

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de
Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación



PROYECTO FIN DE GRADO

DISEÑO DE UN ARRAY DE ANTENAS DE
PARCHE CON DOBLE FRECUENCIA

TATIANA PAOLA DIAZ OCHOA

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación

Julio 2024

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: DISEÑO DE UN ARRAY DE ANTENAS DE PARCHE CON DOBLE FRECUENCIA

AUTOR/A: TATIANA PAOLA DIAZ OCHOA

TITULACIÓN: INGENIERÍA DE SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

TUTOR/A: VICENTE GONZÁLEZ POSADAS

DEPARTAMENTO: IAC (INGENIERÍA AUDIOVISUAL Y COMUNICACIONES)

VºBº TUTOR/A

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE/A: SANTIAGO HIGUERA DE FRUTOS

TUTOR/A: VICENTE GONZÁLEZ POSADAS

SECRETARIO/A: JOSÉ ENRIQUE GONZÁLEZ GARCÍA

Fecha de lectura: 18/07/24

Calificación:

El Secretario/La Secretaria,

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre Ester Ochoa por su amor y apoyo incondicional, gracias por estar siempre a mi lado.

También a todos mis familiares y amigos por animarme y apoyarme en este camino.

Por último, quiero dar las gracias a todos los profesores que tanto me han enseñado a lo largo de estos años, en especial a mi tutor Vicente González por la oportunidad de ofrecerme su ayuda para realizar este proyecto.

Resumen

A través del presente proyecto titulado “Diseño de un array de antenas de parche de doble frecuencia” se pretende contribuir en el campo de las telecomunicaciones con el estudio de un array 2x2 de antenas microstrip capaz de transmitir o recibir señal a dos frecuencias, 2.4 GHz y 5.8 GHz pertenecientes a la banda ISM, banda reservada para aplicaciones industriales, científicas y médicas. El objetivo es conseguir una antena directiva, óptima y eficiente con el mayor ancho de banda posible aprovechando las ventajas que ofrece la tecnología microstrip en cuanto a versatilidad, facilidad de fabricación y adaptación por su reducido tamaño, entre otras, la cual además pueda trabajar a dos frecuencias distintas.

A lo largo de este documento se presentan las antenas a grandes rasgos y se profundiza en las de tipo microstrip. Por otra parte, para obtener una mayor directividad se añade como solución la implementación de un array de antenas microstrip, se describen las diferencias entre el funcionamiento de una antena individual y la combinación final de un array de antenas 2x2.

Se realiza el diseño, análisis y optimización mediante el software de simulación electromagnética CST Studio Suite para posteriormente fabricar el prototipo del array. Con los medios disponibles en el laboratorio de la universidad se construyen las antenas y se realizan las medidas con un analizador de redes para comprobar su funcionamiento.

Abstract

This project entitled "Design of a dual frequency patch antenna array" aims to contribute to the field of telecommunications with the study of a 2x2 array of microstrip antennas capable of transmitting or receiving signals at two frequencies, 2.4 GHz and 5.8 GHz belonging to the ISM band, a band reserved for industrial, scientific, and medical applications. The objective is to achieve a directive, optimal, and efficient antenna with the widest possible bandwidth, taking advantage of the advantages offered by microstrip technology in terms of versatility, ease of manufacture, and adaptation due to its small size, among others, which can also work at two different frequencies.

Throughout this document, antennas are presented in broad outline, and microstrip antennas are discussed in more detail. On the other hand, to obtain greater directivity, the implementation of a microstrip antenna array is added as a solution. The differences between the operation of an individual antenna and the final combination of a 2x2 antenna array are described.

The design, analysis, and optimization are carried out using the electromagnetic simulation software CST Studio Suite to subsequently manufacture the array prototype. With the instruments, available in the university laboratory, the antennas are built, and measurements are taken with a network analyzer to check their operation.

Índice de figuras

Figura 1. Circuito equivalente de una antena	3
Figura 2. Esquema de antena en transmisión o recepción	3
Figura 3. Diagrama de radiación en coordenadas polares y en coordenadas cartesianas [1].	8
Figura 4. Diagrama de radiación isótropo, omnidireccional y directivo [1].	8
Figura 5. Red de 2 puertos	10
Figura 6. Matriz parámetros S	10
Figura 7. Ejemplo Array 66 antenas ALMA, Atacama	11
Figura 8. Ejemplo array 27 antenas El Very Large Array, Nuevo México	12
Figura 9. Alimentación serie, paralelo y serie-paralelo	14
Figura 10. Antena alimentada por línea microstrip	15
Figura 11. Distribución del campo	15
Figura 12. Alargamiento efectivo del parche	15
Figura 13. Tipo de geometrías de los parches	16
Figura 14. Alimentación por línea microstrip	19
Figura 15. Alimentación por coaxial	19
Figura 16. Alimentación por acoplamiento EM	20
Figura 17. Alimentación por apertura	20
Figura 18. Circuito transformador $\lambda/4$	22
Figura 19. Parche con inserciones	25
Figura 20. Ancho de la línea transmisión mediante CST	26
Figura 21. Cálculo del puerto en CST	27
Figura 22. Antena en CST vista frontal	27
Figura 23. Antena en CST vista lateral	27
Figura 24. Divisor de potencia Wilkinson	28
Figura 25. Ecuación cálculo ancho de la línea	28
Figura 26. Parche microstrip a 2.4 GHz	29
Figura 27. S11 a 2.4 GHz	30
Figura 28. Carta Smith 2.4 GHz	30
Figura 29. VSWR a 2.4 GHz	30
Figura 30. Plano E	31
Figura 31. Plano H	31
Figura 32. Patrón radiación 1D a 2.4 GHz	31
Figura 33. Patrón radiación 3D frontal	31
Figura 34. Patrón radiación 3D lateral	31
Figura 35. Parche microstrip a 5.8 GHz	32
Figura 36. S11 a 5.8GHz	32
Figura 37. Carta Smith 5.8GHz	33
Figura 38. VSWR a 5.8GHz	33
Figura 39. Plano E y H respectivamente	33
Figura 40. Patrón radiación 1D a 5.8GHz	34

Figura 41. Patrón radiación 3D vista frontal	34
Figura 42. Patrón radiación 3D vista lateral	34
Figura 43. Array 1x2 a 2.4GHz	35
Figura 44. S11 array a 2.4GHz	35
Figura 45. Carta de Smith array 2.4 GHz.....	36
Figura 46. VSWR array 2.4 GHz	36
Figura 47. Plano E y Plano H	36
Figura 48. Patrón radiación 1D array 2.4GHz.....	37
Figura 49. Patrón radiación 3D lateral	37
Figura 50. Patrón radiación 3D frontal.....	37
Figura 51. Array 1x2 a 5.8GHz	38
Figura 52. S11 array a 5.8 GHz	39
Figura 53. Carta de Smith array 5.8GHz.....	39
Figura 54. VSWR array 5.8GHz	39
Figura 55. Planos E y H	40
Figura 56. Patrón radiación 1D array 5.8GHz.....	40
Figura 57. Patrón radiación 3D vista frontal y lateral	40
Figura 58. Estructura array 2x2	41
Figura 59. S11 array 2x2.....	42
Figura 60. Carta Smith array 2x2.....	42
Figura 61. VSWR array 2x2	43
Figura 62. Plano E y H	43
Figura 63. Plano E y H	43
Figura 64. Patrón radiación 1D array 2x2	44
Figura 65. Patrón radiación 3D frontal y lateral array 2x2	45
Figura 66. Patrón radiación 3D frontal y lateral array 2x2	45
Figura 67. Diseño del prototipo vista frontal y trasera	46
Figura 68. Conexión antena y analizador de redes	47
Figura 69. Coeficiente de reflexión S11	47
Figura 70. Carta de Smith	48
Figura 71. Antenas enfrentadas en vertical	49
Figura 72. Antenas enfrentadas en horizontal	49
Figura 73. Antenas en horizontal colocadas en paralelo.....	49
Figura 74. Antenas en vertical colocadas en paralelo	50
Figura 75. Antenas opuestas	50

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación longitud de onda	3
Ecuación 2. Ecuaciones de Maxwell	5
Ecuación 3. Ancho de banda en %	7
Ecuación 4. Intensidad de radiación	8
Ecuación 5. Potencia total radiada	9
Ecuación 6. Directividad	9
Ecuación 7. Directividad máxima	9
Ecuación 8. Ganancia	9
Ecuación 9. Eficiencia	9
Ecuación 10, Impedancia	10
Ecuación 11. Factor de array	12
Ecuación 12. Campo total radiado	12
Ecuación 13. Impedancia $\lambda/4$	22
Ecuación 14. Ancho parche	24
Ecuación 15. Constante dieléctrica efectiva	24
Ecuación 16. Longitud ΔL	24
Ecuación 17. Longitud efectiva	24
Ecuación 18. Largo parche	25
Ecuación 19. Ecuaciones para obtener longitud y_0 del inset	25
Ecuación 20. Fórmula del ancho de la línea de alimentación	26
Ecuación 21. Impedancia $\lambda/4$	28
Ecuación 22 . Balance de enlace	48
Ecuación 23. Fórmula espacio libre	48
Ecuación 24. Ganancia de la antena	48
Ecuación 25. Ganancia en función de S_{21}	50

Índice de tablas

Tabla 1. Bandas de frecuencias del Espectro Radioeléctrico.....	4
Tabla 2. Símbolos de las bandas de Alta Frecuencia.....	4
Tabla 3. Ejemplos sustratos dieléctricos.....	16
Tabla 4. Especificaciones del Anteproyecto.....	21
Tabla 5. Medidas parche.....	26
Tabla 6. Medidas parche simple 2.4 GHz.....	29
Tabla 7. Medidas parche simple 5.8 GHz.....	32
Tabla 8. Medidas array 1x2 a 2.4 GHz.....	35
Tabla 9. Medidas array 1x2 a 5.8 GHz.....	38
Tabla 10. Medidas array 2x2.....	41

Lista de acrónimos

CST: *Computer Simulation Technology*

EM: Electromagnetic / Electromagnético

ISM: *Industrial Scientific and Medical* / Industrial, científico y médico

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones

RFID: *Radio Frequency Identification* / Identificación por radiofrecuencia

VSWR: *Voltage Standing Wave Ratio* / Relación de onda estacionaria de voltaje

PCB: *Printed Circuit Board* / placa de circuito impreso.

BW: *Bandwidth*/Ancho de banda

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

Índice de contenidos

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE ECUACIONES	V
ÍNDICE DE TABLAS	VI
LISTA DE ACRÓNIMOS	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 MARCO Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO	1
1.2 OBJETIVOS TÉCNICOS Y ACADÉMICOS	2
2. MARCO TECNOLÓGICO	3
2.1 BANDAS DE FRECUENCIAS	4
2.2 TIPOS DE ANTENAS	5
2.3 PARÁMETROS GENERALES DE LAS ANTENAS	6
2.3.1 Polarización	6
2.3.2 Diagrama de radiación	7
2.3.3 Intensidad de radiación	8
2.3.4 Directividad	9
2.3.5 Ganancia	9
2.3.6 Eficiencia	9
2.3.7 Impedancia	10
2.3.8 Otros parámetros	10
2.4 ARRAYS DE ANTENAS	11
2.4.1 Array de antenas de parche:	13
3. TECNOLOGÍA MICROSTRIP	15
3.1 TÉCNICAS DE ALIMENTACIÓN:	18
4. ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE DISEÑO	21
5. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA	24
6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	29
6.1 SIMULACIÓN PARCHES SIMPLES	29
6.1.1 Parche simple a 2.4 GHz	29
6.1.2 Parche simple a 5.8 GHz	32
6.2 DISEÑO DEL ARRAY 1x2	35
6.2.1 Array a 2.4 GHz	35
6.2.2 Array 1x2 a 5.8 GHz	38
6.3 DISEÑO ARRAY 2x2	41
7. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO Y MEDIDAS	46
8. IMPACTO DEL PROYECTO	51
9. CONCLUSIONES	53
10. TRABAJOS FUTUROS	54

11.	REFERENCIAS	55
	ANEXO	57
	ANEXO A. SCRIPT DE MATLAB	57
	ANEXO B. PRESUPUESTO	58

1. Introducción

1.1 Marco y motivación del proyecto

Debido a la gran importancia de las telecomunicaciones en la sociedad actual, resulta de gran interés seguir estudiando y desarrollando tecnología para facilitar la transmisión de la información de manera eficiente. Es esencial poder mejorar la conectividad, impulsar la innovación tecnológica y poder avanzar en el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas. Por eso se propone realizar el estudio y análisis de una antena que ofrezca versatilidad de diseño, tamaño y bajo costo pero que pueda ser adecuada para una amplia gama de aplicaciones como pueden ser las comunicaciones inalámbricas, los sistemas de navegación, radar, satélites, defensa, seguridad e incluso aplicaciones médicas.

En el presente trabajo se realiza una visión general de qué es una antena y sus principales parámetros, profundizando en las antenas de tipo microstrip mediante distintas configuraciones. Se realiza un análisis concreto para que la antena pueda funcionar a dos frecuencias, 2.4 GHz y 5.8 GHz utilizadas en la banda industrial, científica y médica (ISM). Se han seleccionado estas frecuencias para el estudio de este proyecto por ser utilizadas en diversas aplicaciones, desde Wifi, Bluetooth, sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID), dispositivos de comunicación inalámbrica o para equipos médicos.

La ganancia de una antena microstrip suele estar en torno a 7.5 dBi, para obtener una mayor directividad se añade como solución la implementación de un array de antenas microstrip para que opere en dos frecuencias ya que sería una solución eficiente para múltiples aplicaciones ya que proporciona flexibilidad y mejor rendimiento en un diseño compacto. Dado que al aumentar el número de elementos de un array implica una antena de mayor dimensión y por tanto mayor directividad, el array a diseñar será 2x2.

A través de la simulación realizada con el software CST Studio Suite se optimiza el diseño para poder construir el prototipo y así corroborar su funcionamiento.

1.2 Objetivos técnicos y académicos

El objetivo de este proyecto de fin de grado es el estudio de una antena capaz de emitir o recibir señal en dos frecuencias 2.4 GHz y 5.8 GHz dada unas especificaciones, a través de la tecnología microstrip que cuenta con grandes ventajas, debido a su bajo perfil especialmente para aplicaciones que requieran una antena discreta donde el espacio sea limitado, ya que este tipo de antenas se pueden integrar directamente en circuitos impresos. Agregando el hecho de que la antena sea de doble banda se consigue flexibilidad de diseño, bajo costo de fabricación e integración, al tener una sola estructura que opere en dos bandas se reduce también el espacio y se consigue mejorar la eficiencia espectral, lo que hace que este tipo de antena resulte de gran interés.

