a diseñar, con alimentación mediante acoplo por apertura: (a) vista superior, (b) vista en perspectiva con la configuración de las distintas capas.

3.3.1. Configuración inicial

Tras estudiar varios métodos de alimentación, se decide emplear el de alimentación a través de una línea de transmisión y acoplo por apertura, mostrado en la Figura 8.

Se ha comenzado el diseño de la antena a través de la comprobación del ancho de banda con una antena de parche básica, esta antena consta de un parche rectangular con un sustrato de FR4, donde se cuenta con una permitividad relativa de 4.3 y un grosor de 1.6 mm. Las dimensiones del parche se calculan respecto a la frecuencia central de la antena que tenemos interés en conseguir.

Se empiezan calculando las variables del parche, el ancho (W) se calculará a partir de la siguiente fórmula (1):

$$W = \frac{c_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4)$$

Siendo c_0 la velocidad de la luz en el espacio, f_r la frecuencia central que se quiere alcanzar y ϵ_r la permitividad relativa del sustrato. En este caso, nos sale una $W = 38.39$ mm.

Después, se calculará el largo del parche (L) mediante la fórmula (5), cuyos parámetros se calculan como se indica en las ecuaciones (6) a (8) [1]:

$$L = \frac{\lambda}{2} - 2\Delta L \quad (5)$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (6)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W}\right]^{-1} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{c_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (8)$$

Para calcular el largo del parche, en primer lugar se calcula la constante dieléctrica efectiva mediante la ecuación (7), donde la constante dieléctrica (ϵ_r) es 4.3, la altura (h) es 1.6 mm y el ancho se ha calculado anteriormente y se ha obtenido un valor de 38.39 mm. El valor de esta constante dieléctrica ha sido de 3.99. A partir de esta constante dieléctrica efectiva, se ha calculado la longitud incrementada (ΔL) utilizando (6), donde ya se poseen todos los valores necesarios. El valor de esta variable será de 10.71 mm. Por último, se calcula la longitud del parche (5) cuyo valor será de 29.76 mm.

La permitividad relativa del sustrato será la del material FR4 utilizado, es decir, 4.3, mientras que las dimensiones de ancho y de largo del bloque de sustrato equivaldrán a 2.5 veces el ancho y el largo del parche. Una vez se tienen estas variables se comienza con el diseño de la antena. Para ello, se comenzará trabajando a 2.4 GHz, ya que es la frecuencia central, para más tarde ampliar el rango de frecuencias en el que se buscará obtener buenos valores de radiación y coeficiente de reflexión.

En primer lugar, se ha diseñado una antena con una configuración inicial básica que, aunque no cumpla todas las especificaciones de funcionamiento fijadas anteriormente,

será utilizada como punto de partida para realizar un segundo diseño más optimizado de la antena.

Para comenzar este diseño inicial, se ha utilizado el software FEKO de simulación y análisis electromagnético. Se va a crear una estructura como la de la Figura 8(b), que va a estar compuesta de dos sustratos, donde sobre el sustrato de arriba habrá un parche rectangular que será un conductor perfecto, entre medias de ambos sustratos un plano de tierra que será un conductor perfecto, el cual contará con una apertura rectangular que ayudará a facilitar la radiación, y en el sustrato de abajo habrá una línea de transmisión, que será la encargada de proporcionar alimentación a la antena.

Para conseguir este diseño anteriormente mencionado, se han creado dos cuboides de forma rectangular que servirán como los dos sustratos de la antena. En el caso de la Figura 9(a), se muestra el sustrato superior, y en el caso de la Figura 9(b), el inferior, que tendrán las características que se muestran en las imágenes.

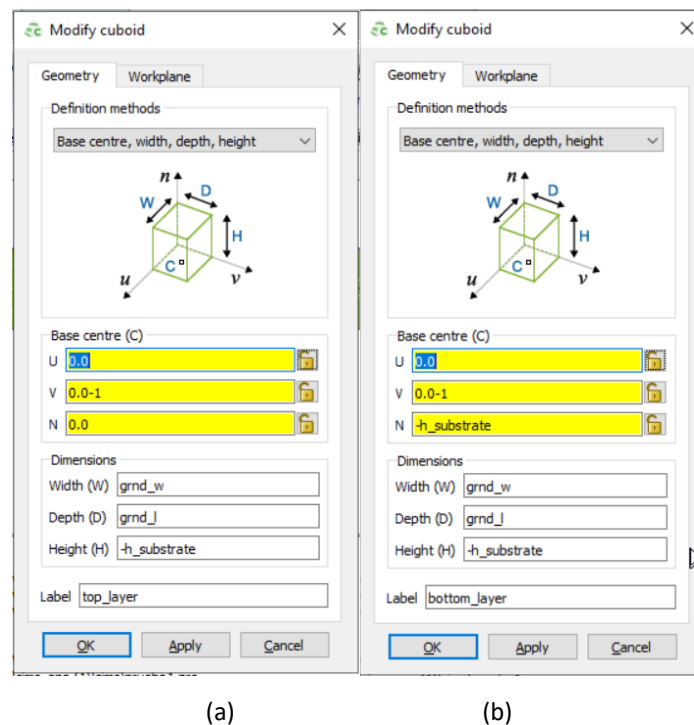


Figura 9. Cuboides que forman el dieléctrico de la antena: (a) cuboide superior y (b) cuboide inferior.

Tanto en la Figura 9(a) como en la Figura 9(b), se han utilizado distintas variables para crear los sustratos, la variable *grnd_w* corresponde al ancho del cuboide y tiene un valor

de 2.5 veces el tamaño del ancho del parche, mientras que la variable $grnd_l$ corresponde a la longitud del cuboide, con un valor de 2.5 veces la longitud del parche y la variable $h_substrate$ corresponde a la altura de este, con un valor de 1.6 mm.

Como se puede ver en las Figuras 9(a) y 9(b), se ha creado el sustrato superior con su cara de arriba centrada en el punto de coordenadas $(x, y, z) = (0,0,0)$, y después se irán añadiendo capas hacia abajo.

En el sustrato superior, es necesario que en el medio se sitúe un parche, por lo que se ha creado dicho parche a través de la geometría de un rectángulo, que cuyo centro estará en el origen de coordenadas, al igual que el sustrato superior. Sus características se muestran en la Figura 10.

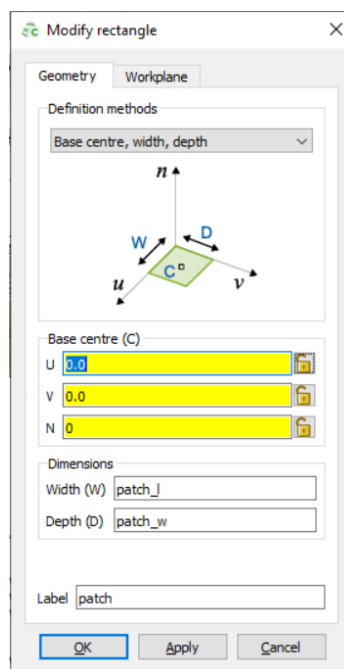
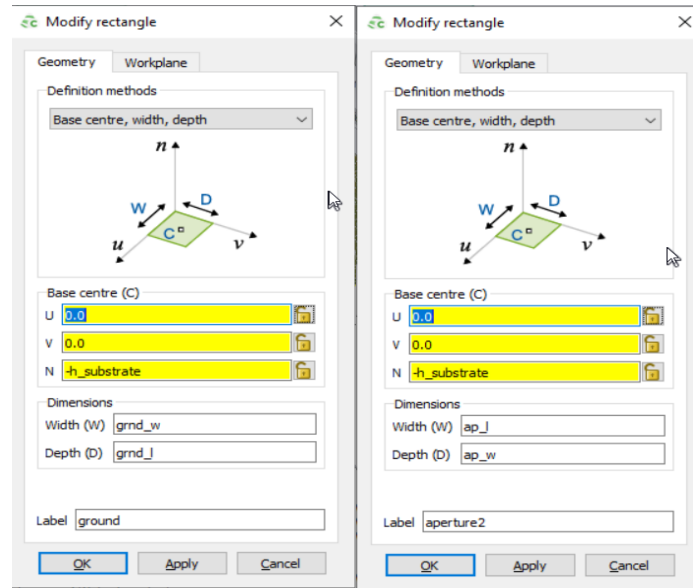


Figura 10. Geometría del parche

El siguiente paso ha sido crear el plano de tierra situado entre los dos sustratos y que presenta una apertura rectangular en su centro, ya que en esta configuración inicial se busca una polarización lineal. Para ello, se han creado el plano de tierra y la apertura a través de dos formas geométricas de tipo rectángulo, se pueden ver las características del plano de tierra en la Figura 11(a) y las características de la apertura mostradas en la Figura 11(b).



(a)

(b)

Figura 11. Rectángulo que forma el plano de tierra (a) y la apertura (b).

En la Figura 11 podemos ver las variables que forman el plano de tierra, explicadas anteriormente y las variables que forman la apertura, donde ap_l es la longitud de la apertura, con un valor de $0.14 \cdot \lambda$, 0.94 mm, y ap_w es el ancho de la apertura con un valor de $0.015 \cdot \lambda$, es decir, tiene un valor de 8.80 mm. Para calcular ambas aperturas, el valor de λ es de 62.85 mm, calculado según (8).

Para que el plano tenga la apertura, se ha seleccionado el plano de tierra y a través de la herramienta “*subtract from*” se ha creado la apertura restando el área del segundo rectángulo del área del primero. Tras este paso, se han unido todos los elementos hasta ahora mencionados para unir de esta manera los elementos de la antena.

Para completar la alimentación de la antena, se ha creado una línea de alimentación en el substrato inferior con las características mostradas en la Figura 12 y se ha unido a la estructura anteriormente mencionada:

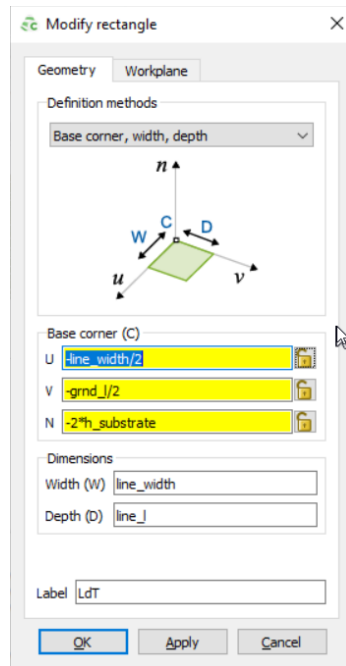
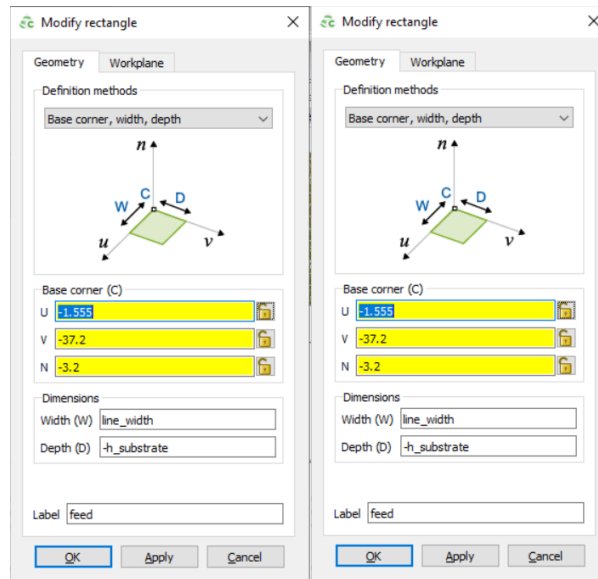


Figura 12. Geometría de la línea de transmisión

En la Figura 12, se muestran dos nuevas variables, *line_width* que se corresponde al ancho de la línea de transmisión y *line_l*, la longitud de la línea. Para calcular sus valores hemos utilizado la calculadora de líneas de transmisión que incluye el propio Feko, en la cual, introduciendo los datos de frecuencia, constante dieléctrica e impedancia, calcula ambos valores. En este caso, el ancho de la línea tendrá 1.6 mm, y el largo, 39.6 mm.