El objetivo desde un punto de vista técnico es poder comprender el funcionamiento general de las antenas particularizando en las antenas de tipo microstrip para conseguir un diseño versátil dadas unas especificaciones y parámetros se pretende realizar el diseño para que esté optimizado a las frecuencias dadas y validar el modelo simulado, mediante la construcción del prototipo.

Desde el punto de vista académico, el objetivo es poder sentar las bases de lo aprendido a lo largo de la carrera. Se pretende realizar un desarrollo que va desde el diseño simple de una sola antena hasta un diseño final más completo en la que se obtiene una agrupación de antenas.

Este trabajo se estructura en primer lugar, ofreciendo una visión a grandes rasgos acerca de las antenas, sus parámetros principales, los arrays y la tecnología microstrip. A continuación, se expondrán los pasos a seguir para la obtención de las dimensiones del sistema y mediante la simulación se optimizarán los valores calculados de cara a la construcción prototipo para finalmente realizar las medidas oportunas para la comprobación del funcionamiento del arreglo de antenas propuesto.

2. Marco tecnológico

Desde finales del siglo XIX la investigación y el desarrollo de las antenas microstrip ha sido crucial en la evolución de las comunicaciones. Gracias a los avances y desarrollos realizados por varios científicos a lo largo de los años, a través de sus ecuaciones teóricas James Clerk Maxwell sentó las bases de la propagación de las ondas en el espacio, los experimentos de Heinrich Hertz confirmaron la teoría de Maxwell entre emisor y receptor, posteriormente fue Guillermo Marconi quien realizó la primera transmisión de radio de la historia.

Una antena se define como una estructura diseñada para radiar y captar ondas electromagnéticas que adapta la entrada o salida del transmisor o receptor al medio. Una antena transmisora convierte corrientes eléctricas en ondas electromagnéticas, y una antena receptora realiza la función inversa [3,4].

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia y longitud de onda como se muestra en la siguiente ecuación, donde c es la velocidad de la luz.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Ecuación 1. Ecuación longitud de onda

El circuito equivalente a una antena se puede ver de manera simple como: una fuente representada por un generador ideal, una línea de transmisión representada por una impedancia característica y la antena compuesta por una impedancia Z_a formada por tres impedancias en serie: la impedancia de carga R_L que representa las pérdidas por el dieléctrico y el conductor, R_r denominada resistencia de radiación y la reactancia X_A que representa la parte imaginaria de la radiación [2] como se aprecia en la figura 1.

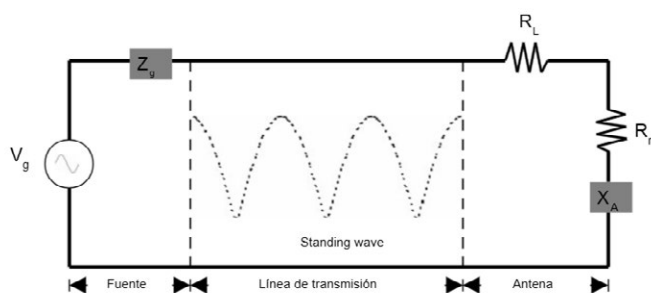


Figura 1. Circuito equivalente de una antena

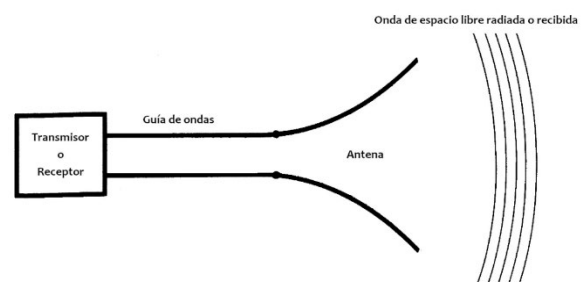


Figura 2. Esquema de antena en transmisión o recepción

2.1 Bandas de frecuencias

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) se encarga de la regulación, normalización y desarrollo de las telecomunicaciones a nivel mundial, están establecidas una serie de recomendaciones para poder garantizar la utilización racional, eficaz del espectro de frecuencia radioeléctricas [5].

En las siguientes tablas se muestran las bandas en las que está dividido el espectro de frecuencias:

Número de la banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión métrica correspondiente	Abreviaturas métricas para las bandas
3	ULF	300-3 000 Hz	Ondas hectokilométricas	B.hkm
4	VLF	3-30 kHz	Ondas miriamétricas	B.Mam
5	LF	30-300 kHz	Ondas kilométricas	B.km
6	MF	300-3 000 kHz	Ondas hectométricas	B.hm
7	HF	3-30 MHz	Ondas decamétricas	B.dam
8	VHF	30-300 MHz	Ondas métricas	B.m
9	UHF	300-3 000 MHz	Ondas decimétricas	B.dm
10	SHF	3-30 GHz	Ondas centimétricas	B.cm
11	EHF	30-300 GHz	Ondas milimétricas	B.mm
12		300-3 000 GHz	Ondas decimilimétricas	B.dmm
13		3-30 THz	Ondas centimilimétricas	B.cmm
14		30-300 THz	Ondas micrométricas	B.µm
15		300-3 000 THz	Ondas decimicrométricas	B.dµm

Tabla 1. Bandas de frecuencias del Espectro Radioeléctrico

Símbolo literal	Utilización en el campo del radar (GHz)		Radiocomunicaciones espaciales	
	Gama del espectro	Ejemplos	Designación nominal	Ejemplos (GHz)
L	1-2	1,215-1,4	Banda de 1,5 GHz	1,525-1,710
S	2-4	2,3-2,5 2,7-3,4	Banda de 2,5 GHz	2,5-2,690
C	4-8	5,25-5,85	Banda de 4/6 GHz	3,4-4,2 4,5-4,8 5,85-7,075
X	8-12	8,5-10,5	—	—
Ku	12-18	13,4-14,0 15,3-17,3	Banda de 11/14 GHz Banda de 12/14 GHz	10,7-13,25 14,0-14,5
K(1)	18-27	24,05-24,25	Banda de 20 GHz	17,7-20,2
Ka(1)	27-40	33,4-36,0	Banda de 30 GHz	27,5-30,0
V	—	—	Banda de 40 GHz	37,5-42,5 47,2-50,2

Tabla 2. Símbolos de las bandas de Alta Frecuencia

Las frecuencias seleccionadas para el desarrollo de este proyecto se encuentran en la denominada banda no licenciada, el ejemplo de uso más característico es la banda ISM de sus siglas en inglés *industrial, scientific and medical*, cuyo uso es con fin industrial, científico y experimental o para uso en aplicaciones médicas [10]. La frecuencia 2.4 GHz perteneciente a la banda S es utilizada en diversas aplicaciones como pueden ser las comunicaciones móviles, radiolocalización o redes Wifi.

En la banda C encontramos la frecuencia de 5.8 GHz la cual se utiliza en aplicaciones que requieren rápidas velocidades de transmisión. Su regulación o restricción varía dependiendo del país o la región, los usos más comunes son para punto de acceso a la red, señales locales de radio, redes WiMAX, Wifi, LAN y sistemas inalámbricos de audio y vídeo [7,11].

2.2 Tipos de antenas

En un dispositivo inalámbrico de comunicaciones la antena es uno de los componentes principales, tiene un papel fundamental para conseguir una transmisión eficiente de la información.

Las antenas se pueden clasificar de diferentes formas, por la banda de frecuencias de operación, su estructura física o su diseño eléctrico y electromagnético. Poseen unas características de radiación e impedancia que dependen de la frecuencia, el análisis de estas características se obtiene gracias a las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia que relacionan los campos eléctricos y magnéticos con las cargas y corrientes que los crean. Una corriente eléctrica variable con el tiempo produce una onda electromagnética en el espacio que la rodea [1].

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E} + \vec{J}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0$$

Ecuación 2. Ecuaciones de Maxwell

Algunos de los tipos de antenas más comunes atendiendo a su geometría son:

Antenas lineales o de hilo: Es el tipo más común, están constituidas por hilos conductores por los que circula la corriente que da origen a los campos radiados, caracterizadas por corrientes y cargas que varían con el tiempo, pueden estar formados por hilos rectos (dipolos, monopolos), hélices o espirales. A su vez según su modo de radiación se agrupan en antenas resonantes (dipolo $\lambda/2$) y antenas progresivas (hélice). Se pueden encontrar en aviones, edificios, barcos o en automóviles.

Antenas de apertura: Donde la onda radiada se consigue a partir de la distribución de campo soportado por la superficie de la antena. Los campos magnéticos y eléctricos de la apertura varían armónicamente con el tiempo, radian o reciben ondas planas dentro de aberturas finitas. Son utilizadas sobre todo en microondas y ondas milimétricas, las antenas de apertura más comunes son:

- **Reflectores:** Este tipo de antena a través de un reflector enfoca la energía electromagnética en una dirección específica. Se encuentran los reflectores esféricos, diédricos, sin embargo, el parabólico es el más habitual y sus características de radiación dependen de su geometría, es comúnmente utilizado en radar, televisión por satélite o radioastronomía.
- **Lentes:** Su funcionamiento se basa en la refracción electromagnética a través de materiales dieléctricos o metálicos para manipular las ondas, cuentan con una superficie frontal plana en la que los campos toman valores. Son útiles en comunicaciones inalámbricas, sistemas de navegación o radares.

- **Bocinas:** La estructura cónica o piramidal de este tipo de antena se basa en el principio de reflexión y guía de ondas electromagnéticas donde la energía de dichas ondas se concentra y es dirigida en la dirección deseada consiguiendo alta ganancia y directividad.

Antenas impresas: Incluyen ranuras o dipolos impresos y antenas de parche microstrip las cuales se estudian en este proyecto. Este tipo de antenas pueden disponer de alta ganancia, tanto los elementos radiantes como los circuitos de alimentación son fabricados sobre sustratos dieléctricos. Utilizadas en ondas milimétricas y microondas [6].

Agrupación de antenas: Técnica donde múltiples antenas se combinan para formar un único sistema y conseguir así determinadas características. Conocidas como arrays, dado que muchas aplicaciones requieren características de radiación que no se consiguen con un solo elemento, si se pueden obtener resultados de las características de radiación deseadas con un conjunto de elementos radiantes con una disposición eléctrica y geométrica. La disposición de este conjunto puede ser tal que la radiación de los elementos se sume para dar un máximo en una o determinadas direcciones según se desee. En esta agrupación de antenas iguales se controla su amplitud y fase de la alimentación de cada elemento para conseguir determinadas propiedades de radiación. Se verá con más detalle en el apartado 2.4 *Arrays de antenas* [1,12].

2.3 Parámetros generales de las antenas

Cada antena independientemente de su tipo o forma cuenta con unas propiedades que sirven para poder caracterizarla, y en base a ello se juzga su funcionamiento. Como consecuencia del teorema de reciprocidad obtenido a través de las ecuaciones de Maxwell, se establece la equivalencia de comportamiento de la antena tanto en la transmisión como en la recepción, siempre que la distribución de corriente y las condiciones de excitación sean las mismas [1].

2.3.1 Polarización

La polarización de una antena en una dirección dada es la polarización de los campos electromagnéticos evaluados en campo lejano, es decir, se trata de la forma geométrica descrita con el paso del tiempo en el extremo del vector del campo eléctrico en un punto fijo del espacio en el plano perpendicular a la dirección de propagación. La polarización generalmente es elíptica, se produce polarización circular cuando las amplitudes de las dos componentes son iguales y las fases difieren $\frac{\pi}{2}$ o $\frac{3\pi}{2}$. La polarización es lineal cuando las fases de las componentes ortogonales al campo eléctrico son iguales o se diferencian en un número entero de π .

Se denomina polarización copolar a la radiación de una antena con una polarización específica (deseada) y polarización contrapolar o cruzada a la radiación en la polarización ortogonal (no deseada).

2.3.2 Diagrama de radiación

Se trata de la representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en función de las coordenadas angulares espaciales a una distancia fija. Típicamente se representa el campo o potencia emitida o recibida y dicha representación puede ser en forma tridimensional o a través de cortes bidimensionales del diagrama el cual se puede representar el coordenadas polares o cartesianas.

Los parámetros más importantes que se pueden obtener de un diagrama de radiación son:

Lóbulo principal: Zona donde la radiación es máxima.

Lóbulos laterales: Zonas que rodean los máximos de menor amplitud rodean al lóbulo principal, el lóbulo lateral de mayor amplitud se denomina lóbulo secundario.

Ancho de haz a -3 dB: Separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación toma como valor la mitad de la potencia máxima radiada.

Ancho de haz entre ceros: Rango angular desde los dos nulos situados a los laterales del lóbulo principal.

Ancho de banda: Se trata del margen de frecuencias dentro del cual los parámetros definidos para la antena como impedancia, ganancia, polarización, distribución espacial...) se cumplen. En este margen la antena opera satisfactoriamente.

$$Bw (\%) = \frac{f_{superior(-10dB)} - f_{inferior(-10dB)}}{f_{Central}} \times 100$$

Ecuación 3. Ancho de banda en %

Relación de lóbulo principal a secundario (NLPS): Es el cociente, expresado en dB, entre los valores máximos del lóbulo principal y el lóbulo secundario. Normalmente, dicha relación se refiere al lóbulo secundario de mayor amplitud, que suele ser adyacente al lóbulo principal. Conviene que este valor sea alto para que la máxima cantidad de potencia sea radiada en la dirección deseada frente al resto de direcciones.

La relación delante-atrás (D/A): Es el cociente, también en dB, entre el valor del diagrama en la dirección del máximo y el valor en la dirección diametralmente opuesta. Si un diagrama de radiación presenta simetría de revolución en torno a un eje se dice que la antena es omnidireccional. Toda la información contenida en el diagrama tridimensional puede representarse en un único corte que contenga al eje.