Por último, para que entre la señal hacia la línea de transmisión se ha creado un puerto, un “*Edge port*” a través de un rectángulo partido por la mitad para unir el *slot* con la línea de transmisión. Las características de estos dos rectángulos son las que aparecen en la Figura 13.

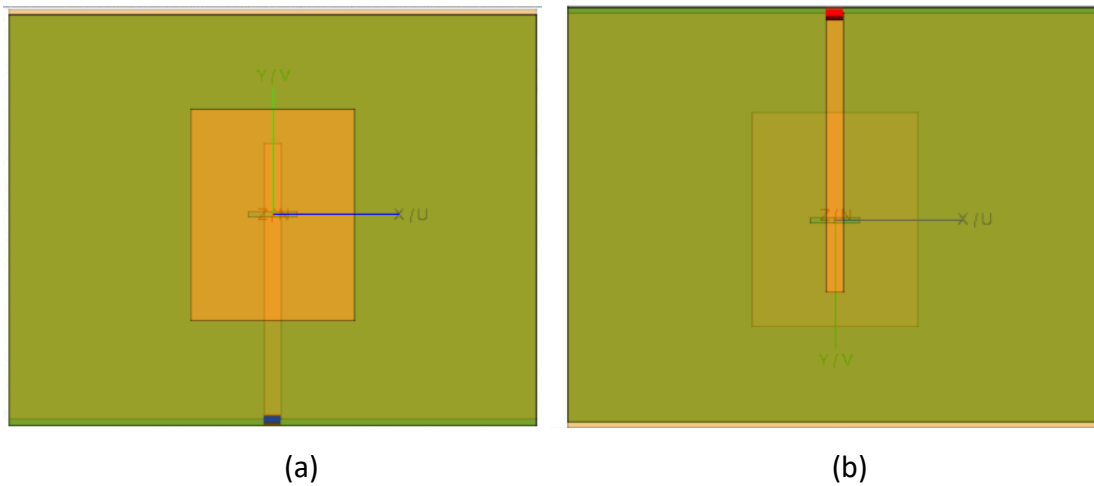


(a)

(b)

Figura 13. Rectángulo dividido en dos que forma el puerto (a) negativo y (b) positivo

Para una mejor radiación, se han definido todos los conductores como conductores eléctricos perfectos (PEC). Como alimentación se utiliza la de por defecto, 1 V y 50 Ohm. Con toda esta configuración realizada, se observa que la antena queda con el aspecto de la Figura 14.



(a)

(b)

Figura 14. Primer diseño de antena: (a) vista superior y (b) vista inferior.

Tras realizar la simulación del diagrama de radiación de la antena de parche a 2.4 GHz, vemos cómo no radia en una dirección específica en la Figura 15.

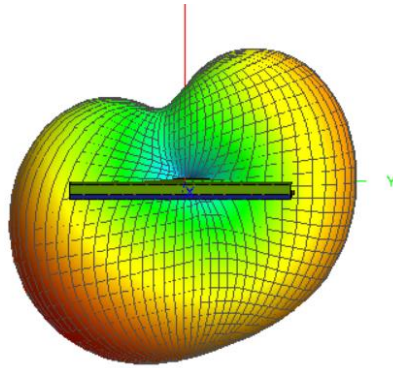


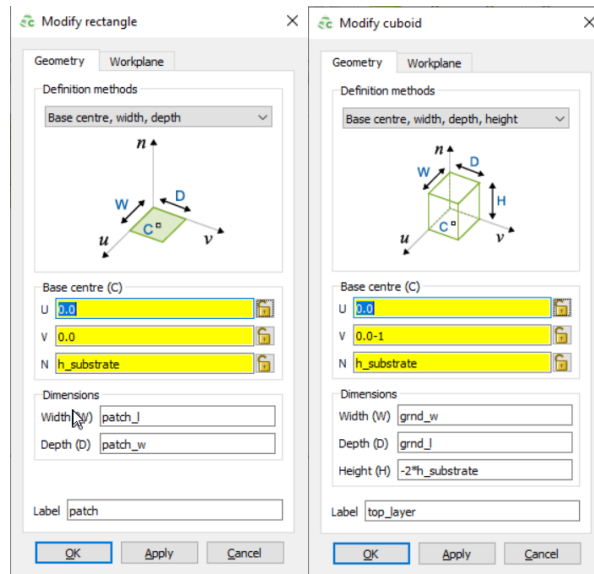
Figura 15. Diagrama de radiación 3D a 2.4 GHz del primer diseño de la antena de parche.

Como se puede apreciar, la antena que se ve en la Figura 15 radia principalmente hacia abajo, esto se debe a que la que está radiando es la línea de transmisión hacia abajo.

3.3.2. Estudio paramétrico de los dieléctricos

Una vez se obtiene este modelo inicial el siguiente paso será realizar modificaciones para que vaya mejorando su funcionamiento. Para el siguiente modelo, se utilizará una capa superior con menos permitividad, recalculando los tamaños del parche y poniendo el substrato inferior de la mitad de espesor que el superior para evitar que radie hacia abajo.

Para comenzar este segundo modelo, se empieza cambiando el espesor del substrato de radiación superior para que tenga el doble de tamaño que el inferior y de esta manera evitar que radie hacia abajo, para ello se modifica las características del parche y del substrato superior como se puede apreciar en la Figura 16.

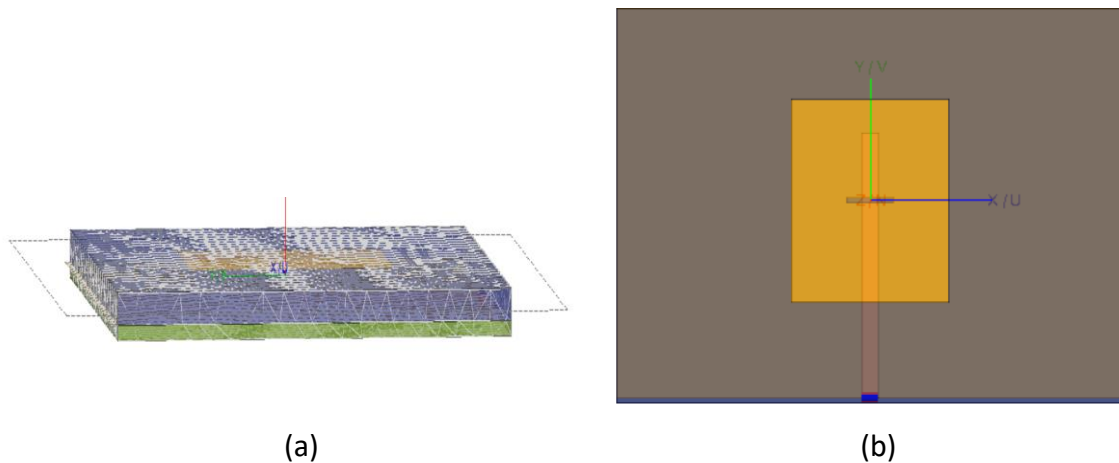


(a)

(b)

Figura 16. Substrato del segundo modelo: (a) substrato de arriba y (b) substrato de abajo.

En segundo lugar, se divide por regiones el modelo, asociando la región 2 al substrato inferior y la región 1 al substrato superior; a esta región 1 le otorgamos un ϵ_r de 1.0 y a la inferior se le sigue dejando una permitividad relativa de 4.3. Con toda esta configuración realizada, se aprecia que la antena queda con el aspecto mostrado en la Figura 17.



(a)

(b)

Figura 17. Modelo de la segunda antena: (a) vista en perspectiva y (b) vista superior.

Tras realizar la simulación de la radiación, su diagrama se puede ver en la Figura 18.

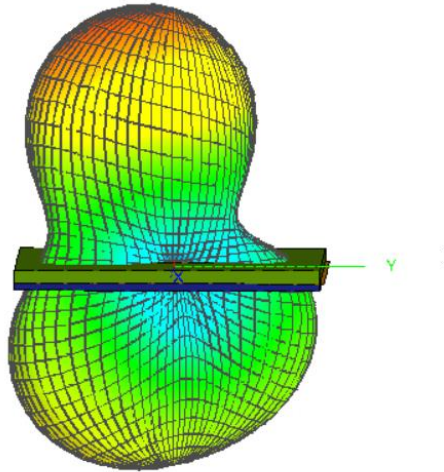


Figura 18. Diagrama de radiación 3D del segundo modelo de variación de ϵ_r

Como se puede ver en la Figura 18, la radiación ha disminuido hacia abajo, pero la antena sigue sin radiar completamente hacia arriba por lo que se busca otro modelo.

En segundo lugar, al tener dos substratos con un dieléctrico diferente cada uno, uno en la parte superior y otro en la parte inferior, se va a realizar un barrido paramétrico variando la permitividad de ambos substratos. A continuación se pueden ver las simulaciones realizadas dentro del barrido paramétrico:

- En esta simulación se otorga a la parte superior una permitividad con un ϵ_r de 2.0 y a la inferior se sigue dejando una permitividad con un ϵ_r de 4.3. El resultado de la simulación se muestra en el diagrama de la Figura 19.

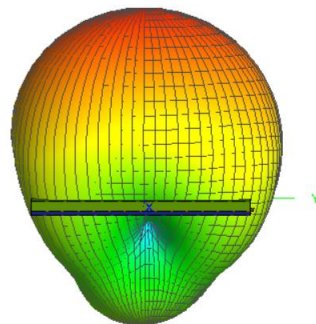


Figura 19. Diagrama de radiación 3D del tercer modelo de variación de ϵ_r

- En esta simulación se otorga a la parte superior una permitividad con un ϵ_r de 2.5 y a la inferior se sigue dejando una permitividad con un ϵ_r de 4.3. El resultado de esta simulación lo muestra la Figura 20.

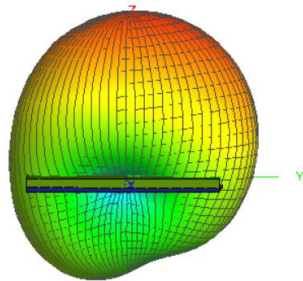


Figura 20. Diagrama de radiación 3D del cuarto modelo de variación de ϵ_r

- En esta simulación se otorga a la parte superior una permitividad con un ϵ_r de 4.3 y a la inferior se sigue dejando una permitividad con un ϵ_r de 1.0. El diagrama 3D de radiación como resultado de esta simulación se muestra en la Figura 21.

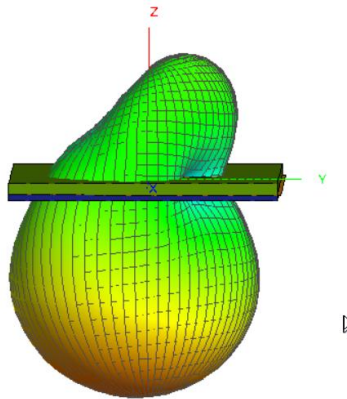


Figura 21. Radiación 3D del quinto modelo de variación de ϵ_r

- En esta simulación se otorga a la parte superior una permitividad con un ϵ_r de 1.0 y a la inferior se sigue dejando una permitividad con un ϵ_r de 4.3. El resultado de la simulación nos muestra el diagrama de la Figura 22.