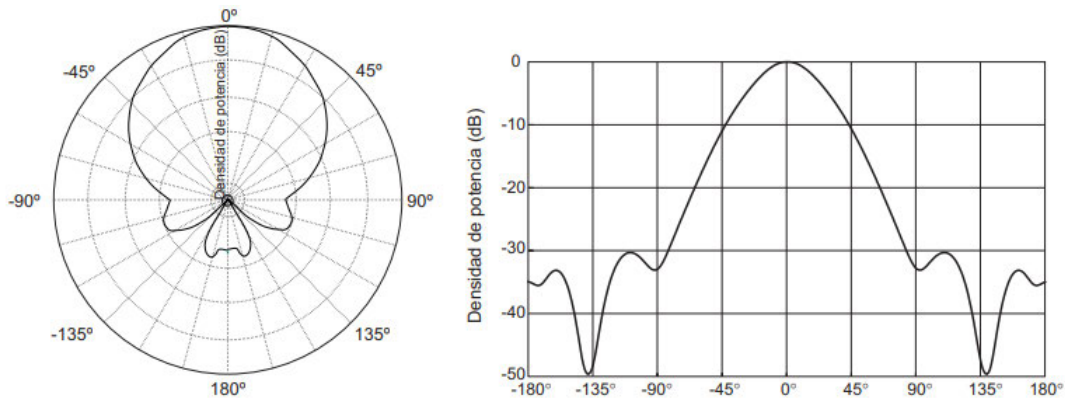


Figura 3. Diagrama de radiación en coordenadas polares y en coordenadas cartesianas [1].

Los principales patrones de radiación son:

- Omnidireccional: Cuando el patrón de radiación es equidistante y presenta simetría de revolución en torno a un eje.
- Isotrópico: Patrón teórico, se define la antena Isotrópica como aquella que radia por igual en todas las direcciones del espacio, se toma como referencia para el cálculo de directividad de una antena.
- Directiva: Este patrón de radiación muestra como la energía se concentra en un punto específico, en una única dirección.

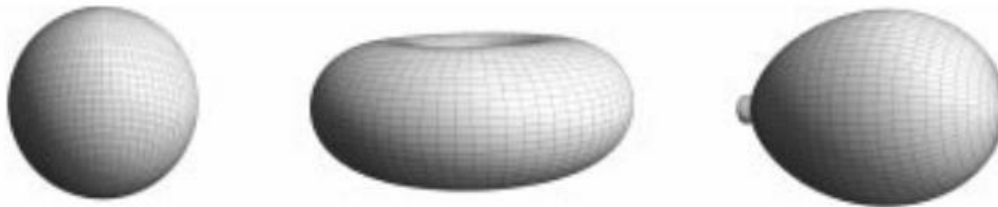


Figura 4. Diagrama de radiación isotrópico, omnidireccional y directivo [1].

2.3.3 Intensidad de radiación

Una de las propiedades fundamentales de una antena es su capacidad de concentrar la energía radiada en ciertas direcciones del espacio, la intensidad de radiación es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido¹ en una dirección y a grandes distancias tiene la propiedad de ser independiente de la distancia a la que se encuentre la antena.

$$U(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} RE[\bar{E} \times \bar{H}^*] r^2$$

Ecuación 4. Intensidad de radiación

¹ Ángulo sólido: Medida de ángulo bidimensional con la designación variable Ω . Su unidad de medida es el esterorradián.

La potencia total radiada se define como la integral de la densidad de potencia en una superficie esférica que encierre la antena [1]. Como aparece en la siguiente ecuación.

$$P_r = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} U(\theta, \varphi) \text{Sen}(\theta) d\varphi d\theta$$

Ecuación 5. Potencia total radiada

2.3.4 Directividad

La directividad de una antena es la relación entre la intensidad de potencia de radiación en una dirección determinada, a una distancia dada y la intensidad de potencia que radiaría una antena isótropa a esa misma distancia.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{isotrópica}} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_r}$$

Ecuación 6. Directividad

Si no se especifica la dirección angular se presupone que la directividad se refiere a la dirección de máxima radiación.

$$D = 4\pi \frac{U_{máx}}{P_r}$$

Ecuación 7. Directividad máxima

2.3.5 Ganancia

La ganancia de una antena está directamente relacionada con la directividad, pero la relación no se establece con la potencia radiada sino con la potencia entregada. Esto permite tener en cuenta las pérdidas que pueda tener la antena ya que no toda la potencia entregada es radiada al espacio. Si la antena no tiene pérdidas, algo habitual en altas frecuencias los dos parámetros son equivalentes.

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{entregada}}$$

Ecuación 8. Ganancia

2.3.6 Eficiencia

La eficiencia o rendimiento se define como la relación entre la potencia radiada y la potencia entregada por la antena. Con este factor se aprecian las pérdidas óhmicas de la antena y además se relacionan la ganancia y directividad.

$$\varepsilon = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{G}{D}$$

Ecuación 9. Eficiencia

2.3.7 Impedancia

La impedancia es un factor clave para el diseño de una antena, ya que permite saber cómo conectar la antena al transmisor o receptor. Para que haya una buena transferencia de potencia entre el transmisor pasando por las líneas de transmisión hasta los puntos de alimentación, esta debe estar perfectamente adaptada.

En el caso del transmisor se ve como una impedancia que hay que adaptar, en el caso de la antena receptora la impedancia de salida de la antena hay que adaptarla a la impedancia de entrada del receptor.

Este parámetro es la relación entre el voltaje y la corriente en los terminales de la antena, para obtener una determinada potencia radiada.

De forma general la impedancia es compleja, en la parte real se encuentra la resistencia y con una parte imaginaria denominada reactancia formada por elementos capacitivos e inductivos. Se puede considerar como la suma de la resistencia de radiación R_r , la resistencia óhmica $R\Omega$ y la reactancia jXa .

$$Ra = R_r + R\Omega$$

$$Zi = \frac{Vi}{Ii} = Ra + jXa$$

Ecuación 10, Impedancia

Si la parte reactiva es elevada hay que aplicar grandes tensiones para obtener corrientes apreciables, si la resistencia de radiación es baja se precisan altas corrientes para tener gran potencia radiada [1,3].

2.3.8 Otros parámetros

Parámetros S: Los parámetros de dispersión o parámetros Scattering hacen referencia a la relación entre los puertos de entrada y salida de un sistema. Para el diseño de antenas los parámetros S son cruciales para poder optimizar y obtener una correcta adaptación [13].

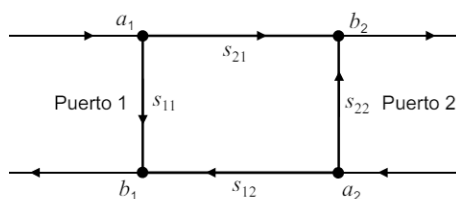


Figura 5. Red de 2 puertos

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$$

Figura 6. Matriz parámetros S

S11: Coeficiente de reflexión a la entrada cuando la salida está adaptada. Proporciona la relación entre onda reflejada y la onda incidente, indica la cantidad de energía proporcionada a la antena que está siendo reflejada. En la práctica para el análisis de la antena conviene que este valor sea $< -10\text{dB}$ cuando menor sea más energía estará siendo transmitida.

S12: Ganancia inversa de tensión o potencia cuando la entrada está adaptada.

S21: Mide la potencia en el puerto 2 en comparación con la enviada por el puerto 1. Se trata de la ganancia directa de tensión o potencia cuando la salida está adaptada.

S22: Coeficiente de reflexión a la salida cuando la entrada está adaptada.

VSWR: La relación de onda estacionaria de voltaje, de sus siglas en inglés *Voltage Standing Wave Ratio* proporciona la relación entre la tensión máxima y mínima en una línea de transmisión, está directamente relacionado con el coeficiente de reflexión. Cuanto más bajo sea el valor VSWR la adaptación será mejor ya que esto indicaría que no hay reflexión y que se transmite toda la potencia [1].

2.4 Arrays de antenas

Un array se define como la agrupación de un conjunto N antenas iguales que radian o reciben señal simultáneamente para incrementar las prestaciones de un sistema mejorando los parámetros característicos que con una sola antena no se pueden obtener. Son utilizados en multitud de aplicaciones ya que modificando la amplitud y la fase de las alimentaciones se obtienen diagramas de radiación con mejor directividad, ancho de haz o un nivel de lóbulos principal a secundarios específico.



Figura 7. Ejemplo Array 66 antenas ALMA, Atacama

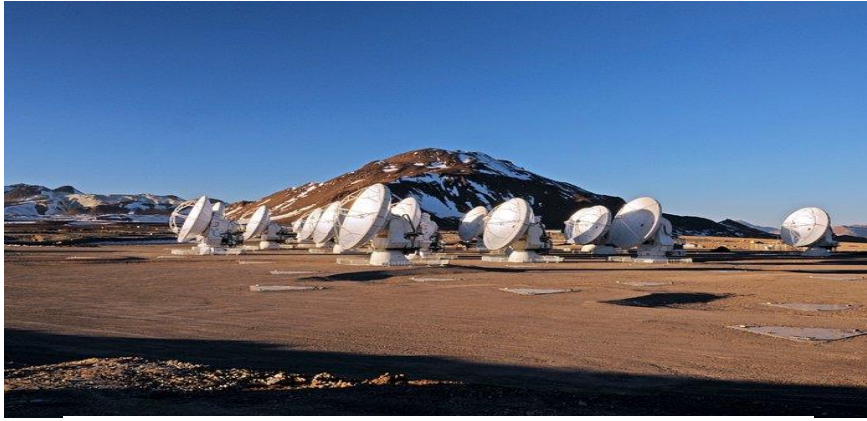


Figura 8. Ejemplo array 27 antenas El Very Large Array, Nuevo México

El diagrama de radiación del conjunto se consigue como la interferencia de los campos radiados por cada una de las antenas. Los elementos del array son alimentados con amplitudes y fases adecuadas para conseguir el diagrama de radiación deseado. Por reciprocidad los diagramas de radiación son iguales tanto en la recepción como en transmisión.

El campo total radiado se obtiene por el principio de la multiplicación de diagramas derivado de la linealidad de las ecuaciones de Maxwell que indica que el diagrama de campo de un array constituido por elementos iguales y orientados en la misma dirección es igual al producto del diagrama de la antena básica, $\overline{E}_0(\vec{r})$, multiplicado por un factor denominado

factor de array (FA) que tiene en cuenta la interferencia generada por las N antenas, este valor depende de la separación entre los elementos, la frecuencia de trabajo y la alimentación.

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

Ecuación 11. Factor de array

$$\overline{E}(r) = \overline{E}_0(\vec{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\Psi}$$

Ecuación 12. Campo total radiado

Con un array de antenas se consigue una mayor directividad, ya que se puede enfocar la radiación en una dirección específica, sin necesidad de mover físicamente los elementos radiantes con el ajuste de la amplitud y fase se puede dirigir el haz en distintas direcciones. Se pueden eliminar radiaciones no deseadas en ciertas direcciones reduciendo así la interferencia de las señales y pueden reconfigurar electrónicamente para conseguir determinadas condiciones y requisitos.

Para obtener un correcto funcionamiento y un diagrama directivo en una dirección determinada se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- La distancia entre elementos: Para evitar interferencia entre los campos radiados por los elementos, esta distancia debe ser adecuada.
- La amplitud y fase de excitación: Debe ser tal que la interferencia de los campos radiados por todas las antenas nos proporcione el diagrama deseado.
- El patrón de radiación de cada elemento: Representa gráficamente las propiedades de radiación del array.
- La configuración geométrica: La distribución entre los elementos es clave se puede realizar de manera:
 - Lineales: Los elementos se distribuyen en línea recta
 - Planares: Los elementos se sitúan sobre un plano. Siendo las más comunes la distribución circular, rectangular y triangular.
 - Conformados: Los elementos se sitúan en una superficie dada.

2.4.1 Array de antenas de parche:

Con el avance de las comunicaciones los sistemas de hoy en día requieren de mayor rendimiento para ello, se pueden combinar varias antenas, en este caso microstrip y así obtener mejores resultados en cuanto a directividad o ancho de banda. Las antenas microstrip suelen tener una directividad que varía en torno a 5-7 dBi, con un array de antenas microstrip se puede conseguir una mayor directividad.

Existen distintos métodos de alimentar un array los principales son:

- **Alimentación en serie:** Se trata de la red de alimentación más simple y compacta, los elementos se encuentran acoplados en una sola línea de alimentación y la energía se transmite a lo largo de la línea que los une. Las principales ventajas son que ocupa menos espacio, introduce menos pérdidas de inserción y proporcionan menor radiación espuria. Como desventajas en este tipo de alimentación se obtiene un ancho de banda más estrecho incluso más que el de una antena de parche simple y existe diferencia de fase debido a la diferencia entre la longitud de las líneas de alimentación y tiene dependencia del resto de los elementos contiguos.

- **Alimentación en paralelo:** Esta configuración de alimentación se compone de un divisor de potencia con líneas de transmisión conectadas a los elementos radiantes. Este diseño proporciona mayor ancho de banda, buen aislamiento entre líneas y la alimentación es independiente de las antenas con lo que no hay dependencia como sí ocurre en el caso anterior. Es la configuración más utilizada, sin embargo, el diseño es más complejo ya que requieren de más líneas de transmisión por lo que ocupa más espacio.

Cabe destacar que también es posible realizar la alimentación combinando los dos métodos mencionados. En este trabajo se utiliza la configuración en paralelo, para tratar de conseguir un arreglo de antenas con mayor directividad y ancho de banda. En la imagen 9 se puede apreciar la alimentación en serie, paralelo y serie-paralelo respectivamente [12].

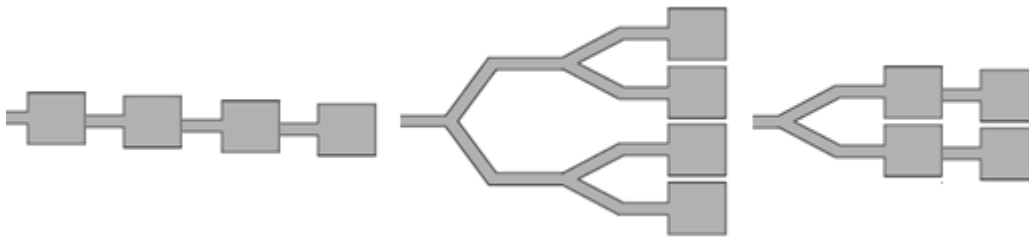


Figura 9. Alimentación serie, paralelo y serie-paralelo

3. Tecnología Microstrip

La tecnología microstrip es esencial para el diseño de sistemas de comunicaciones modernos, se utiliza especialmente para diseñar dispositivos de radiofrecuencia ya que proporciona un buen rendimiento y versatilidad en circuitos de alta frecuencia.

La aparición del concepto de antena microstrip se remonta a los años 50 [5]. Sin embargo, es en los años 70 donde reciben especial atención gracias al desarrollo de las placas de circuito impreso PCB (*printed circuit board*). El estudio del campo de las antenas microstrip vino motivado por la necesidad de realizar antenas cada vez más pequeñas y ligeras.

Una antena microstrip está constituida por una superficie conductora también llamada parche, impresa sobre un sustrato dieléctrico con un espesor pequeño en términos de longitudes de onda, en la parte posterior de dicho sustrato se sitúa una superficie metálica que actúa como plano de masa.

El hecho de poder utilizar una misma tecnología para fabricar líneas de transmisión y elementos radiantes se convierte en una solución atractiva [1].

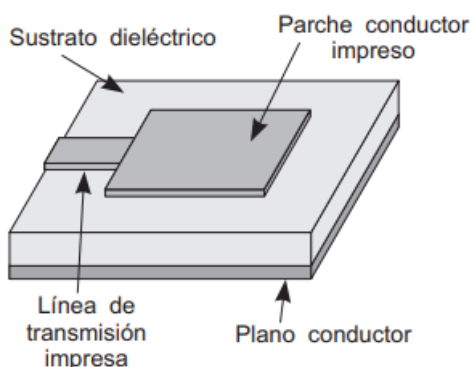


Figura 10. Antena alimentada por línea microstrip

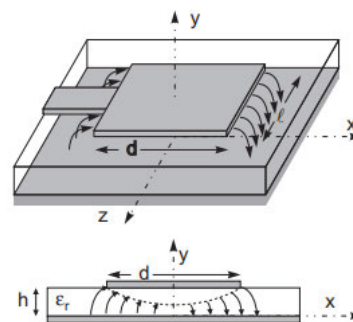


Figura 11. Distribución del campo

En la figura 11, se ilustran las líneas de campo que van desde la línea conductora hasta el plano de tierra, concentrándose la mayor parte por debajo de la tira microstrip, sin embargo se aprecian los llamados *fringing fields*, un efecto borde en el que los campos no se confinan dentro del conductor, sino que se extienden más allá de los bordes del parche como se muestra en la figura 12, lo que provoca un alargamiento efectivo de las dimensiones del parche. Debido a que las líneas de campo se extienden tanto por el aire como por el sustrato se introduce la permitividad de referencia, ϵ_{reff} .

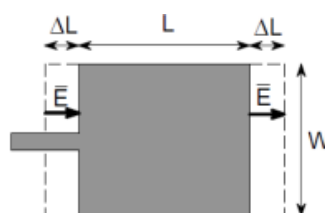


Figura 12. Alargamiento efectivo del parche

En un parche rectangular el valor del largo de la antena L debe estar comprendido entre $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$ y el valor del ancho W se sintonizará en función de la impedancia deseada. Otro de los factores claves a la hora de diseñar una antena microstrip es elegir correctamente el sustrato. El sustrato dieléctrico es eléctricamente delgado aproximadamente se encuentra entre $0.003\lambda < h < 0.05\lambda$ para evitar fugas y ondas superficiales mientras que la constante dieléctrica está comprendida entre $2.2 < \epsilon_r < 12$ para que las líneas de campo se encuentren confinadas en torno a la línea microstrip.

Los sustratos gruesos con constante dieléctrica baja proporcionan mejor eficiencia y mayor ancho de banda sin embargo el tamaño de los elementos es mayor. Con sustratos delgados con constantes dieléctricas elevada se consiguen circuitos de microondas que requieran minimizar la radiación no deseada, acoplamiento y reducir el tamaño de los elementos, la desventaja es que sus pérdidas son mayores con lo que son menos eficientes y el ancho de banda es relativamente menor [2]. En la siguiente tabla aparecen los sustratos más comunes.

Company	Substrate	Thickness (mm)	Frequency (GHz)	ϵ_r	$\tan\delta$
Rogers Corporation	Duroid 5880	0.127 1.575	0 – 40	2.20	0.0009
	RO 3003	3.175	0 – 40	3.00	0.0010
	RO 3010		0 – 10	10.2	0.0022
	RO 4350	0.168 0.508 1.524	0 – 10	3.48	0.0037
-	FR4	0.05 – 100	0.001	4.70	-
DuPont	HK 04J	0.025	0.001	3.50	0.005
Isola	IS 410	0.05 – 3.2	0.1	5.40	0.035
Arlon	DiClad 870	0.091	0 – 10	2.33	0.0013
Polyflon	Polyguide	0.102	0 – 10	2.32	0.0005
Neltec	NH 9320	3.175	0 – 10	3.20	0.0024
Taconnic	RF-60A	0.102	0 – 10	6.15	0.0038

Tabla 3. Ejemplos sustratos dieléctricos

Los parches pueden tener una gran variedad de geometrías dependiendo de la aplicación que se requiera. Algunas de ellos se muestran en la siguiente ilustración, siendo los más populares los rectangulares, cuadrados, circulares o triangulares debido a la facilidad de análisis y fabricación. En el desarrollo del presente trabajo se utilizará un parche de tipo rectangular.

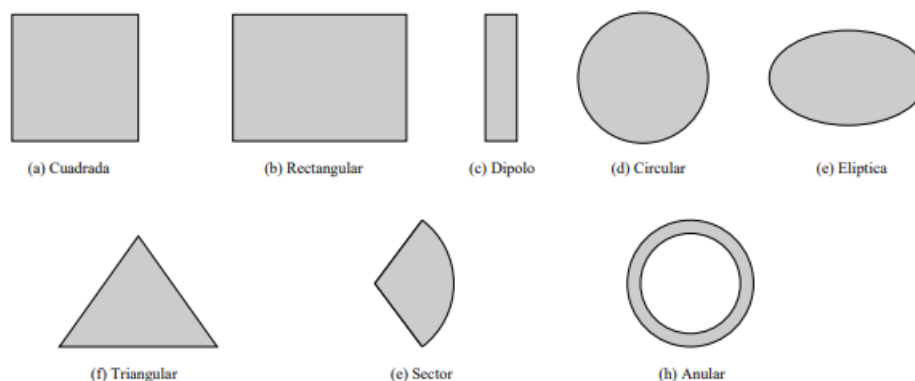


Figura 13. Tipo de geometrías de los parches

El análisis de las antenas microstrip se puede realizar de diversas formas según la sencillez o precisión que se busque, desde los modelos más simples, basados en líneas de transmisión o cavidades, hasta los más complejos utilizando métodos espectrales o numéricos.

Los principales modelos de análisis del parche rectangular son:

Modelos empíricos: Se trata de los modelos más sencillos de realizar, su rango de precisión tiene buen nivel para rangos de frecuencias $f < 30$ GHz. Los principales modelos empíricos son: la línea de transmisión o la cavidad resonante.

Modelos semi-empíricos: Se trata de unos modelos intermedios con los que se obtienen mayor precisión que los modelos empíricos y menor que los de onda completa, entre este tipo de modelos destacan:

- Método de reciprocidad
- Enfoque variacional
- Enfoque de ecuación integral dual entre otros
- Técnica de condición de frontera de borde generalizado

Modelos de onda completa: Estos son los modelos más precisos sin embargo también son los más difíciles de implementar, ya que requieren de avanzadas herramientas computacionales. Entre los modelos de onda completa se encuentran:

- Método de momentos en el dominio del espacio
- Análisis en el dominio de la transformada.
- Método de elementos finitos (FEM)
- Método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD)

Este proyecto se realizará mediante el método de la línea de transmisión para obtener una primera aproximación de los valores y a través de la herramienta CST Studio Suite se simulará el elemento radiante a través de este programa que ofrece un análisis de antenas tanto FEM como FDTD.

A continuación, se enumeran las principales ventajas de las antenas microstrip:

- Peso ligero, simples y ocupan poco volumen, su bajo perfil plano permite que se adapte fácilmente a las estructuras y superficies tanto planares como superficies curvas.
- Bajo costo de fabricación y facilidad para fabricarlas en serie, es decir permite una producción en masa.
- Soporta la doble frecuencia, pueden diseñarse para trabajar a distintas frecuencias.
- Doble polarización se puede conseguir tanto polarización lineal como polarización circular.
- Fácilmente integrables en arrays y circuitos de microondas impresos (MMICs, monolíticos integrados para microondas)
- Son mecánicamente robustas al ser montadas en superficies rígidas.

Por otra parte, existen una serie de desventajas en comparación con otras antenas de microondas:

- Pequeño ancho de banda.
- Baja potencia.
- Baja ganancia y eficiencia.
- Limitada potencia.
- Baja pureza de polarización.
- Poco aislamiento entre los elementos radiantes y la alimentación.

Las ventajas de las antenas microstrip superan con creces las limitaciones que tienen. Conviene estudiar soluciones para poder disminuir en la medida de lo posible los inconvenientes mencionados anteriormente y poder así aprovechar las ventajas de dicho tipo de antenas, uno de los motivos de la realización del presente trabajo.

Las antenas microstrip son comúnmente utilizadas en numerosas aplicaciones debido a las grandes ventajas mencionadas anteriormente. Inicialmente este tipo de antenas se comenzó a utilizar en sistemas militares como radares, sistemas de teledetección, sensores o guiado de misiles, sin embargo, este tipo de antenas ha ido abarcando otras áreas debido en gran parte al bajo coste que precisa su fabricación. Este tipo de antenas se encuentran principalmente en aplicaciones como:

- Comunicaciones móviles: telefonía, automóviles.
- Aviación, antenas para telefonía, aviación, altímetros o navegación.
- Comunicaciones por satélite, sistemas de posicionamiento global (GPS).
- Biomedicina, aplicadores de calor, hipotermia, radares biomédicos.
- Radares Doppler, altímetros, sistemas de control, telemetría sensores remotos, antenas integradas o detectores de personas.

3.1 Técnicas de alimentación:

Un aspecto importante a la hora de diseñar una antena microstrip es poder definir el esquema de alimentación que tendrá para que pueda funcionar correctamente, cabe destacar que entre el parche radiante y la alimentación debe existir una buena adaptación de impedancias para que se refleje la menor potencia posible y se pueda radiar la máxima potencia. Existen diferentes métodos de alimentación, los principales son:

Alimentación directa: Como el propio nombre indica en este tipo de alimentación se requiere contacto directo entre el parche radiante y la estructura de alimentación. Este tipo de alimentación es sencillo, sin embargo, esta técnica tiene como desventaja que al encontrarse sobre el mismo sustrato la antena y la alimentación no se pueden optimizar por separado.

•Alimentación por microstrip: Consiste en conectar al parche directamente una línea microstrip diseñada para tener la impedancia característica deseada. Se puede unir la línea directamente al borde del parche alimentando así la antena. Además, es posible conectar la línea por medio de inserciones donde dependiendo de la profundidad se determina el acoplamiento de impedancias. Destaca su facilidad de fabricación y modelado, sin embargo, pueden no presentar gran eficiencia en cuanto a ancho de banda y acoplamiento. En el presente proyecto se utilizará este tipo de alimentación. BW 2-5%

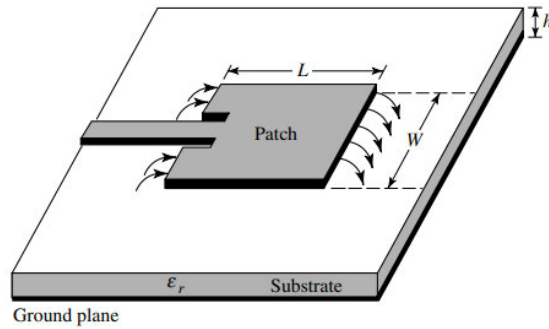


Figura 14. Alimentación por línea microstrip

•Alimentación por coaxial: Este tipo de alimentación es bastante utilizado en antenas microstrip, donde el cable coaxial se une a la parte trasera de la placa del circuito impreso conectándose a tierra y el conductor central del coaxial se une con el parche, al igual que en la alimentación microstrip, la posición del coaxial dependerá de la adaptación de impedancias. Es fácil de fabricar, adaptar y tiene baja radiación espuria y presenta una buena eficiencia al estar la alimentación directamente conectada a la antena y el resto del sistema está aislado, como desventaja se encuentra que tiene un ancho de banda estrecho (BW 2-5%) y es una técnica compleja ya que se debe perforar el sustrato y soldar el coaxial a la antena.

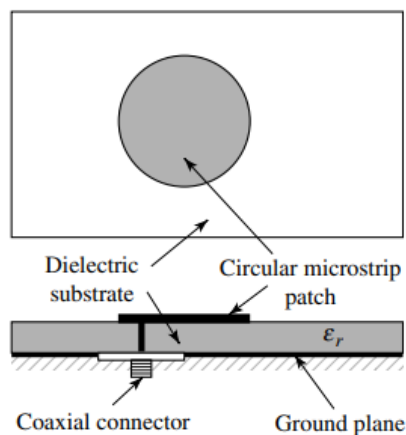


Figura 15. Alimentación por coaxial

Alimentación por proximidad: En este método de alimentación no existe contacto directo si no que se aprovecha el acoplamiento electromagnético. En este caso el parche se encuentra sobre un sustrato dieléctrico y en la parte inferior de la estructura se tiene una línea de alimentación sobre otro sustrato dieléctrico unido a un plano de tierra. Este método cuenta con la ventaja de que el parche y la red de alimentación se pueden optimizar por separado, lo que proporciona flexibilidad al realizar el diseño. Para obtener mejores prestaciones conviene tener sustratos más anchos con permitividades bajas en el parche y sustratos delgados con permitividades altas en la alimentación. Como desventaja en este método es que puede haber radiación que puede generar cierta interferencia. (BW 13%)

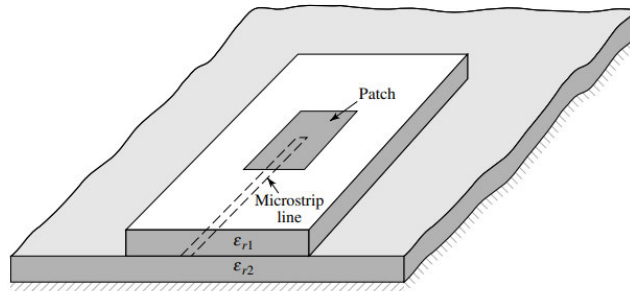


Figura 16. Alimentación por acoplamiento EM

Alimentación por apertura: En este método se utilizan dos sustratos dieléctricos uno para la antena radiante y otro para la alimentación. El plano de tierra tiene una apertura donde sus dimensiones influyen en la impedancia y por tanto en el acoplamiento. (BW2-5%)

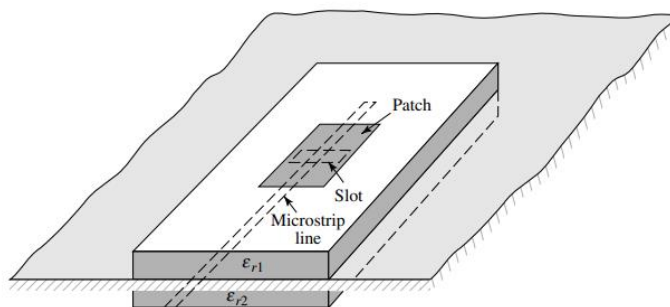


Figura 17. Alimentación por apertura

4. Especificaciones y restricciones de diseño

Dependiendo de la aplicación concreta en la que se quiera utilizar una antena microstrip los parámetros se ajustan en función de su necesidad.