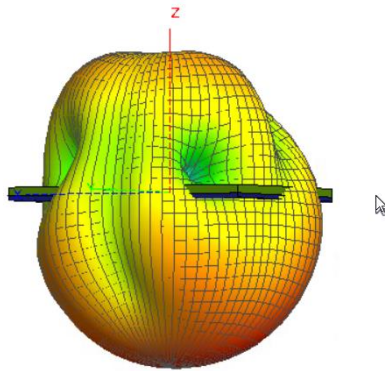


Figura 22. Radiación 3D del sexto modelo de variación de ϵ_r

Como se puede ver, la antena ahora radia hacia arriba, pero radia también más hacia abajo, por lo que, para continuar con la mejora de nuestro modelo, se continúa a partir del modelo 1 con un ϵ_r de 2.0 en el dieléctrico del sustrato superior mientras que en el sustrato del dieléctrico inferior contará con una permitividad con un ϵ_r de 4.3.

Como se ha visto anteriormente, con el barrido de parámetros se pueden acotar los valores de las diferentes variables que han sido utilizadas para realizar el diseño de la antena. Anteriormente, se ha realizado el barrido para la variable de la permitividad de ambos sustratos, en este momento, para mejorar los valores de la antena se realizarán barridos paramétricos de las variables utilizadas para la creación del diseño de la antena: la línea de transmisión (tanto el ancho como el largo), las dimensiones del parche (tanto el ancho como el largo) y las dimensiones de la apertura (tanto el ancho como el largo).

3.3.3. Optimización de la línea de transmisión

En primer lugar, se realiza el barrido paramétrico de los valores que forman la línea de transmisión, comenzando con una longitud de 40 mm y acabando con una longitud de 60 mm y comenzando con un ancho de 1 mm y finalizando con un ancho de 3 mm. Tras realizar el barrido paramétrico, se ha obtenido un diseño con una buena dirección de radiación y con una ganancia de esta aceptable, pero con un coeficiente de reflexión muy alto (en torno a -1.65 dB, cuando el objetivo es estar por debajo de -10 dB) como se

muestra en la Figura 25. por lo que es necesario seguir perfeccionando el diseño. A continuación, en las Figuras 23, 24 y 25 se muestran los resultados para este diseño más favorable obtenido tras el primer barrido paramétrico de las variables de la línea de transmisión, que se corresponde con los valores de 46.3 mm para el largo de la línea y 1.1 mm para el ancho.

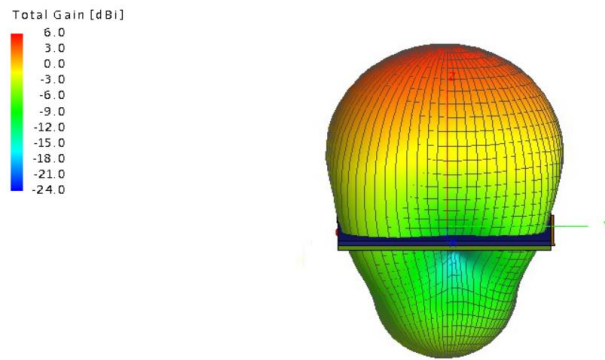


Figura 23. Diagrama de radiación 3D a 2.4 GHz para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la línea de alimentación.

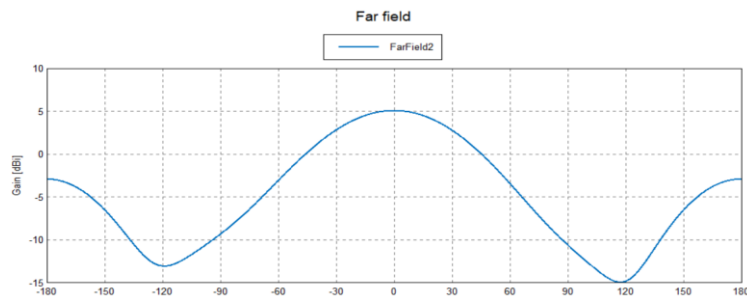


Figura 24. Corte en el plano XZ del diagrama de radiación en ganancia para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la línea de alimentación.

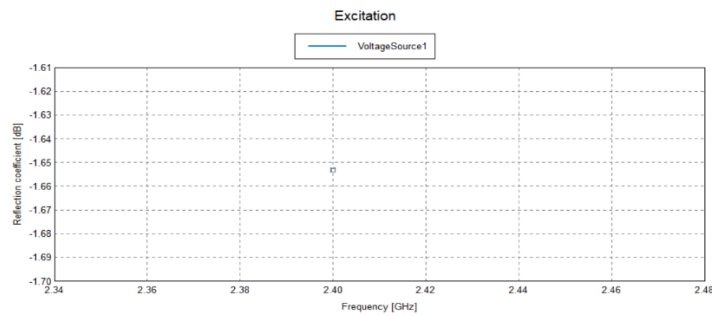


Figura 25. Coeficiente de reflexión para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la línea de alimentación.

3.3.4. Optimización del parche

Tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la línea de alimentación, partiendo del diseño que mejor resultado ha dado anteriormente, se realiza otro para acotar los valores de las variables que forman las dimensiones del parche, es decir, el ancho y el largo. Este barrido se realizará entre 40 mm y 50 mm para el ancho y entre 25 mm y 35 mm para el largo. A continuación, se pueden observar los mejores resultados para este barrido en las Figuras 26, 27 y 28, los cuales se han obtenido con 29.76 mm para el largo y con 39 mm para el ancho, donde se observa unos buenos resultados de radiación, tanto direccionales como de ganancia y unos mejores resultados para el coeficiente de reflexión, pero todavía insuficientes para el acoplo de la antenna.

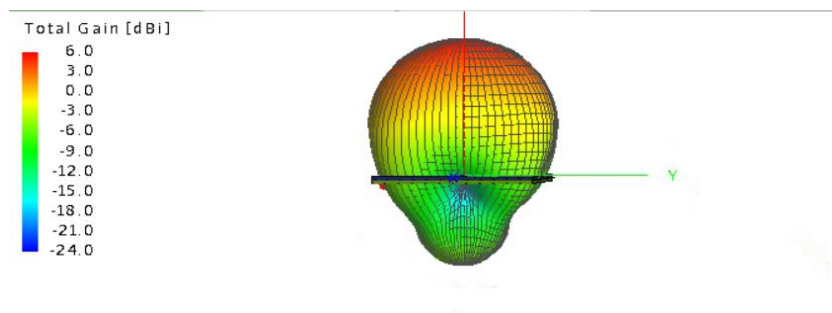


Figura 26. Diagrama de radiación 3D a 2.4 GHz para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones del parche.

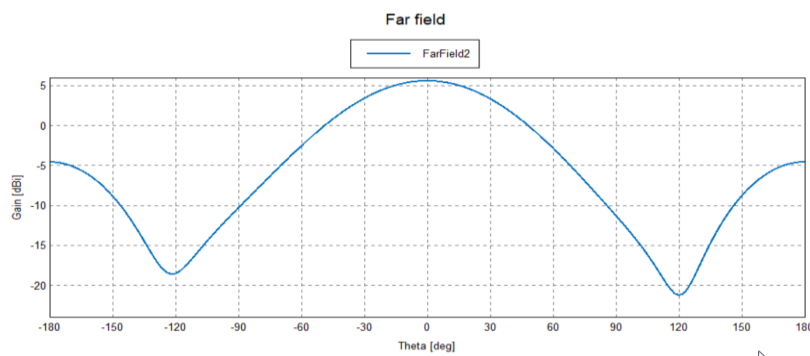


Figura 27. Corte en el plano XZ del diagrama de radiación en ganancia para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones del parche.

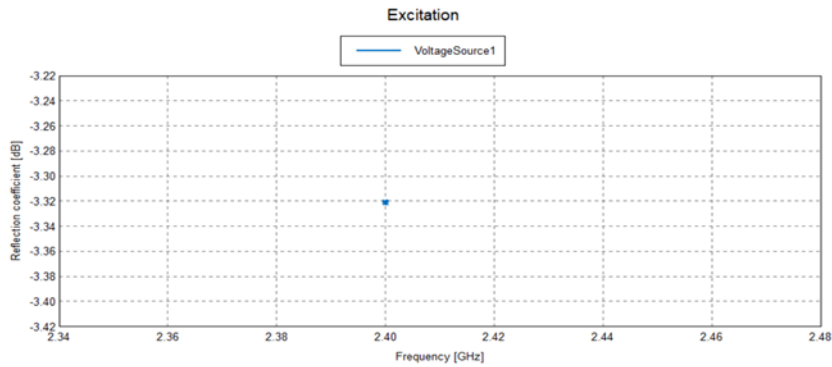


Figura 28. Coeficiente de reflexión para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones del parche.

Partiendo del diseño anterior, es decir, del diseño con los mejores resultados tanto para la línea de transmisión como para la dimensión del parche, se realizará un barrido paramétrico para la apertura metálica de la antena, este barrido se realizará para los valores entre $0.15*\lambda$ y $0.25*\lambda$ para el largo y $0.014*\lambda$ y $0.024*\lambda$ para el ancho, valores obtenidos anteriormente. A continuación, se puede observar las capturas de los diferentes resultados para el mejor diseño, con una apertura de $0.17*\lambda$ mm para el largo y $0.016*\lambda$ mm para el ancho, en estas capturas se puede observar una buena radiación tanto direccional como en ganancia y un buen coeficiente de reflexión, por lo que, con ello, se encuentra un diseño muy bueno para esta antena *microstrip* a la frecuencia de 2.4GHz. Los resultados de esta simulación se pueden observar en las Figuras 29, 30 y 31.

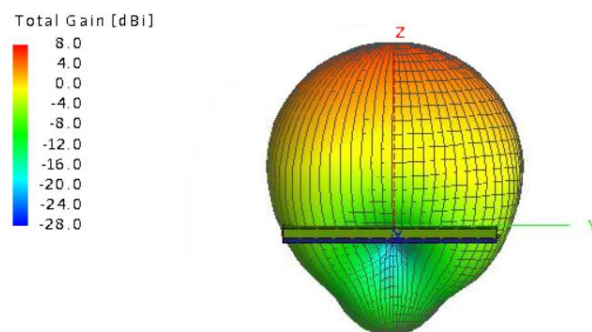


Figura 29. Diagrama de radiación 3D a 2.4 GHz para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la apertura.

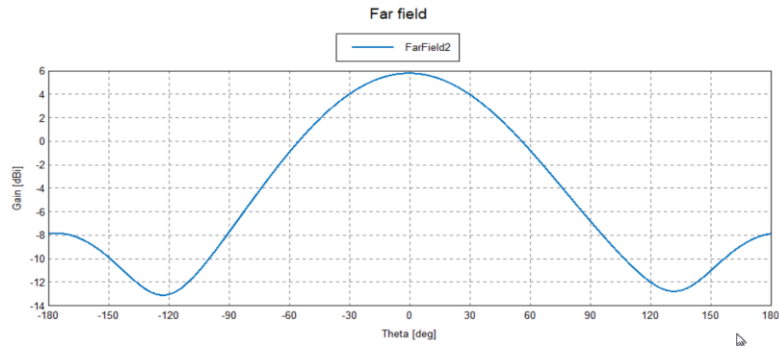


Figura 30. Corte en el plano XZ del diagrama de radiación en ganancia para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la apertura.

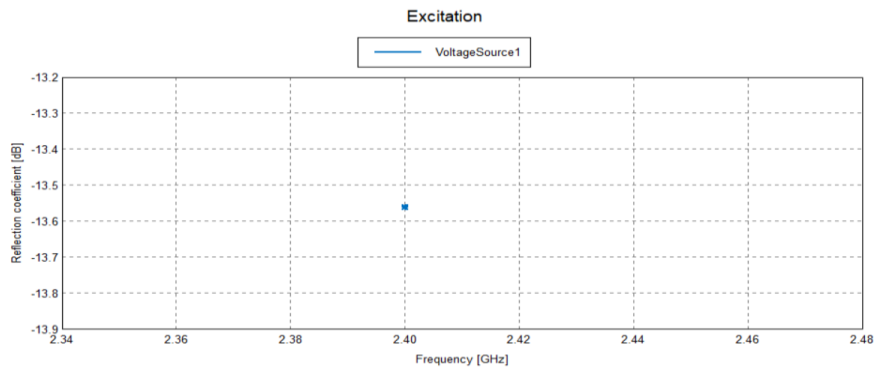


Figura 31. Coeficiente de reflexión para el diseño más favorable obtenido tras el barrido paramétrico de las dimensiones de la apertura.

Tras optimizar el diseño de la antena *microstrip* para 2.4 GHz, el siguiente paso debe ser que estos valores de ganancia y dirección de radiación y coeficiente de reflexión se obtenga en un rango de frecuencias mayor. Se pondrá como objetivo para este siguiente paso, que estos resultados se amplíen para un rango de valores entre 2.3 GHz y 2.5 GHz.

Tras realizar diversas simulaciones de la antena en un rango de frecuencia de 1 GHz, se observa que la radiación se mantiene en los valores mínimos requeridos, es decir, que tenga 5 dBi de ganancia, pero el requisito mínimo de -10 dB para el coeficiente de reflexión no se cumple, por lo que se debe mejorar este parámetro. Para ello, se han realizado diversos barridos de los parámetros de la antena en los que no se han obtenido buenos resultados, es decir, no se ha obtenido un buen coeficiente de reflexión continuado para un rango de frecuencias comprendido entre 2.3 GHz y 2.5 GHz. El mejor resultado obtenido es el que se encuentra mostrado en la Figura 32, en el que se consigue un buen coeficiente de reflexión para las bajas frecuencias de este rango, pero uno nada bueno para las altas.

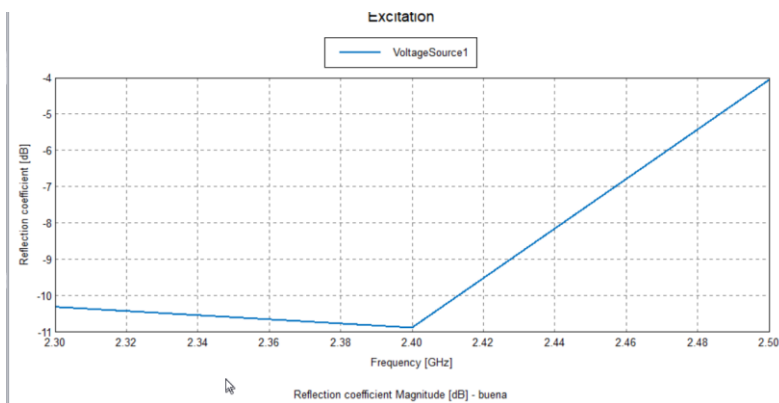


Figura 32. Coeficiente de reflexión del rango de frecuencias

	Ganancia Máxima	Coeficiente de reflexión
Er arriba= 2.0cm Er abajo=4.3cm Longitud LdT=45cm Ancho LdT=1.6cm Longitud parche=32.5cm Ancho parche=38.36cm Longitud apertura=12.67cm Ancho apertura= 1.5cm	6dB	-0,65dB
Er arriba= 2.0cm Er abajo=4.3cm Longitud LdT=46.3cm Ancho LdT=1.1cm Longitud parche=32.5cm Ancho parche=38.36cm Longitud apertura=12.67cm Ancho apertura= 1.5cm	6dB	-1.65dB
Er arriba= 2.0cm Er abajo=4.3cm Longitud LdT=46.3cm Ancho LdT=1.1cm Longitud parche=29.76cm Ancho parche=39cm Longitud apertura=12.67cm Ancho apertura= 1.5cm	6dB	-3.32dB
Er arriba= 2.0cm Er abajo=4.3cm Longitud LdT=46.3cm Ancho LdT=1.1cm Longitud parche=29.76cm Ancho parche=39cm Longitud apertura=10.68cm Ancho apertura= 1.05cm	8dB	-13.55dB

Tabla 1. Comparativa de barridos paramétricos del elemento radiante.

Como se puede ver en la Tabla 1, los valores de ganancia máxima son similares, exceptuando el último barrido paramétrico donde se obtienen 2 dB más de ganancia máxima. Esto se debe a que, a pesar de esta última mejora, la radiación era bastante buena desde las primeras simulaciones. En cuanto al coeficiente de reflexión, se puede observar una mejora sustancial en cada uno de los barridos paramétricos ya que la adaptación de

los diferentes valores de la antena se ha realizado en función de qué valor sería el que mejor coeficiente de reflexión otorgase, y, tras ver la Tabla 1, se puede decir que se han cumplido los objetivos que se buscaban ya que se ha obtenido un coeficiente de reflexión de 13 dB más bajo que el valor original.

Al no poder obtener los requisitos mínimos con este diseño de la antena, se ha investigado diversos métodos para mejorar el coeficiente de reflexión de la antena, entre los que se han encontrado, por ejemplo, variar la fuente de alimentación, es decir, en vez de tener una línea de transmisión, alimentar la antena por acoplo. Otro ejemplo para mejorar sería añadir una capa más con un parche de diferentes dimensiones.

Finalmente, tras estudiar varios ejemplos más, incluyendo los anteriores, se ha optado por variar la forma de la apertura en el plano de masa, ya que se considera una muy buena forma de obtener mejor coeficiente de reflexión a varias frecuencias y es una forma en la que se varía muy poco el diseño inicial, por lo que se ha considerado que es la mejor opción.

3.3.5. Optimización de la apertura

Tras decidir esta forma de mejorar el diseño de la antena, se estudian diferentes formas de apertura, entre las que se encuentran: alargar la apertura, ensanchar la apertura, dar forma de H a la apertura y dar forma de diábolo a la apertura. Tras estudiar las diferentes variables, se elige la forma de H ya que es una forma fácil de conseguir y obtiene unos incrementos muy buenos en cuanto al coeficiente de reflexión. En este estudio, se ha considerado que tanto alargar la apertura como ensancharla, no mejoraría lo suficiente el coeficiente de reflexión y que la forma de diábolo sí lo haría, pero es una forma muy compleja de conseguir en cuanto a proporciones y la mejora respecto a la apertura de forma de H no sería lo suficientemente buena como para tenerlo en cuenta.

Una vez se ha elegido esta forma de H para la apertura, se procede a estudiar cómo conseguir esta forma geométrica en el plano de masa, para ello, se han creado tres aperturas rectangulares en el plano de masa uniéndolas posteriormente, donde cada una de ellas será una de las partes de la H. Tras la creación del diseño de la apertura, se ha

investigado sobre las proporciones ideales entre las diferentes partes de la apertura. Tras investigar sobre esto, se ha encontrado que la proporción ideal para la apertura en forma de H es 4 mm más ancho los extremos que el centro de la apertura a través de diversos barridos de los parámetros, quedando un dibujo con las proporciones que se ven en la Figura 33.

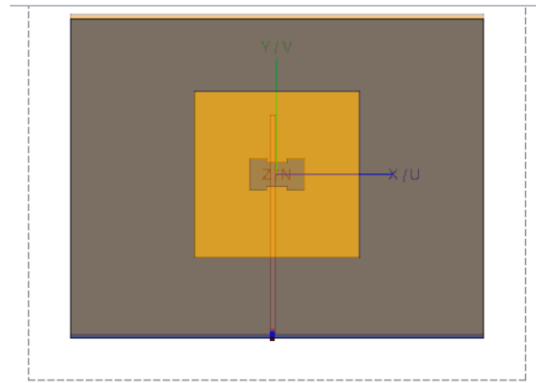


Figura 33. Diseño de la apertura en forma de H.

Una vez se encuentran las mejores proporciones para el diseño de la apertura, el siguiente objetivo será encontrar el mejor coeficiente de reflexión manteniendo la radiación inicial variando las dimensiones del parche. Para ello, se realizan diferentes barridos paramétricos tanto del ancho como el largo de las dos variables de la apertura, ap_w y ap_l , manteniendo siempre las proporciones originales.

Tras realizar diversos barridos paramétricos, se han obtenido los mejores resultados con un coeficiente de reflexión muy bueno a partir de las variables ap_l con un valor de 10.68 mm y ap_w con un valor de 1.005 mm. En las Figuras 34, 35, 36, 37 y 38 se pueden observar los resultados obtenidos a partir de los datos anteriormente mencionados. En la Figura 34 se puede observar el coeficiente de reflexión en cada una de las diferentes frecuencias comprendidas entre el rango de 2 GHz a 3GHz con 6 puntos en los que se mide la frecuencia. Como se observa en la Figura 34, el coeficiente de reflexión está por debajo de -10 dB en una banda que va de 2.3 a 2.5 GHz. En la Figura 35 se puede observar el diagrama de radiación de la antena a 2.4 GHz, en la Figura 36 a 2.2 GHz y en la Figura 37 a 2.6 GHz.

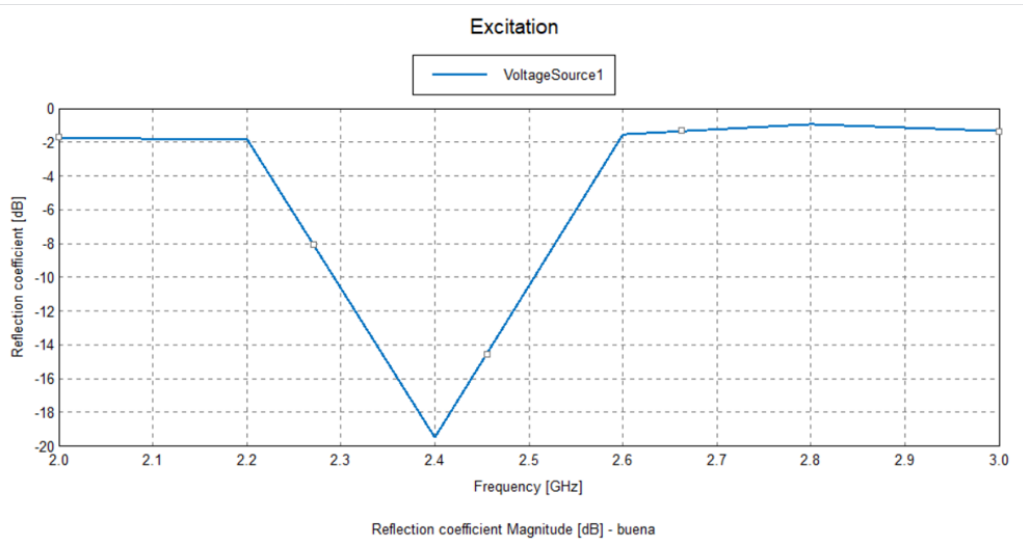


Figura 34. Coeficiente de reflexión con la apertura en forma de H.