En este proyecto se propone realizar un array 2x2 de antenas de parche capaz de funcionar a las frecuencias de 2.4 GHz y 5.8 GHz, frecuencias libres, útiles en variedad de aplicaciones como se detalló en el apartado 2.1.

Las especificaciones planteadas antes de comenzar el proyecto se muestran en la siguiente tabla:

Ganancia	> 6 dB
Polarización	Lineal
Ancho de haz a -3 dB	> 60°
Lóbulo superior	>10 dB
VWSR	< 2
Impedancia	50 Ω

Tabla 4. Especificaciones del Anteproyecto

Para garantizar el correcto rendimiento de la antena se deben tener en cuenta los siguientes factores a la hora de realizar el diseño:

Tipo de sustrato: El sustrato dieléctrico seleccionado es fibra de vidrio FR-4 compuesto de resina epoxídica reforzada de fibra de vidrio de la marca *Bungard*. Con las siguientes especificaciones

- Constante dieléctrica (ϵ_r): 4.3
- Espesor de la fibra (h): 1.5 ± 0.1 mm
- Espesor cobre: 35 μ m
- Emulsión fotosensible: 4 μ m

La elección del sustrato a la hora de diseñar la antena es crucial y se debe elegir en función de la necesidad de la antena, con sustratos gruesos y ϵ_r baja se consigue mayor ganancia, y ancho de banda debido a que la velocidad de propagación es mayor, mientras que con sustratos delgado y un valor de ϵ_r alta se reduce el volumen de la antena y es útil para espacios compactos en circuitos integrados, proporcionan mejor adaptación de impedancia se utilizan en aplicaciones de banda estrecha como en sistemas de identificación RFID o sistemas de telemetría.

Separación entre parches: Para evitar interferencias de los campos entre los elementos del array la distancia (d) entre los parches debe ser la adecuada para así evitar además la aparición de lóbulos laterales no deseados y reducir la eficiencia de la antena.

La separación entre los elementos debe ser del orden de $\lambda/2$, si la separación entre elementos es $d < \lambda/2$ solo aparece un máximo, mientras que esa distancia $d > \lambda/2$ aparecen lóbulos secundarios de difracción, por tanto, la separación debe estar entre $\lambda/2 < d < \lambda$ [1].

En este proyecto se diseña un array 2x2 formado a su vez por dos arrays 1x2 en paralelo uno a 2.4 GHz y otro a 5.8 GHz, al tratarse de frecuencias distintas la longitud de onda varía y con esto la separación entre elementos no es igual, con lo que se busca una distancia de compromiso adecuada para que el array final no pierda eficiencia, en este proyecto establecerá inicialmente una distancia entre elementos de 0.7λ inicialmente, a través de la optimización con CST se ajustará dicho valor.

Red de alimentación: Los parches se alimentarán mediante línea microstrip adaptada a 50Ω y la configuración elegida para la alimentación del array es en paralelo.

Para la correcta adaptación del circuito se utilizan transformadores $\lambda/4$, que consisten en tramos de línea microstrip cuyo tamaño es la cuarta parte de la longitud de onda del medio guiado, con una determinada impedancia característica a una longitud eléctrica de 90° [6].

$$Z_{\lambda/4} = \sqrt{Z_0 Z_L}$$

Ecuación 13. Impedancia $\lambda/4$

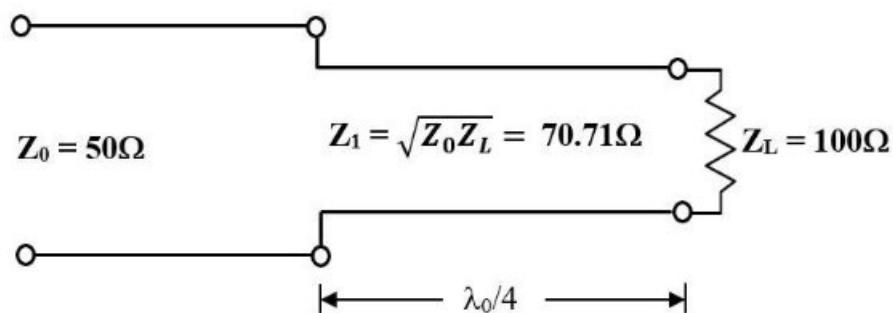


Figura 18. Circuito transformador $\lambda/4$

Siendo Z_0 la impedancia de entrada y Z_L la carga del sistema que se desea adaptar [15].

En el diseño de este proyecto se utilizará para la adaptación entre las líneas de 100Ω del divisor de potencia de la alimentación de los parches y la línea de alimentación de 50Ω .

Los parámetros de la antena que se tienen en cuenta para cumplir con las especificaciones del diseño son:

Coefficiente de reflexión: Mediante el parámetro S11 se puede apreciar la correcta adaptación de la antena como se presentó en el apartado 2.3.8, a través de este parámetro se puede extraer información acerca del correcto acoplamiento entre la antena y la impedancia de entrada, además de poder extraer el ancho de banda.

VSWR: Se establece que este valor sea menor a 2 dB, un valor de 1 dB significa que el acoplamiento es perfecto entre los elementos radiantes y la línea de transmisión.

Impedancia: Si el elemento radiante está correctamente adaptado a la impedancia, el resultado obtenido de la impedancia debe ser cercano a 50Ω y la parte reactiva ser nula. Mediante la carta de Smith se puede apreciar el valor de la impedancia.

Lóbulo principal: A través de su representación se puede obtener el valor de la ganancia de la antena y las propiedades del ancho de haz.

Los programas utilizados para el estudio del array multibanda son:

Matlab para la realización de los cálculos numéricos, a través del script que se encuentra en el anexo 1 se han obtenido las dimensiones de los parches simples, la distancia entre los elementos y los valores de la red de alimentación

CST Studio Suite: Se trata de un potente software de simulación que diseña, analiza y optimiza electromagnéticamente en 3D. Con dicho programa se ha realizado el diseño, y optimización tanto de los parches simples como los arrays mediante las simulaciones [9].

5. Descripción de la solución propuesta

Una vez conocidas las antenas microstrip se empezará a realizar su diseño, en primer lugar, calculando las dimensiones del sistema para tener una primera aproximación de cara a su posterior simulación con el software CST Studio Suite.

La correcta sintonización y adaptación de las antenas de parche microstrip residen principalmente en las dimensiones de los elementos que la componen, como se explica en el apartado anterior.

Se calculan las dimensiones de la antena para que resuene a las frecuencias objeto de estudio. Estos valores dependen de los parámetros mencionados anteriormente. Una vez se conocen las dimensiones del parche se diseñará la línea que excite la antena tratando de conseguir una buena adaptación en la impedancia. La alimentación se realizará por contacto directo, concretamente por línea microstrip.

El diseño teórico de las dimensiones del parche se realiza a través de los siguientes pasos:

1. Diseño sobre sustrato FR-4 ($\epsilon_r = 4.3$ y $h = 1.6$ mm)
2. Las frecuencias de resonancia son 2.4 y 5.8 GHz
3. Cálculo del ancho del parche (W)

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

Ecuación 14. Ancho parche

Siendo λ la longitud de onda en el vacío, definida como la relación entre la velocidad de la luz y la frecuencia (Ecuación 1)

4. Cálculo de la constante dieléctrica efectiva ϵ_{eff}

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2}$$

Ecuación 15. Constante dieléctrica efectiva

5. Una vez determinado W y ϵ_{eff} , determinar la extensión de la longitud ΔL usando la ecuación 16:

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

Ecuación 16. Longitud ΔL

6. La longitud real del parche puede ser determinada por la solución de la ecuación 17

$$L_{\text{fec}} = \frac{v_0}{2fr\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}$$

Ecuación 17. Longitud efectiva

7. Finalmente, la longitud del parche se obtiene como:

$$L = L_{efec} + 2 \cdot \Delta L$$

Ecuación 18. Largo parche

Una vez obtenidas las dimensiones del parche se realiza su adaptación, para conseguir que el parche esté completamente adaptado a la línea de alimentación se realizarán dos inserciones en el parche de longitud y_0 , el cálculo de dichas inserciones se realiza a través de las siguientes ecuaciones explicadas en profundidad en el libro de C. A. Balanis [2].

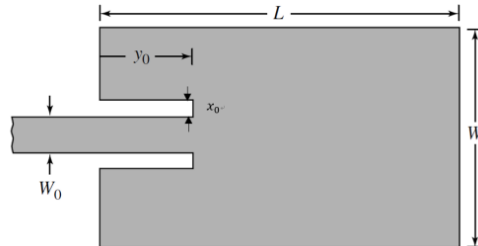


Figura 19. Parche con inserciones

Las inserciones producen un efecto de conductancia mutua calculadas de la siguiente manera, donde k_0 es el número de onda, J_0 la función de Bessel de orden 0, R_{in} la resistencia de entrada en cada punto del parche y y_0 la posición donde se desea calcular el valor de la resistencia [14]

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2}$$

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta$$

$$G_{12} = \frac{I_{12}}{120\pi^2}$$

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \right]^2 J_0(k_0 L \sin(\theta)) \sin^3 \theta d\theta$$

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})}$$

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right)$$

Ecuación 19. Ecuaciones para obtener longitud y_0 del inset

Respecto al ancho de la línea de alimentación W_f se calcula teóricamente como aparece en la ecuación 20 (donde B es la permeabilidad de la impedancia). Sin embargo, CST permite mediante la opción *Impedance Calculation* calcular el valor estimado que puede tener la línea de alimentación a 50Ω , como se aprecia en la figura 20.

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

$$B = \frac{6\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

Ecuación 20. Fórmula del ancho de la línea de alimentación

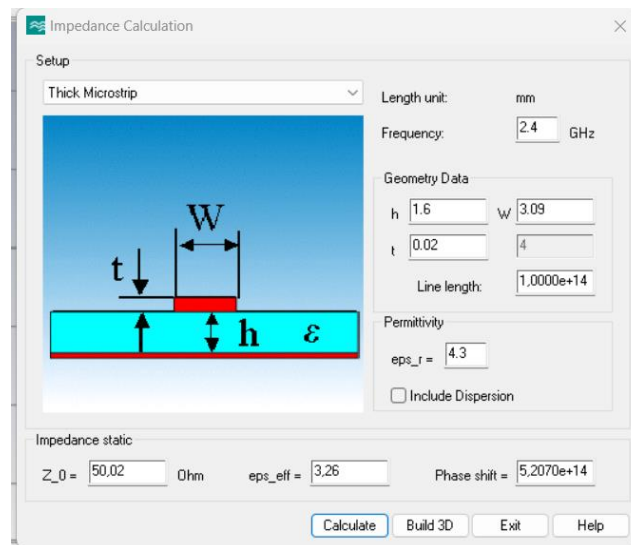


Figura 20. Ancho de la línea transmisión mediante CST

A continuación, se ilustran las medidas obtenidas para las dos frecuencias de trabajo mediante Matlab:

FRECUENCIA (GHz)	2.4	5.8
W (Ancho) mm	38.37	15.88
L (Largo) mm	29.76	11.88
y ₀ (Inset) mm	9.23	3.66
W _f (Línea tx) mm	3.11	3.11

Tabla 5. Medidas parche

Una vez obtenidos los valores iniciales del parche a cada frecuencia se procede a realizar el diseño en CST. Para ello se construye el plano de tierra asignando como material cobre, indicando como espesor $h = 0.035$ mm y sobre él el sustrato dieléctrico asignando como material FR-4(lossy) con una constante dieléctrica de 4.3 y un espesor de $h = 1.6$ mm y en la parte superior del sustrato dieléctrico, se incorpora el parche de cobre con el mismo espesor que el plano de tierra. El siguiente paso es añadir las dos inserciones o inset de longitud y_0 , además de añadir la línea de alimentación.

Dada la dificultad de diseñar la conexión de la antena con el conector SMA y al no interferir en los resultados, la simulación se puede realizar mediante la opción de *Waveguide Port* donde la creación del puerto depende el ancho de la línea a 50Ω calculado anteriormente, el espesor y la constante dieléctrica del sustrato.

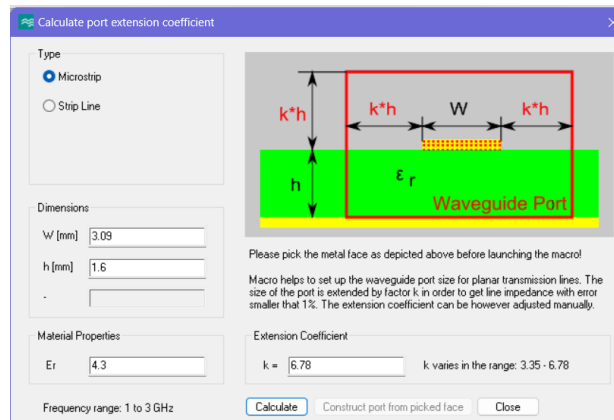


Figura 21. Cálculo del puerto en CST

El diseño del parche que se obtiene se muestra en las siguientes figuras.