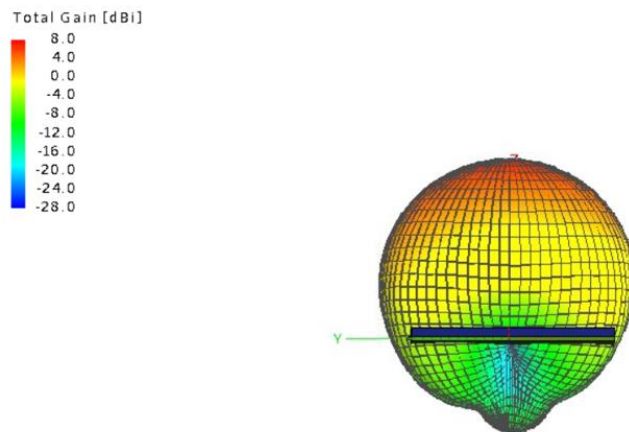


Figura 35. Diagrama 3D de radiación a 2.4 GHz con la apertura en forma de H.

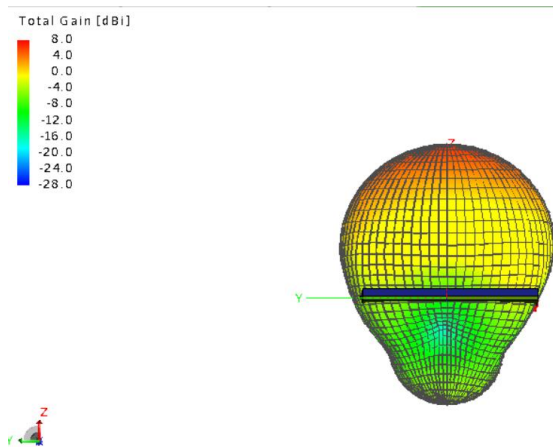


Figura 36. Diagrama 3D de radiación a 2.2 GHz con la apertura en forma de H.

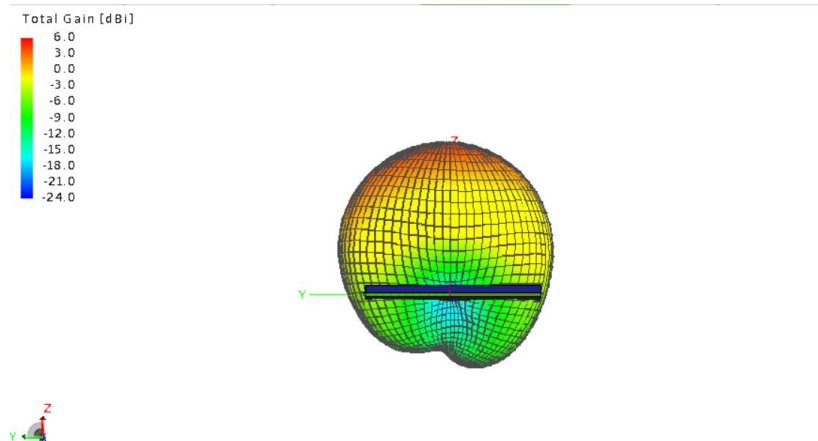


Figura 37. Diagrama 3D de radiación a 2.6 GHz con la apertura en forma de H.

Por otro lado, en la Figura 38, se muestra la ganancia de la antena en la dirección $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$, que es la dirección de máxima radiación (perpendicular a la superficie del parche), para ver la diferencia de la ganancia máxima en las diferentes frecuencias en las que se ha realizado la simulación.

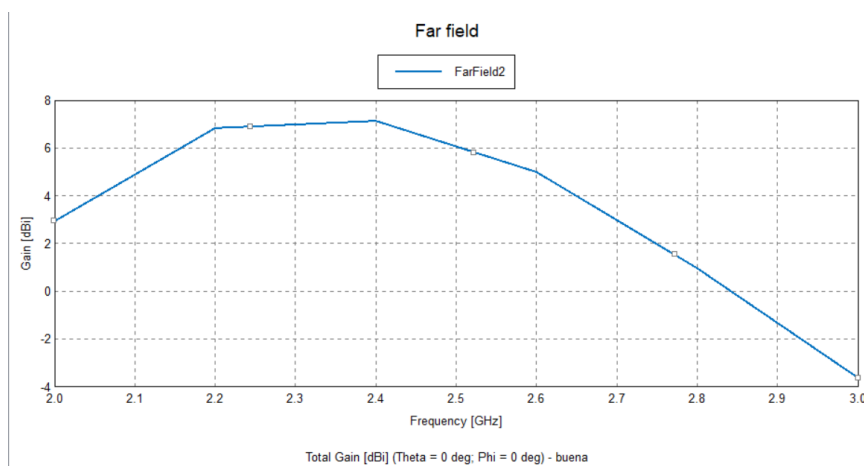


Figura 38. Ganancia máxima en todas las frecuencias analizadas.

Como se ha mencionado anteriormente, para que la ganancia de la antena se considere aceptable, se necesita que esta ganancia tenga un valor mayor o igual a 5dBi. De acuerdo con la Figura 38, la ganancia máxima en el rango de 2.3 a 2.5 GHz, en el que la antena está adaptada, varía entre 6 y 7 dBi aproximadamente, por lo que se cumple con los requisitos de diseño. También se puede ver que hay una diferencia total de 32 dB entre el punto máximo y el mínimo del diagrama de radiación, a través de las gráficas cartesianas de las Figuras 39 y 40, que muestran el corte en el plano $\phi = 0^\circ$ y el corte en el plano $\phi = 90^\circ$ del diagrama de radiación de la antena.

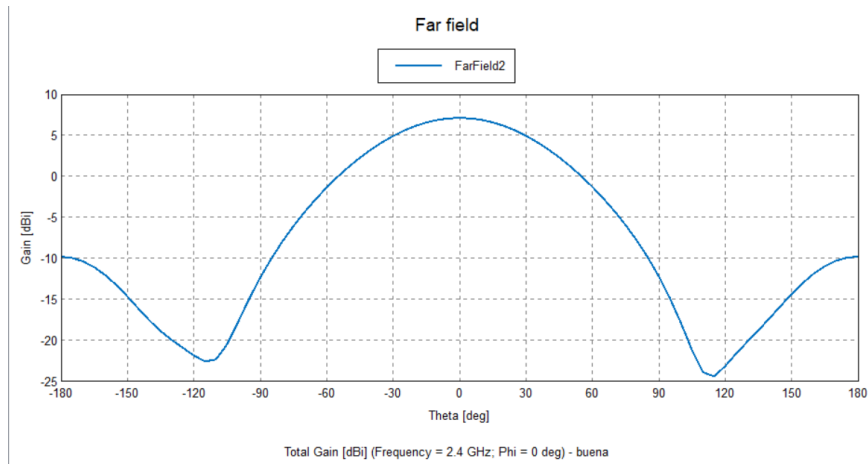


Figura 39. Corte en el plano $\varphi = 0^\circ$ del diagrama de radiación a 2.4GHz.

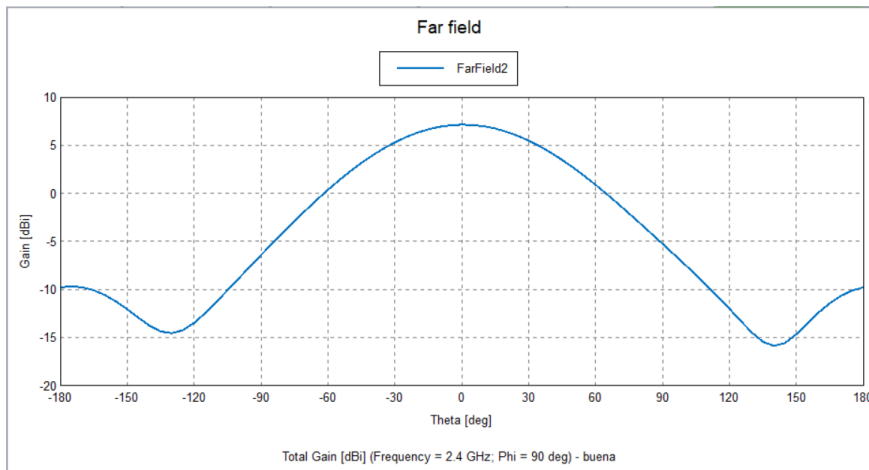
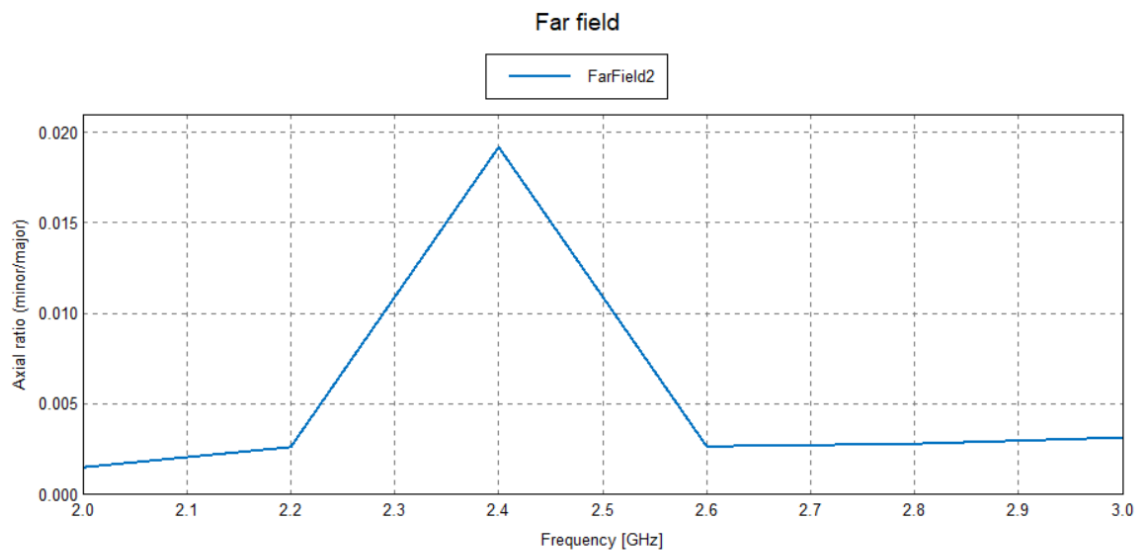


Figura 40. Corte en el plano $\varphi = 90^\circ$ del diagrama de radiación a 2.4GHz.

Como se puede observar en las anteriores figuras, se han obtenido muy buenos resultados en cuanto a coeficiente de reflexión, ya que aproximadamente hay un 8.33% de ancho de banda relativo en el que se ajusta a los valores requeridos, debido a que en el rango desde 2.3 GHz a 2.5 GHz, el valor del coeficiente de reflexión es inferior a -10 dB. En cuanto a los resultados de la radiación, se observa cómo en las frecuencias de 2.2 GHz y 2.6 GHz se distorsiona un poco, pero los resultados siguen siendo buenos ya que los valores de radiación hacia abajo son bajos y la ganancia sigue siendo superior a 5 dBi. Tras el estudio de estos resultados, se pueden catalogar de muy buenos a razón de que se encuentran por encima de los requisitos mínimos que se tenían con anterioridad a la realización del diseño de la antena.

Una vez obtenidos los resultados mínimos tanto de radiación como de coeficiente de reflexión en el rango de frecuencia requerido al comienzo del diseño, se comienza la última parte del diseño de la antena de parche para 5G, esta última fase es el análisis de la polarización lineal. Actualmente, la antena debería radiar en polarización lineal en la dirección del eje Y (dirección en la que se orienta la línea de alimentación del parche), es decir, su relación axial, el coeficiente entre las componentes x e y del campo eléctrico, debería ser muy próxima a 0 en unidades naturales (es decir, idealmente tendería a $-\infty$ si se trabaja en dB).

En primer lugar, se comprueba que efectivamente la antena radia un campo polarizado únicamente en una dirección. Tras simular nuestro último diseño, se observa en POSTFEKO, a través de la opción *axial ratio*, que efectivamente únicamente radia polarización lineal Y, como se puede observar en la Figura 41, donde se ve una relación axial muy cercana a 0 en unidades naturales, y en la Figura 42, donde la relación axial es inferior a -35 dB en unidades logarítmicas, para la dirección de máxima radiación de la antena ($\theta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$) en el rango de frecuencias de 2 a 3 GHz. Se puede apreciar la relación axial mencionada en las Figuras 41, 42 y 43.



Axial ratio (minor/major) (Theta = 0 deg; Phi = 0 deg) - buena
 Figura 41. Relación axial en unidades naturales.

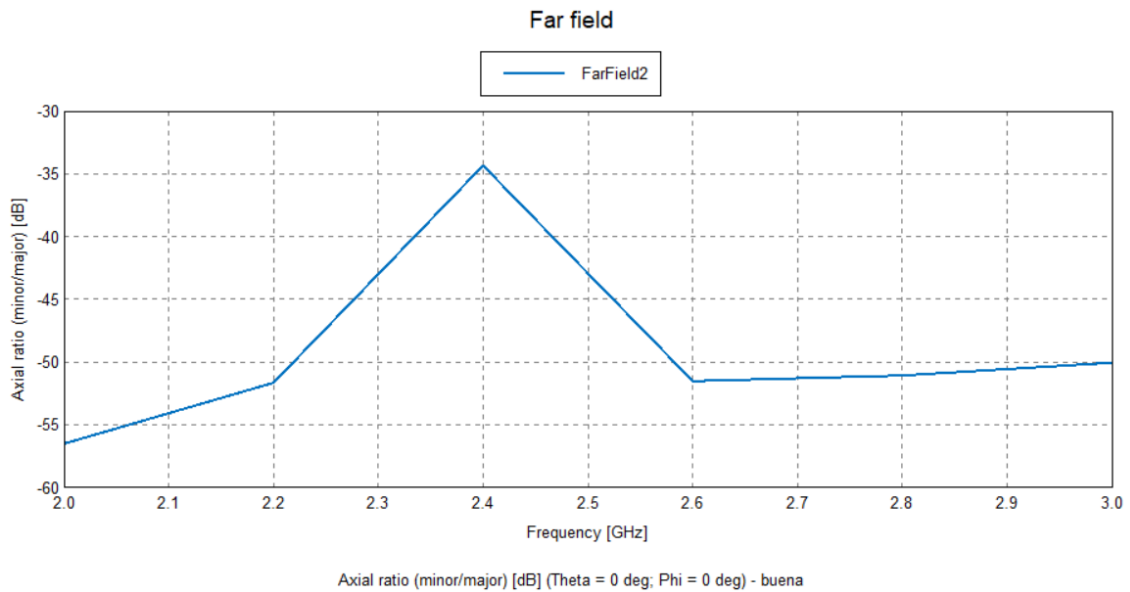


Figura 42. Relación axial en decibelios.

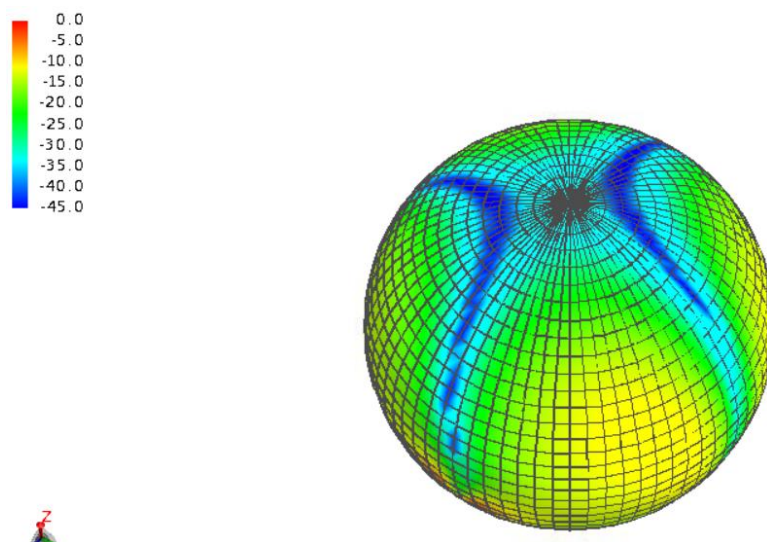


Figura 43. Representación 3D de la relación axial a 2.4 GHz.

3.4. Diseño de dos arrays de parches

En este apartado, una vez se ha optimizado el diseño del elemento radiante en el apartado anterior, se presentan dos diseños de *arrays* de parches. Para ello, se simularán 2 tipos de *arrays*, uno lineal y otro plano. Para que los valores sean representativos de un *array*, se creará un *array* 5x1 para que haya cinco elementos radiantes en línea, y un *array* plano 4x4 formado por dieciséis elementos radiantes. De esta manera, los *arrays* tendrán los suficientes elementos para que los resultados obtenidos de la agrupación de los elementos sean representativos.

3.4.1. Array lineal 5x1

El primer modelo que se ha preparado es un *array* 5x1 lineal, es decir, la unión de cinco elementos radiantes en la que el segundo elemento y los sucesivos se sitúan en el eje Y del diseño. Para ello, se ha calculado la distancia entre cada pareja de elementos fijándola como 0.7 veces la longitud de onda a 2.4 GHz, y se obtiene que los parches deben estar separados por 120 mm. La forma de la que se ha configurado este *array* se muestra en la Figura 44.



Figura 44. Array Lineal 5x1.

Una vez configurado el *array*, se procede a la simulación, en la que la representación 3D del diagrama de radiación en ganancia debe tener forma de abanico. En las Figuras 45(a), 45(b) y 46, se pueden ver las gráficas tanto de la representación 3D de la ganancia y el ancho del haz principal, como la representación de la ganancia máxima a lo largo de las frecuencias simuladas, entre el rango de 2 GHz a 3GHz.

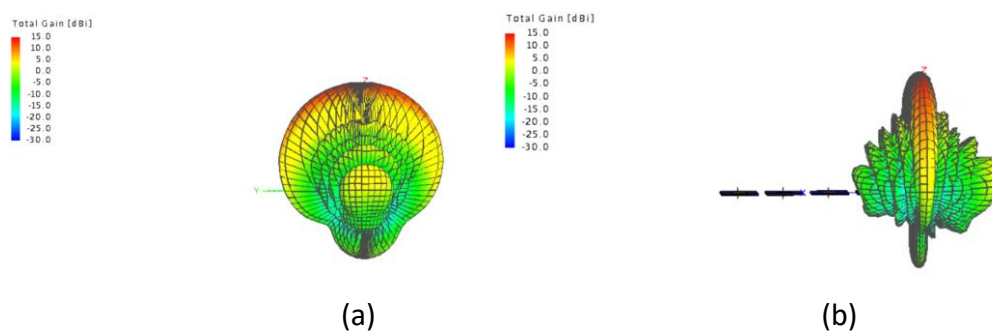


Figura 45. Diagrama de radiación 3D del Array Lineal 5x1: (a) vista frontal, (b) vista lateral.

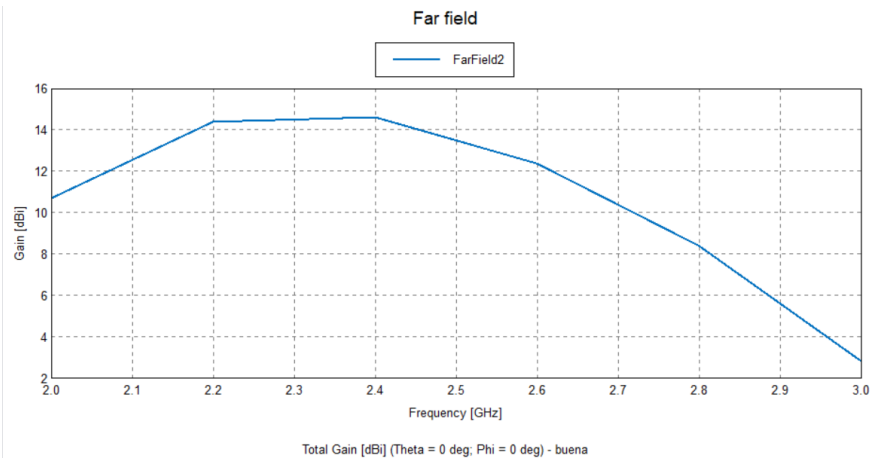


Figura 46. Ganancia máxima en las frecuencias simuladas.

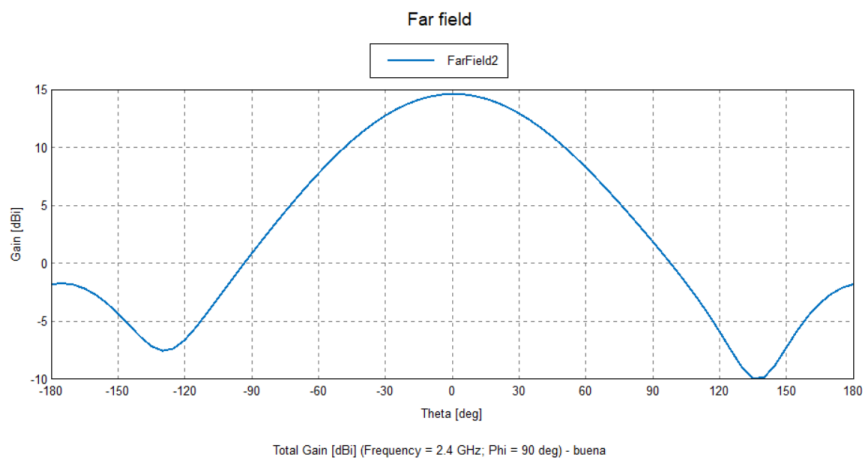


Figura 47. Corte en el plano $\phi = 90^\circ$ del diagrama de radiación a 2.4 GHz.

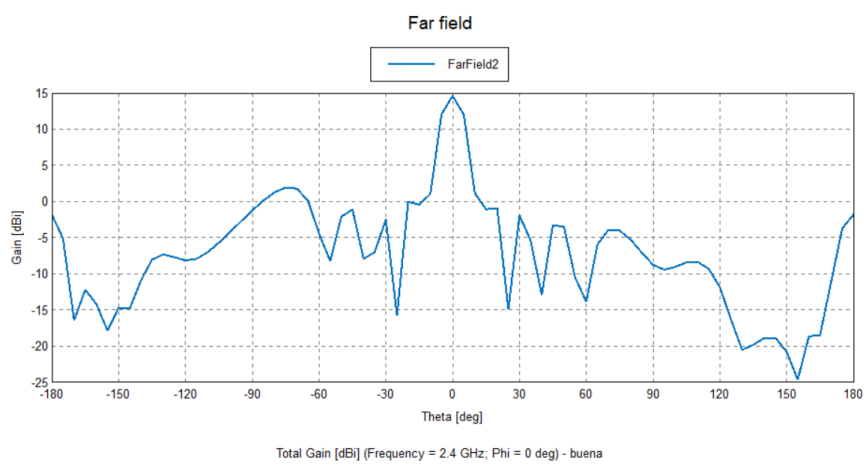


Figura 48. Corte en el plano $\phi = 0^\circ$ del diagrama de radiación a 2.4 GHz.