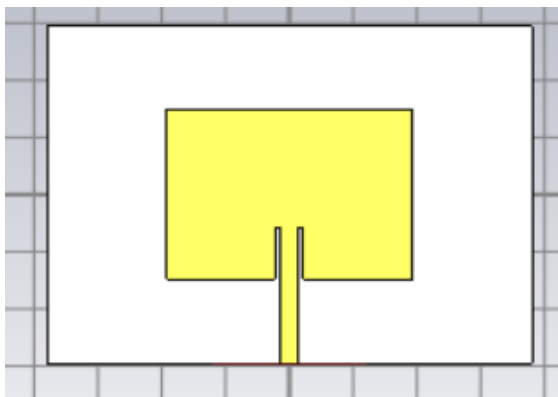


Figura 22. Antena en CST vista frontal

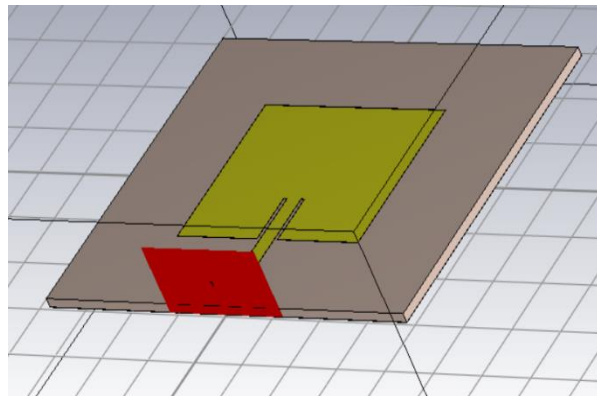


Figura 23. Antena en CST vista lateral

A la hora de realizar la simulación se ha elegido el diseño en el dominio del tiempo y el tipo de mallado hexaédrico y normalizado. Al realizar la simulación con los valores obtenidos en Matlab no se obtiene los resultados esperados con lo que para optimizar los valores se realiza un barrido mediante la opción *Parameter Sweep* del programa hasta conseguir el funcionamiento de la antena deseado.

Una vez conocidas las medidas del parche ya simuladas y optimizadas a las dos frecuencias de trabajo se procede a diseñar el array 1x2 en paralelo donde se introduce un divisor de potencia en la red de alimentación, donde cada parche se divide mediante un divisor de potencia de tipo Wilkinson resultando dos líneas con un valor de impedancia de 100 Ω [6].

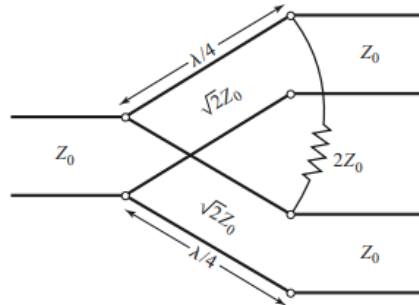


Figura 24. Divisor de potencia Wilkinson

Como último paso se diseña el array 2x2 con el conjunto de los subarrays conseguidos para cada frecuencia, unidos con la red de alimentación. Para que la red esté bien adaptada se añade un transformador $\lambda/4$ obteniendo un valor de impedancia de 70.71 Ω.

$$Z_{\lambda/4} = \sqrt{50 \times 100} = 70.71 \Omega$$

Ecuación 21. Impedancia $\lambda/4$

A través de las distintas impedancias que componen la red (50 Ω, 70.71 Ω y 100 Ω) se calcula el ancho de las líneas para que los elementos del array estén en fase. El cálculo se obtiene a partir de la expresión mostrada en la figura. Este cálculo se realiza en Matlab como se puede ver en el Anexo 1.

$$Z_o = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[\frac{8h}{W_f} + \frac{W_f}{4h} \right] & \text{if } \frac{W_f}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[\frac{W_f}{h} + 1.393 + 0.667 \times \ln \left(\frac{W_f}{h} + 1.444 \right) \right]} & \text{if } \frac{W_f}{h} > 1 \end{cases}$$

Figura 25. Ecuación cálculo ancho de la línea

Para la elección de la distancia entre los elementos se evita que sea mayor a λ para evitar la aparición de lóbulos no deseados. Como relación de compromiso se establece una distancia entre los parches de aproximadamente 0.7λ , mediante la simulación se ajusta dicho valor ya que al trabajar con dos frecuencias diferentes la longitud de onda es distinta.

Nuevamente al realizar la simulación se optimizan los valores del diseño hasta conseguir cumplir con las especificaciones que requiere la antena para su correcto funcionamiento. Las medidas finales se presentan en el siguiente capítulo.

6. Resultados de la simulación

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los distintos pasos seguidos para la obtención del array, en primer lugar, se simulan a nivel individual los parches a 2.4 y 5.8 GHz para a continuación poder simular un array 1x2 a las mismas frecuencias y finalmente formar un array 2x2 de doble frecuencia. Los principales parámetros que se recogen para el análisis del funcionamiento de la antena son: el parámetro S11, la impedancia a través de la carta de Smith, la relación de onda estacionaria VSWR, la distribución de energía sobre la antena y el patrón de radiación en 1D y 3D.

6.1 Simulación parches simples

6.1.1 Parche simple a 2.4 GHz

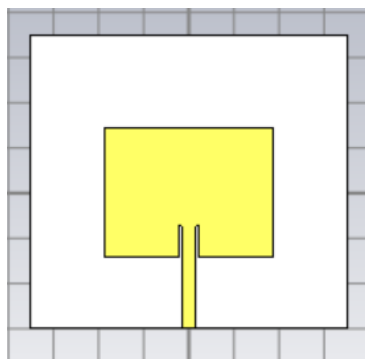


Figura 26. Parche microstrip a 2.4 GHz

En la siguiente tabla se presenta la comparación entre los valores obtenidos con Matlab y los valores finales tras optimizar la simulación.

Parámetros	Valor Matlab (mm)	Valor optimizado (mm)
W (Ancho parche)	38.37	38.5
L (Largo parche)	29.76	29.25
Ws (Ancho sustrato)	-	60
Ls (Largo sustrato)	-	60
y ₀ (Ancho inset)	9.23	9.23
x ₀ (Ancho inset)	-	0.7
Wf (Ancho línea tx)	3.11	3.11

Tabla 6. Medidas parche simple 2.4 GHz

Parámetro S11:

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la simulación una vez optimizadas las dimensiones de la antena. En la figura se presenta el valor S11 donde se puede observar un pico a 2.392 GHz de -18.91 dB y con un valor a 2.4 GHz de -17.63 dB. A través de los marcadores 2 y 3 situados a -10dB se alcanza un valor de ancho de banda de 69 MHz es decir un 2.87% de la frecuencia de trabajo.

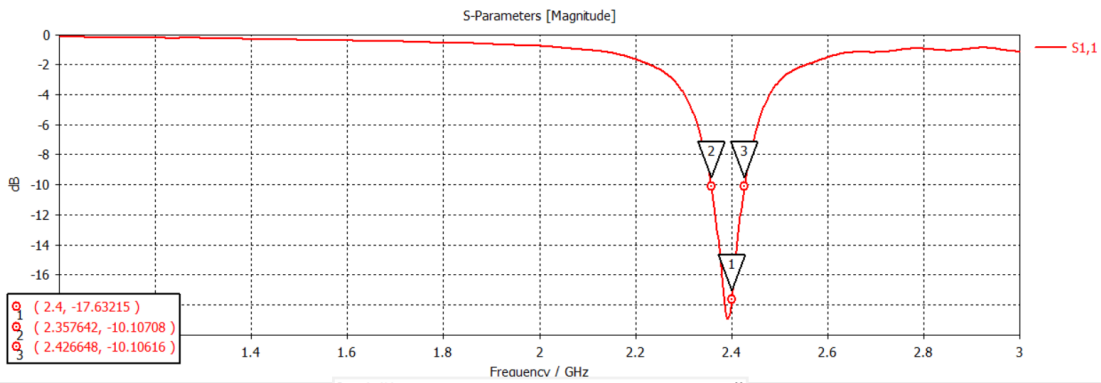


Figura 27. S11 a 2.4 GHz

Se observa en la carta de Smith un valor de impedancia de $54,93 -j11,80 \Omega$, un valor muy cercano a los 50Ω esperados para la correcta adaptación.

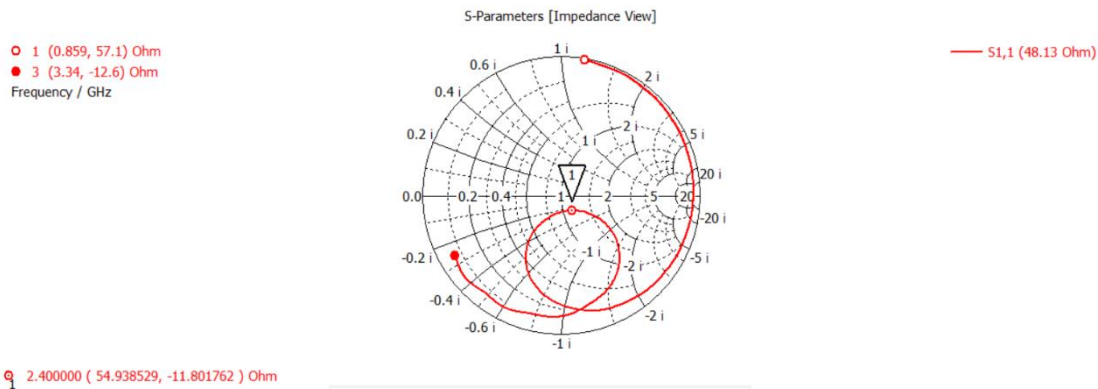


Figura 28. Carta Smith 2.4 GHz

VSWR: Se consigue un valor de relación de onda estacionaria de voltaje de 1.30 V, en la tabla 4 donde se especificaron los parámetros para el correcto funcionamiento de la antena se estableció como objetivo un valor de VSWR < 2.

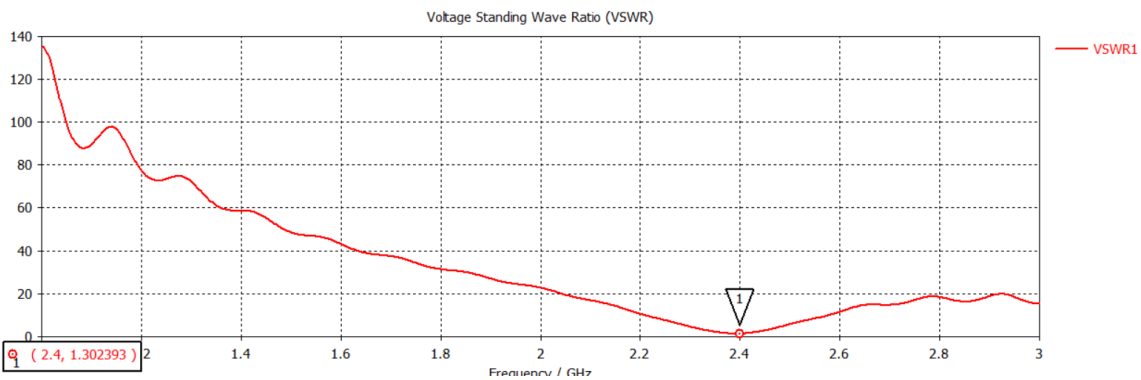


Figura 29. VSWR a 2.4 GHz

Distribución de energía: A continuación, se ilustra la distribución de la energía sobre el parche.

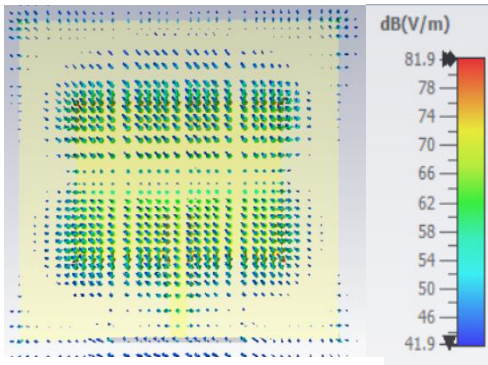


Figura 30. Plano E

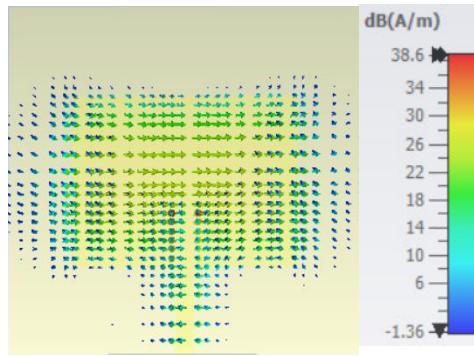


Figura 31. Plano H

Patrón de radiación unidimensional: En la dirección de máxima radiación, se obtiene una directividad de 6.27dBi, la diferencia de amplitud entre el lóbulo principal y secundario es de -13.7 dB, se mide un ancho de haz de 95.6°.

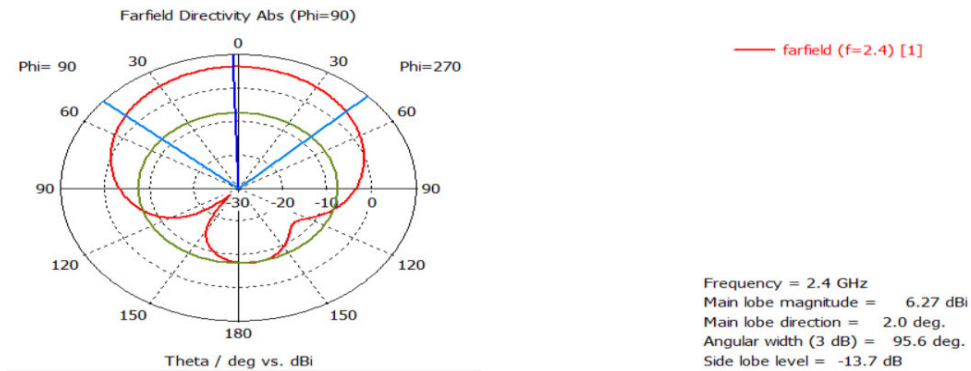


Figura 32. Patrón radiación 1D a 2.4 GHz

Patrón de radiación tridimensional: Desde la vista frontal se observa un diagrama omnidireccional, desde una vista lateral aparece ligeramente el lóbulo trasero.