Como se puede observar en las Figuras 45(a) y 45(b), se observa que los resultados obtenidos son muy buenos, la radiación 3D del *array* tiene la forma de abanico que se

busca, mientras que como se ve en la Figura 46, la ganancia máxima ha aumentado en más del doble su valor en su punto más alto (superando los 14 dBi). Se puede ver cómo, en las Figuras 47 y 48, los diferentes cortes del diagrama, en un plano el haz principal es muy ancho, mientras que en el otro se mantiene estrecho, siendo éstos los datos esperados de una buena simulación de un *array* lineal.

3.4.2. Array 4x4

El segundo modelo que se ha realizado es un *array* plano 4x4, es decir, la unión de dieciséis elementos radiantes en el que los elementos radiantes se sitúan tanto en el eje Y como en el eje X del diseño. Para ello, como en el anterior *array*, se ha calculado la distancia entre cada pareja de parches consecutivos fijándola a 0.7 veces la longitud de onda, y se obtiene que deben estar separados por 120 mm. El diseño de este *array* plano que se ha configurado queda como se muestra en la Figura 49.

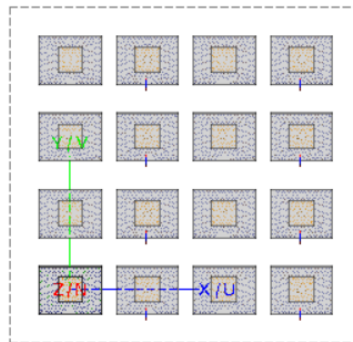


Figura 49. Array Lineal 4x4.

Una vez configurado el *array*, se procede a la simulación, en la que la representación 3D del diagrama de ganancia debe tener un lóbulo principal muy directivo, con un ancho bastante reducido en los dos planos principales en comparación al parche original. En las Figuras 50(a), 50(b) y 51, se pueden ver las gráficas tanto de la representación del diagrama de radiación 3D, donde se puede observar la ganancia y el ancho del haz principal, como la representación de la ganancia máxima a lo largo de las frecuencias simuladas, entre el rango 2GHz y 3GHz.

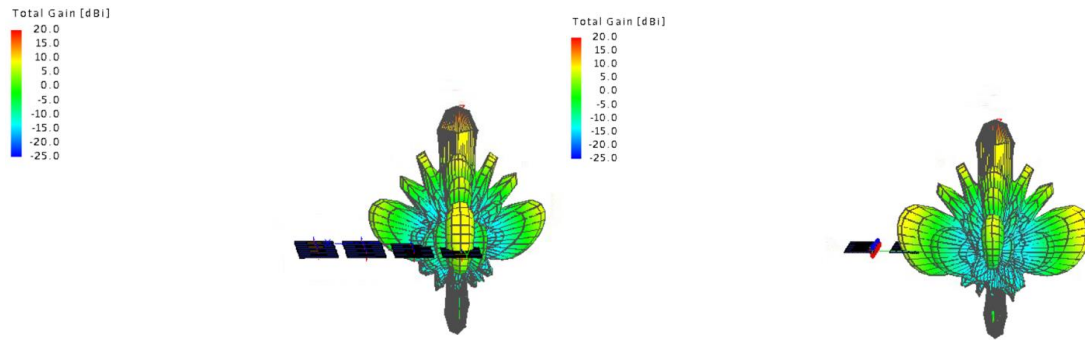


Figura 50. Diagrama de radiación 3D del array 4x4: (a) vista frontal, (b) vista lateral

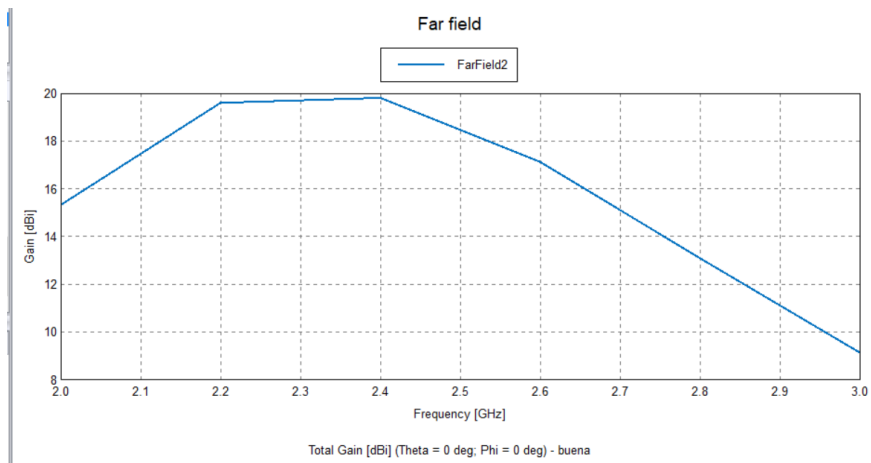


Figura 51. Ganancia máxima en las frecuencias simuladas.

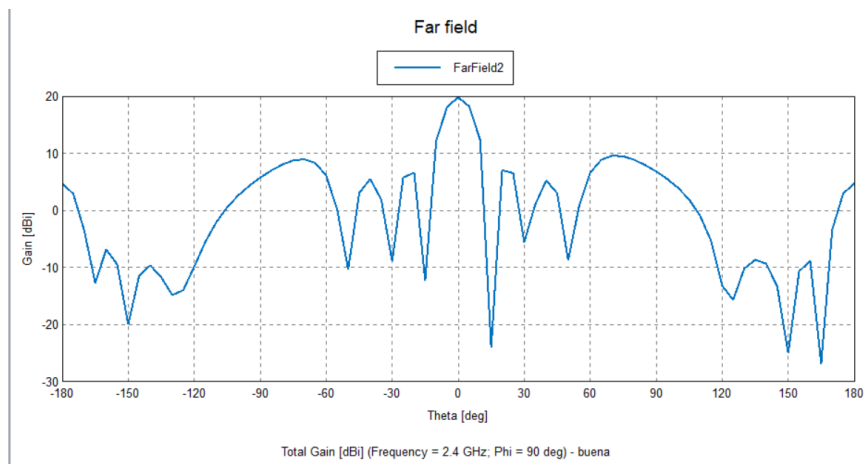


Figura 52. Ancho del haz con corte ϕ 90°.

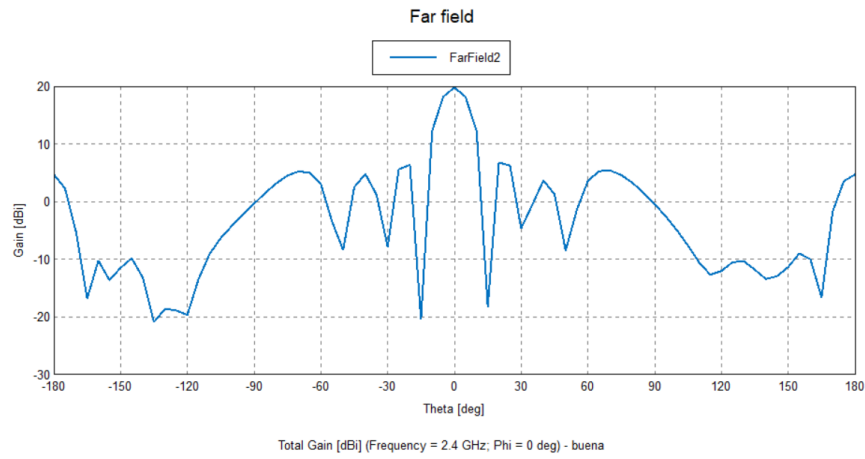


Figura 53. Ancho del haz con corte $\varphi 0^\circ$.

Como se puede observar en las Figuras 52 y 53, se observa cómo los resultados obtenidos son muy buenos, la radiación 3D del *array* tiene la forma de haz principal estrecho que se buscaba, mientras que la ganancia máxima ha aumentado en más del doble su valor en su punto más alto, de 8dB ha pasado a 20 dB.

	Ganancia máxima	Ancho -3dB Phi=0°	Ancho -3dB Phi=90°
Sin Array	7dB	70°	80°
Array 5x1	15dB	13°	75°
Array 4x4	20dB	15°	12°

Tabla 2. Comparativa de resultados finales.

Como se puede apreciar en la Tabla 2, la ganancia máxima ha incrementado en más del doble respecto a un único elemento radiante, un resultado que es normal, debido a que se han realizado dos *arrays* que poseen en su estructura un mayor número de elementos radiantes y, por lo tanto, la ganancia máxima de la antena mejora considerablemente.

En cuanto al ancho a -3 dB del haz principal, se puede apreciar como en el parche individual, es decir, sin *array*, el ancho del haz es grande en ambos cortes. En el ancho a -3 dB del haz principal en el *array* 5x1, se puede observar como en el corte de $\varphi = 0^\circ$ es pequeño mientras que en el corte $\varphi = 90^\circ$ el haz es ancho. Por otro lado, vemos como en el *array* 4x4, el haz es estrecho en ambos cortes.

4. Conclusiones y líneas futuras

4.1. Conclusiones

El trascurso del diseño de la antena de parche desarrollada en este proyecto ha sido llevado a cabo a través de diversas fases que se expondrán a continuación, además de exponer la conclusión que se ha obtenido a partir del desarrollo y los resultados obtenidos al final del diseño.

En primer lugar, se diseñó un elemento radiante formado por dos substratos, un parche simple de forma rectangular, una apertura de forma rectangular y una línea de transmisión para centrar la banda de trabajo situada en 2.4 GHz. Seguidamente, se continuó con numerosos barridos paramétricos para obtener los mejores valores geométricos de las diferentes partes que forman la antena de parche. Como siguiente paso, una vez se consiguieron buenos resultados para la frecuencia central, se modificó la forma del parche para que los buenos resultados obtenidos en la frecuencia central se dieran también en un rango de frecuencias mucho más grande, obteniéndolos, variando la forma del parche a uno en forma de H. A continuación, una vez se obtuvieron los resultados óptimos para el rango de frecuencia que se buscaba, se observó que los valores para la relación axial de la polarización lineal que se buscaba se obtenían correctamente por lo que no se tuvieron que realizar cambios adicionales. Por último, una vez se obtuvo la polarización requerida, se diseñaron dos *arrays* para mejorar la directividad de la radiación, la ganancia máxima, el acoplo y la polarización de la antena.

En cuanto a los resultados finales obtenidos, el diseño considerado como mejor, ya que posee los mejores resultados de las simulaciones, es el *array* plano 4x4, sus resultados se consideran valores aceptables y razonables comparándolos con a las prestaciones reales de este tipo de antenas. El diagrama de radiación 3D aguanta muy bien las variaciones de frecuencia tanto en forma, donde varía muy poco en el direccionamiento de la radiación como en ganancia, donde el valor más alto se encuentra en la frecuencia central con 20

dB. Por otro lado, el coeficiente de reflexión ha obtenido muy buenos valores en el rango de frecuencias de 2.28 GHz a 2.51 GHz bajando de los -10 dB en todo momento, es decir, prácticamente 0 en unidades naturales, y obteniendo -20 dB en la frecuencia central al igual que en las simulaciones del elemento radiante. En cuanto a la polarización, se ha obtenido una muy buena polarización lineal según el eje Y.

De esta manera, se puede concluir que las prestaciones que presenta el diseño final de la antena de parche son las óptimas para elementos de este calibre, después de haber obtenido unos muy buenos resultados para las necesidades que debe cubrir.

4.2. Líneas futuras

Tras haber obtenido estos resultados, el siguiente paso sería construir físicamente la antena, es decir, fabrica una antena con estas características, debido a que en el proceso de diseño de ésta, se ha tenido en cuenta las diferentes limitaciones de fabricación propias de esta tecnología de circuitos impresos. Por ello, la antena ha tenido un proceso de diseño para que, en un futuro proyecto o trabajo, a corto plazo pueda ser fabricable.

Para futuros proyectos, en los que se desarrollarán ideas basadas en las de este TFG, se podrá tener en cuenta lo siguiente:

- Estudio y diseño de parches con formas geométricas alineadas junto con slots rectangulares. Esto es debido a que de esta forma la relación axial vendría dada totalmente en función de la forma de los parches, dando así mayor grado de libertad en el diseño y mejorar las prestaciones del *array*.
- Diseño del *array* en el que se podría construir de un mayor número de elementos radiantes con ranuras dobles rotadas para conseguir mejor diagrama de radiación.
- Análisis y evaluación del acoplamiento del parche en el dieléctrico.
- Estudio y diseño de un sistema adaptativo de acoplamiento para poder usar este tipo de antenas en dispositivos de comunicación.
- Cambiar la geometría de la antena a formas circulares o triangulares para obtener un funcionamiento diferente.

- Buscar modificaciones del diseño para obtener antenas multibanda o para obtener radiación en diferentes polarizaciones, como dual lineal o polarización circular.
- Diseño y estudio de otro método de alimentación para que pueda proporcionar iguales o mejores prestaciones con un tamaño de antena más reducido.

Bibliografía

[1] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd Edition. Wiley 2005.

[2] Weebly, “TodoAntenas: historia”, Weebly todoantenas.weebly.com/historia.html (Consultado el 20 de diciembre de 2022)

[3] Fernando Barrio, “¿Quién inventó el teléfono? Desmintiendo a Graham Bell a 145 años de su "idea prestada”” (2001), *El Independiente*, <https://www.elindependiente.com/tendencias/historia/2021/03/13/quien-invento-el-telefono-desmintiendo-a-graham-bell-a-145-anos-de-su-idea-prestada/> (Consultado el 21 de diciembre de 2022)

[4] Hernández, “Antenas de tipo parche o *microstrip*”, Universidad Américas de Puebla, http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo3.pdf (Consultado el 21 de diciembre de 2022)

[5] Javier Rosado, “Diseño de un *array* de antenas de parche de banda ancha en UHF para sistemas de radar pasivos”, Universidad de Alcalá de Henares, <https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/30266/TFM-Rosado-Sanz-2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Consultado el 26 de diciembre de 2022)

[6] John Eduard Bustamante, “Simulación de una antena microcinta en FEKO”, YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=7PeqT-uxB-4> (Consultado el 4 de enero de 2023)

[7] Sudipta Chattopadhyay, *Trends in Research on Microstrip Antennas*, IntechOpen, 2017.

[8] Gonzalo Pedregosa, “Estudio y diseño del elemento radiante para un sistema de comunicaciones banda ka mediante tecnología MRGW”, Universidad Politécnica de Madrid,

https://oa.upm.es/47636/1/PFC_GONZALO_PEDREGOSA_ORDONEZ_2017.pdf

(Consultado el 7 de abril de 2023)

[9] Javier Martínez Manzano, “Análisis y diseño de un array de antenas en tecnología microstrip”, Universidad de Alicante, <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/101687>

(Consultado el 7 de abril de 2023)

[10] Universidad Rey Juan Carlos, “Agrupaciones de antenas. (arrays)”, Universidad Rey Juan Carlos,

<https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/Tema%206%20Arrays.pdf>

(Consultado el 24 de abril de 2023)

[11] Altair University, “Feko Example guide”, Altair, <https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2015/03/ExampleGuide.pdf> (Consultado el 15 de octubre de 2022)

[12] Webedia Brand Service, “El 5G transformará las telecomunicaciones tal y como las conocemos”, Xataka (2018), <https://www.xataka.com/tecnologiaz/en/el-5g-transformara-las-telecomunicaciones-tal-y-como-las-conocemos> (Consultado el 15 de abril de 2023)

[13] Claudia Valero, “Bandas de frecuencia en España: cuáles son y cómo se reparten”, ADSL Zone (2023), <https://www.adslzone.net/operadores/en-detalle/frecuencias-moviles-espana/> (Consultado el 15 de abril de 2023)

[14] Telefónica, “¿Qué es el 5G, para qué sirve y cómo funciona?”, Telefónica (2022), <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/que-es-el-5g-y-para-que-sirve-y-como-funciona/> (Consultado el 15 de abril de 2023)

ANEXO 1. FEKO

En este anexo, se explicarán los procedimientos que se han realizado en la herramienta FEKO para realizar el diseño de la antena.

En la Figura 54, se pueden ver las principales opciones del programa en el menú “Home”, en los recuadros se puede ver las dos opciones utilizadas en el programa. En primer lugar, en el primer recuadro, se encuentran las opciones “New” para crear desde cero originalmente el diseño, “Open model” para cada vez que se abre el proyecto y la opción “save” para guardar los avances del diseño. En segundo lugar, en el segundo recuadro, se puede observar la opción “Aplicación macro” que hemos utilizado para realizar los diferentes barridos de parámetros para ajustar lo mejor posible el diseño.

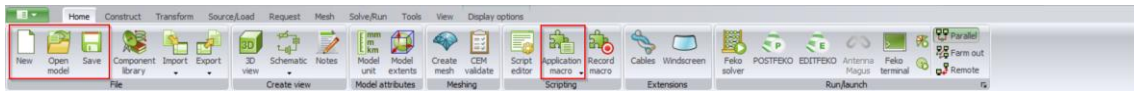


Figura 54. Menú Home de Feko.

En la Figura 55, se pueden ver las diferentes formas geométricas que se han utilizado para confeccionar el diseño además de las variables y unidad de medidas de éste.



Figura 55. Menú Construct de Feko.

En la Figura 56, se puede ver a continuación, se observan tres aplicaciones que se han utilizado para realizar el diseño de la antena, en primer lugar, “Frequency” donde se ha establecido la frecuencia a la que tiene que funcionar nuestro diseño, en segundo lugar “Edge Port” para confeccionar el puerto de la antena para establecer su alimentación y, en tercer lugar, “Voltage Source” para establecer el voltaje de entrada a la antena.

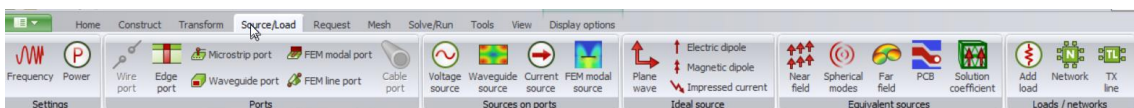


Figura 56. Menú Source/Load de Feko.

En la Figura 57, se puede observar la opción “Far Field” que se ha utilizado para representar la radiación de la antena en campo lejano tanto con un modelo 3D como con un gráfico cartesiano.

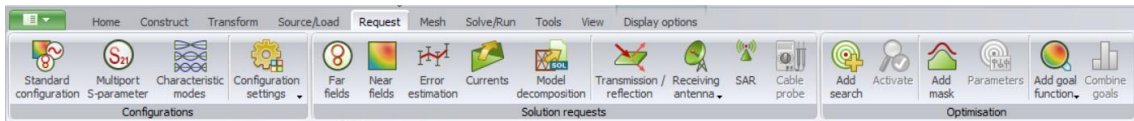


Figura 57. Menú Request de Feko.

En la Figura 58, se puede ver a continuación, se puede observar la opción “Create mesh” utilizada para crear la malla en cada uno de los modelos que se han creado a lo largo del diseño para realizar la compilación del diseño.

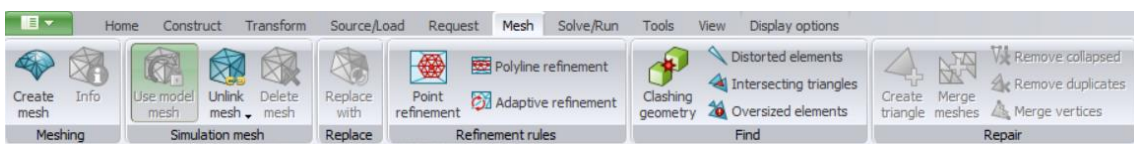


Figura 58. Menú Mesh en Feko.

En la Figura 59, se puede observar el menú “Solve/Run” en el que he utilizado, en primer lugar, la opción Feko Solver para compilar los diferentes diseños que se han ido realizando y, en segundo lugar, la opción POSTFEKO, para abrir el diseño compilado y con ello, poder observar los resultados obtenidos.

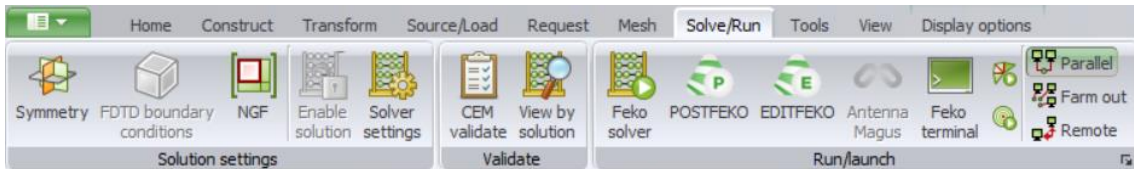


Figura 59. Menú Solve/Run de Feko.

En la Figura 60, se puede observar el menú “view” utilizado para combinar las diferentes vistas para observar el diseño, tanto diferentes zooms como rotación y movimiento del diseño.



Figura 60. Menú View de Feko.

En la Figura 61, se puede observar el menú lateral donde se muestran las variables que se han añadido a Feko para producir el diseño de la antena:

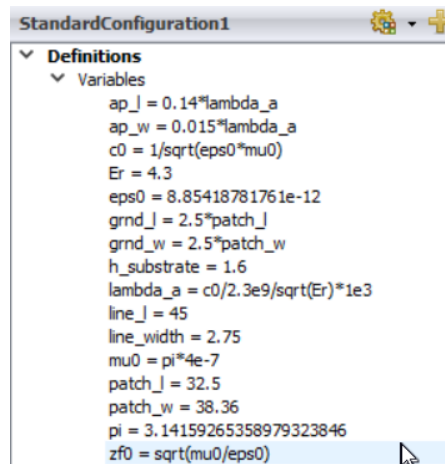


Figura 61. Variables de Feko.

A continuación, en la Figura 62, se puede ver en el menú lateral, diferentes submenús en los que se han añadido las características de conductividad, voltaje y frecuencia de nuestra antena.

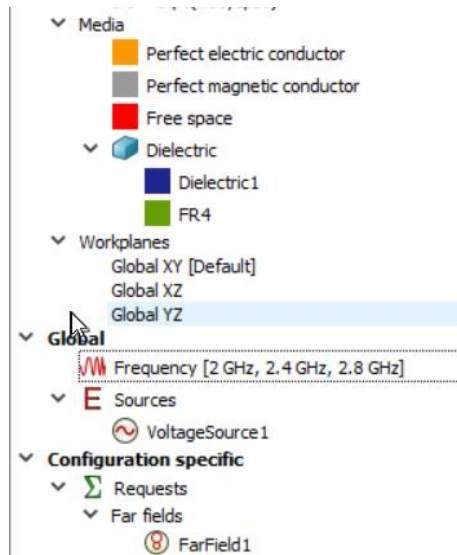


Figura 62. Características de diseño en Feko.

En último lugar, en la Figura 63, se pueden observar las diferentes formas geométricas en la construcción del diseño de la antena:

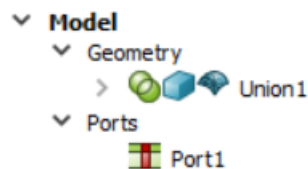


Figura 63. Geometría del diseño.