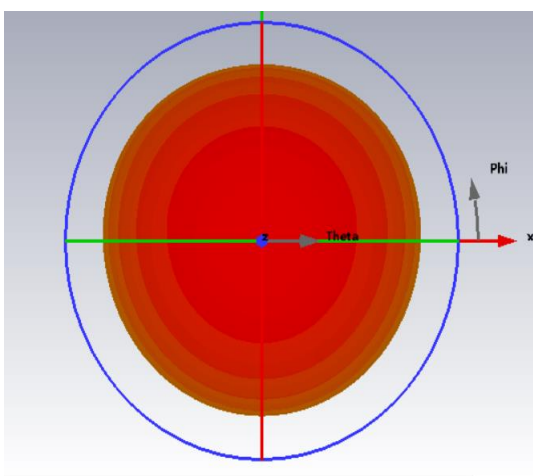


Figura 33. Patrón radiación 3D frontal

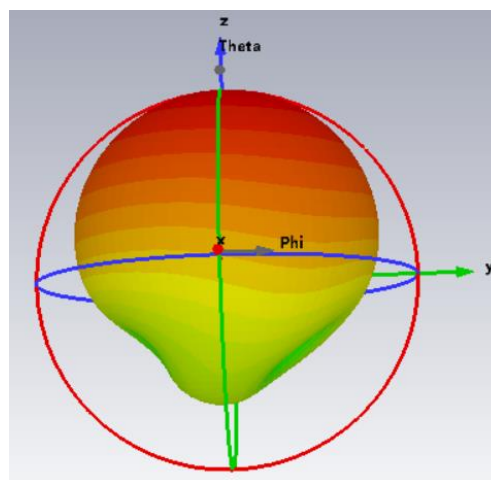


Figura 34. Patrón radiación 3D lateral

6.1.2 Parche simple a 5.8 GHz

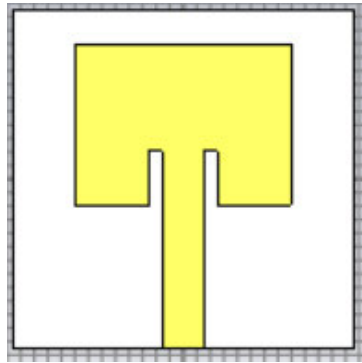


Figura 35. Parche microstrip a 5.8 GHz

En el caso del parche simple a 5.8 GHz se muestran las dimensiones obtenidas con Matlab y las finales tras la simulación:

Parámetros	Valor Matlab (mm)	Valor optimizado (mm)
W (Ancho parche)	15.87	15.88
L (Largo parche)	11.87	11.88
Ws (Ancho sustrato)	-	25
Ls (Largo sustrato)	-	25
y _o (Largo inset)	3.66	4
x _o (Ancho inset)	-	1
Wf (Ancho línea)	3.11	3.11

Tabla 7. Medidas parche simple 5.8 GHz

Parámetro S11

Se ha conseguido a 5.8 GHz un valor de pico de -24.13 dB, a través de los marcadores 2 y 3 se mide un ancho de banda de 200MHz un valor del 3.44% de la frecuencia de trabajo. En comparación con la frecuencia de 2.4 GHz se obtiene un ancho de banda mayor.

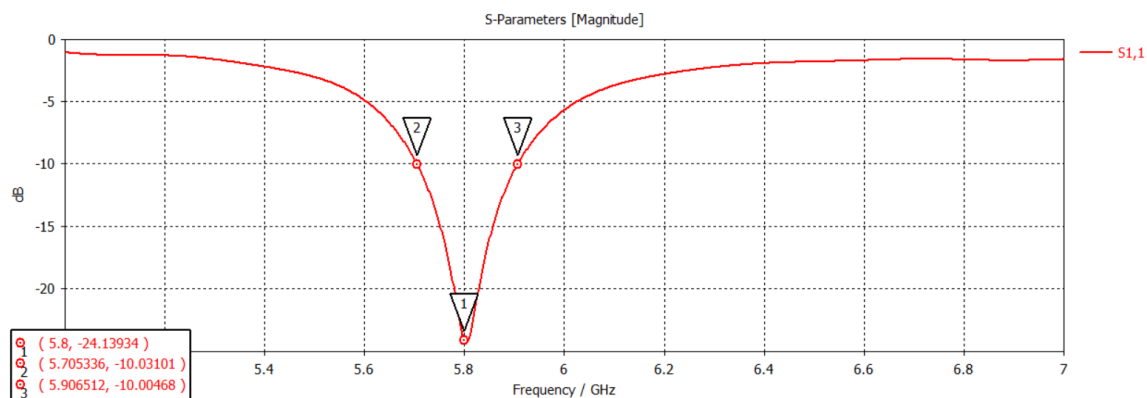


Figura 36. S11 a 5.8GHz

A través de la Carta de Smith se observa cómo existe una buena adaptación de la impedancia con un valor de $45.81 + j4.23 \Omega$.

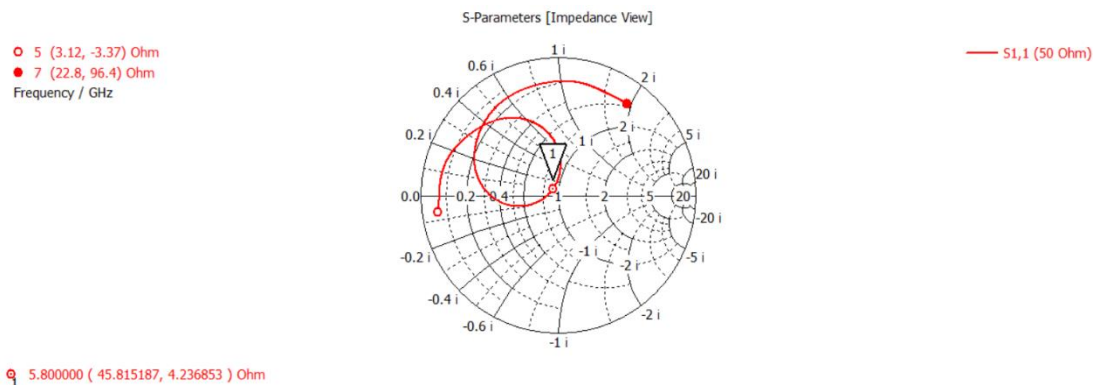


Figura 37. Carta Smith 5.8GHz

VSWR: Se obtiene como relación de onda estacionaria 1.13 V, un valor muy cercano a 1 lo que indica una perfecta adaptación entre la línea y la antena, donde apenas hay reflexiones.

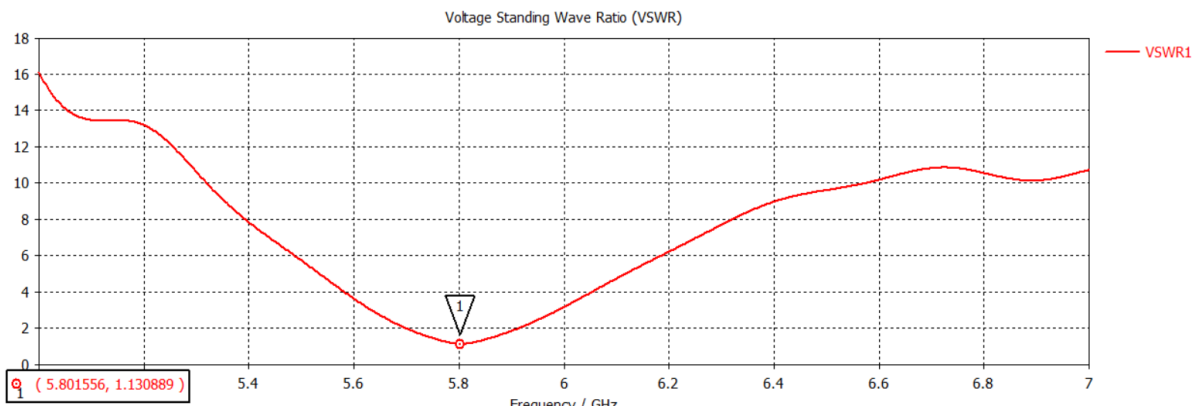


Figura 38. VSWR a 5.8GHz

Distribución de energía

En las siguientes imágenes se puede apreciar cómo se distribuye la corriente a través de la superficie de la antena.

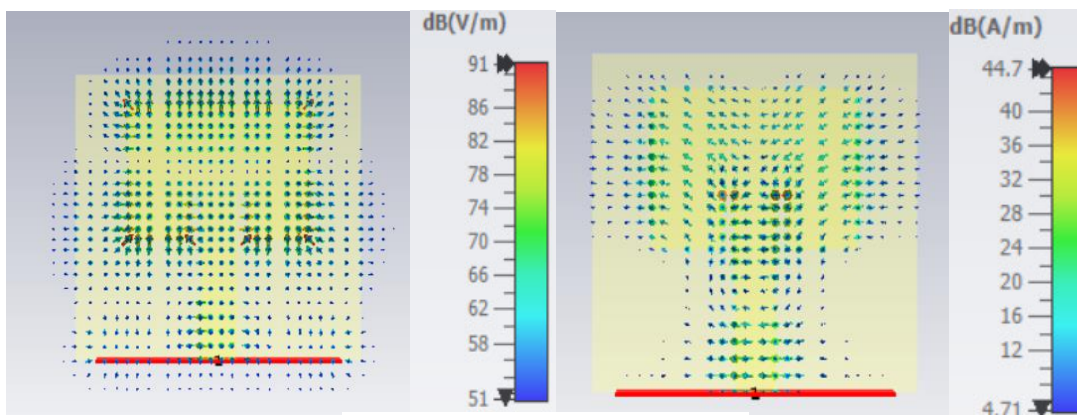


Figura 39. Plano E y H respectivamente

Patrón de radiación unidimensional: En este caso la directividad obtenida es de 6.37 dBi, con una relación de lóbulo principal a secundario de -8.8 dB y un ancho de haz de 86.1°. El lóbulo trasero aparece más pronunciado que para la frecuencia anteriormente estudiada.

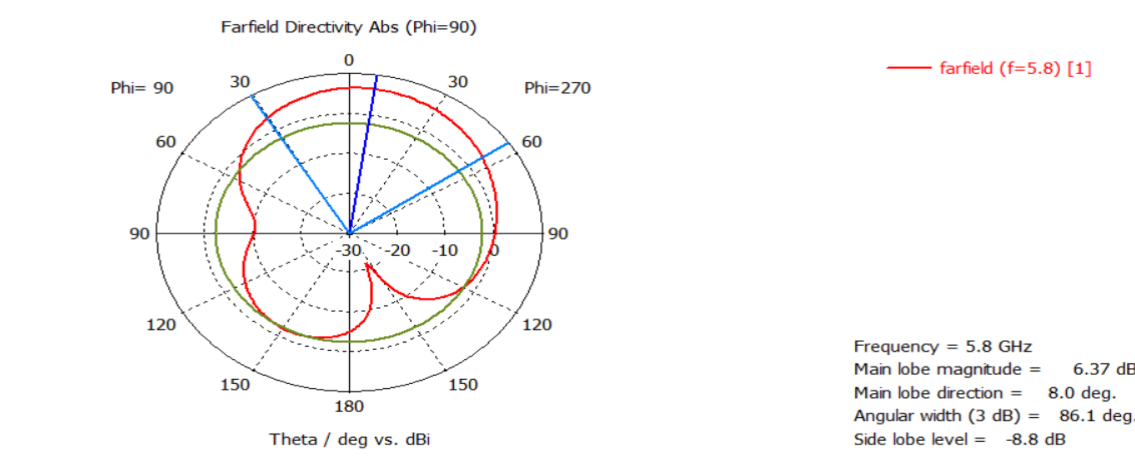


Figura 40. Patrón radiación 1D a 5.8GHz

Patrón de radiación tridimensional: Se puede observar cómo la máxima dirección de radiación está inclinada 8°. La antena se muestra más directiva en comparación con la frecuencia de 2.4 GHz.

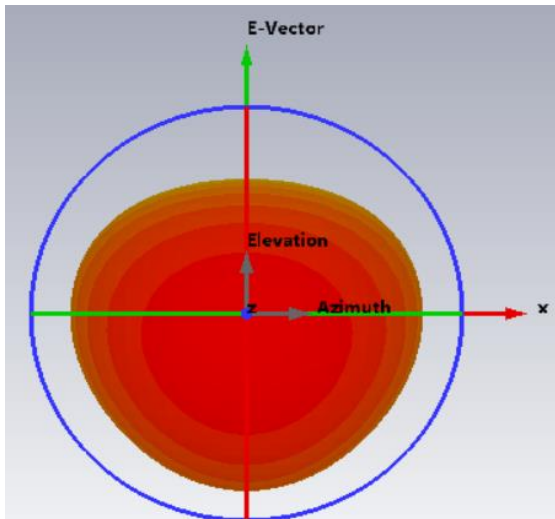


Figura 41. Patrón radiación 3D vista frontal

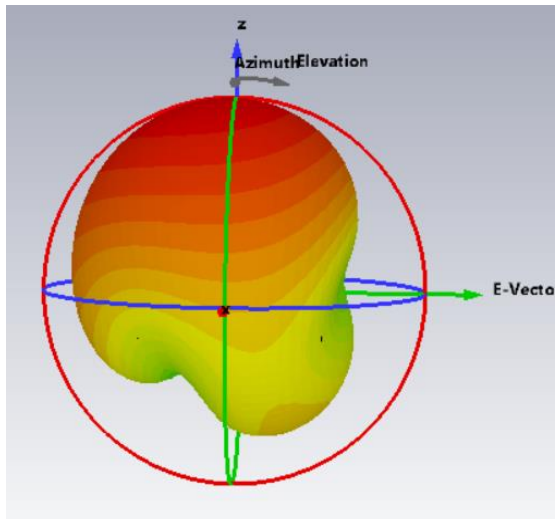


Figura 42. Patrón radiación 3D vista lateral

6.2 Diseño del array 1x2

6.2.1 Array a 2.4 GHz

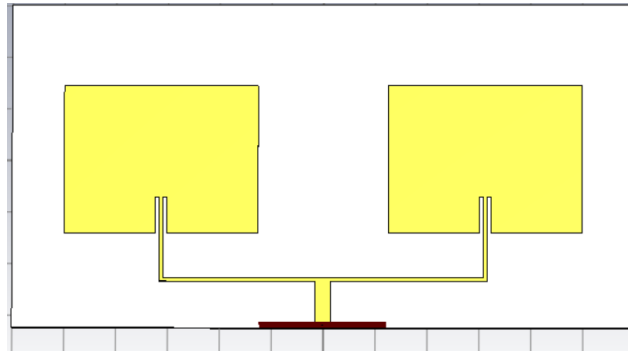


Figura 43. Array 1x2 a 2.4GHz

En la tabla se reflejan los valores obtenidos en Matlab y las medidas del array una vez optimizada la simulación.

Parámetros	Valor Matlab (mm)	Valor optimizado (mm)
W (Ancho parche)	38.36	37.4
L(Largo parche)	29.75	28.5
Ws(Ancho sustrato)	-	120
Ls(Largo sustrato)	-	60
y ₀ (Largo inset)	9.23	7
x ₀ (Ancho inset)	-	0.7
W _f (50)	3.11	3
W ₁₀₀ (100)	0.728	0.73

Tabla 8. Medidas array 1x2 a 2.4 GHz

Parámetro S11:

Como resultado del parámetro S11 se obtiene un pico a 2.419 GHz de -19.97 dB, a 2.4 GHz el coeficiente de reflexión es de -15.27 dB. Con un ancho de banda aproximado de 90 MHz, es decir, un 3.75%.

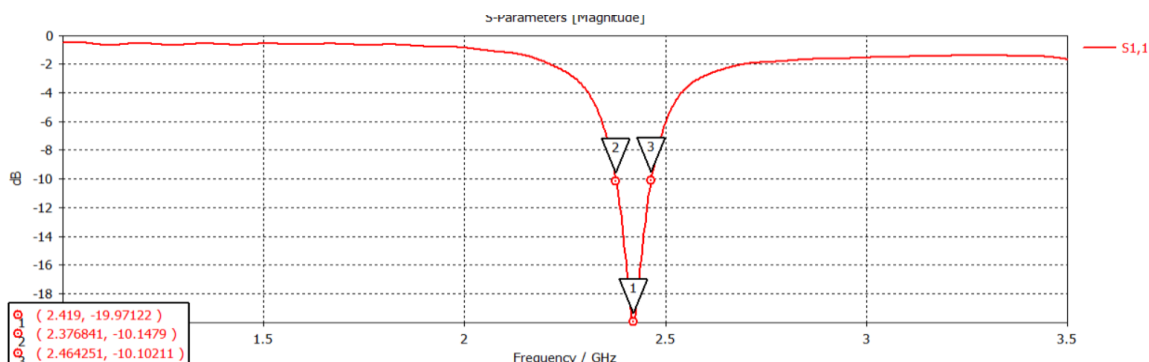


Figura 44. S11 array a 2.4GHz

En la carta de Smith se observa a la frecuencia de 2.4 GHz un valor de impedancia de $60.93 -j15.95 \Omega$ respecto al valor del parche individual varía ligeramente, pero sigue siendo un valor aceptable próximo a 50Ω .

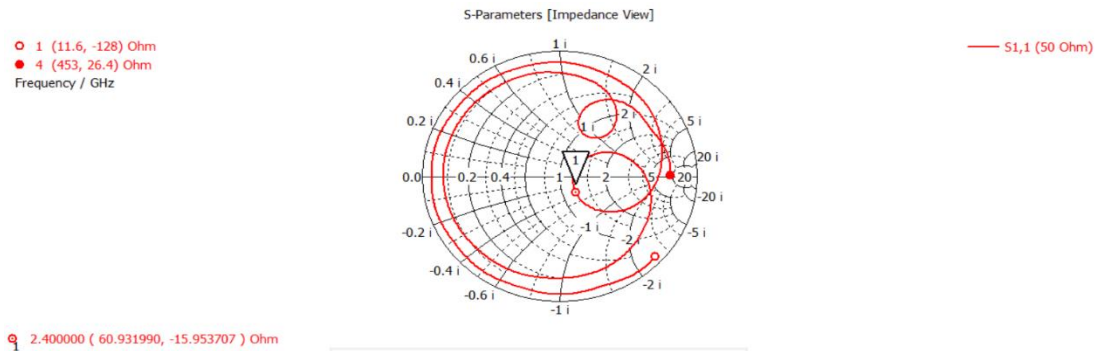


Figura 45. Carta de Smith array 2.4 GHz

VSWR: El valor mínimo se sitúa en la frecuencia de trabajo siendo de 1.28 V, un valor óptimo.

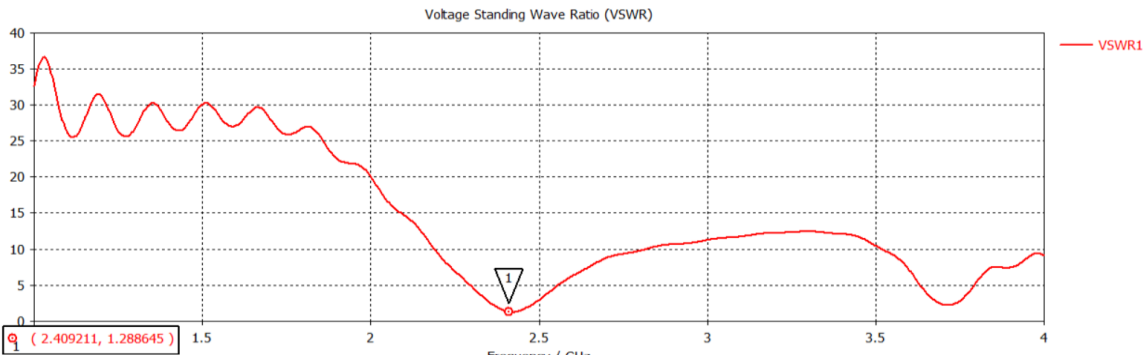


Figura 46. VSWR array 2.4 GHz

Distribución de energía: A continuación, se puede ver la distribución de la energía a través del array.

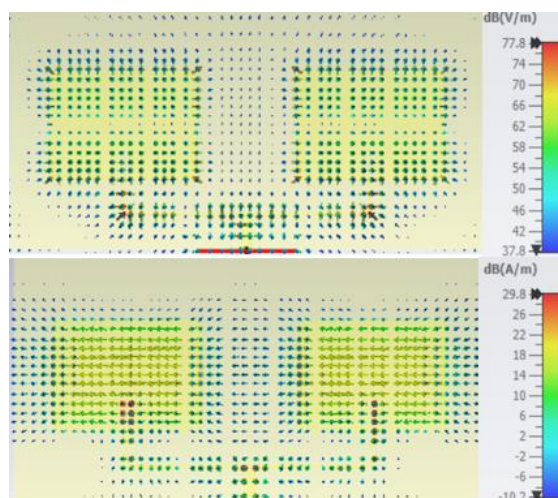


Figura 47. Plano E y Plano H

Patrón de radiación unidimensional: La directividad obtenida es de 8.71 dBi, el resultado cumple con lo esperado mejorando con respecto a tener una sola antena a esta frecuencia. Se observa un patrón en el plano superior completamente omnidireccional y en la parte inferior se aprecia un lóbulo trasero cuyo valor de relación lóbulo principal a lóbulo secundario se sitúa en -13.2 dB.

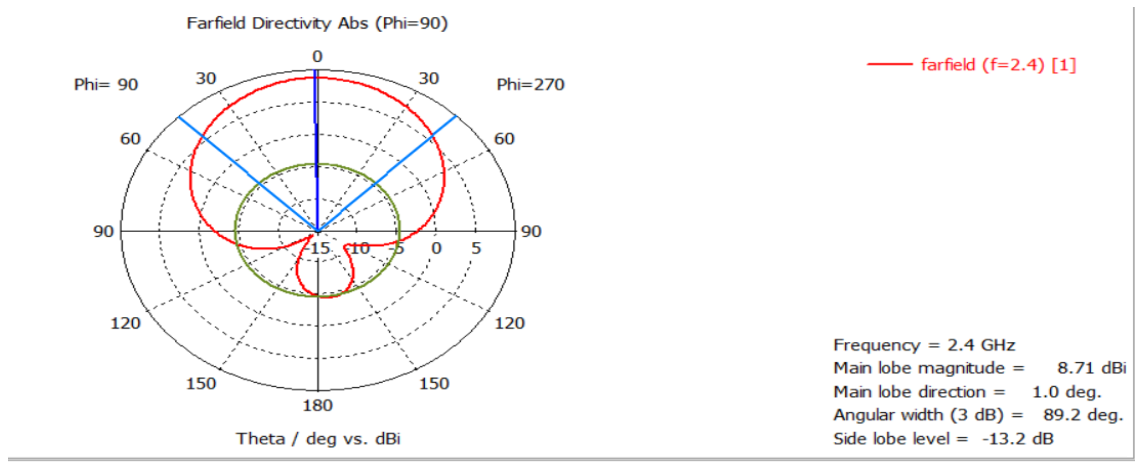


Figura 48. Patrón radiación 1D array 2.4GHz

Patrón de radiación tridimensional: En comparación con el patrón de radiación obtenido con una sola antena, se aprecia cómo se vuelve más directivo, se puede apreciar cómo la radiación se va concentrando en una dirección.

Las prestaciones de la antena mejoran en cuanto a directividad aumentando 2.44 dB.

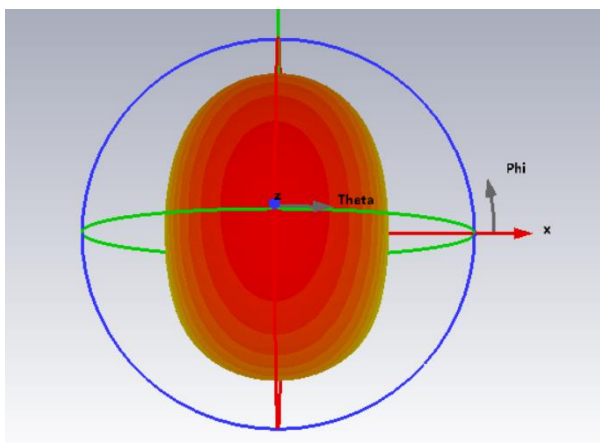


Figura 49. Patrón radiación 3D frontal

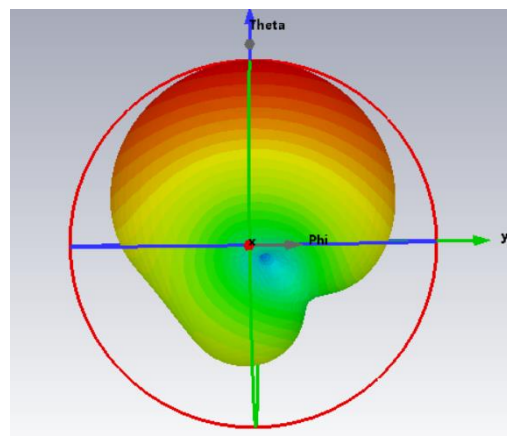


Figura 50. Patrón radiación 3D lateral

6.2.2 Array 1x2 a 5.8 GHz

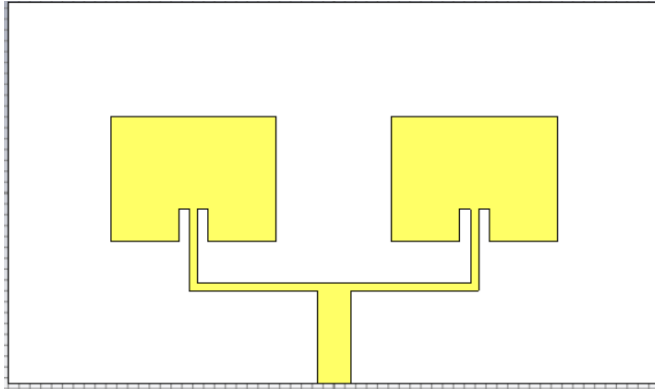


Figura 51. Array 1x2 a 5.8GHz

Para la configuración del array 1x2 resultan las siguientes medidas:

Parámetros	Valor Matlab (mm)	Valor optimizado (mm)
W (Ancho parche)	15.87	15.25
L (Largo parche)	11.87	11.5
Ws (Ancho sustrato)	-	60
Ls (Largo sustrato)	-	35
y_o (Largo inset)	3.66	3
x_o (Ancho inset)	-	1
W_f (50)	3.11	3.11
W₁₀₀(100)	0.73	0.73

Tabla 9. Medidas array 1x2 a 5.8 GHz

Parámetro S11

Se logra un valor de coeficiente de reflexión a 5.8 GHz de -45.58 dB un valor bastante positivo, En cuanto al ancho de banda se sitúan los marcadores a -10 dB a 5.99 GHz y 5.59 GHz siendo este un rango de 400MHz o lo equivale a un 6.89% sobre la frecuencia de trabajo. Un comportamiento correcto para el funcionamiento de la antena, mejorando nuevamente las condiciones respecto al parche individual.

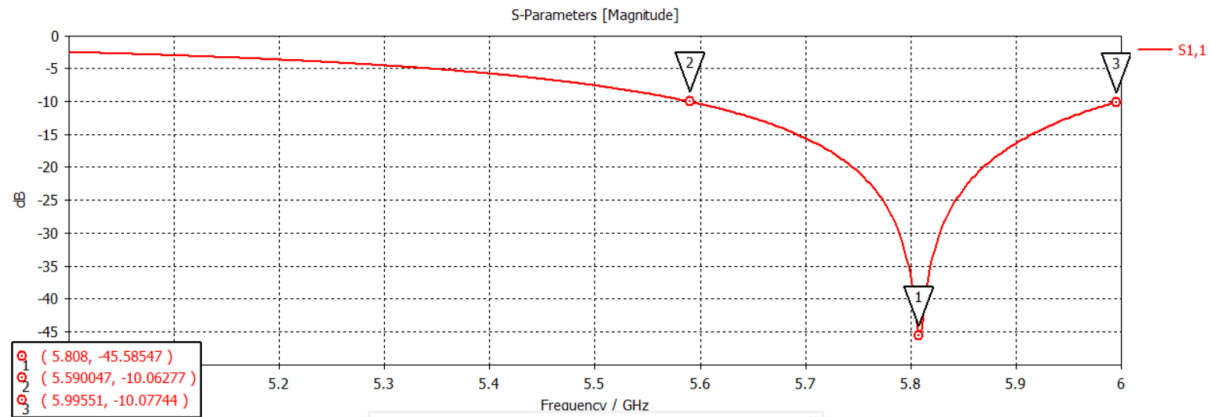


Figura 52. S11 array a 5.8 GHz

El valor de la impedancia proporcionado por la carta de Smith indica una adaptación prácticamente perfecta con un valor de $47.74 -j0.21 \Omega$

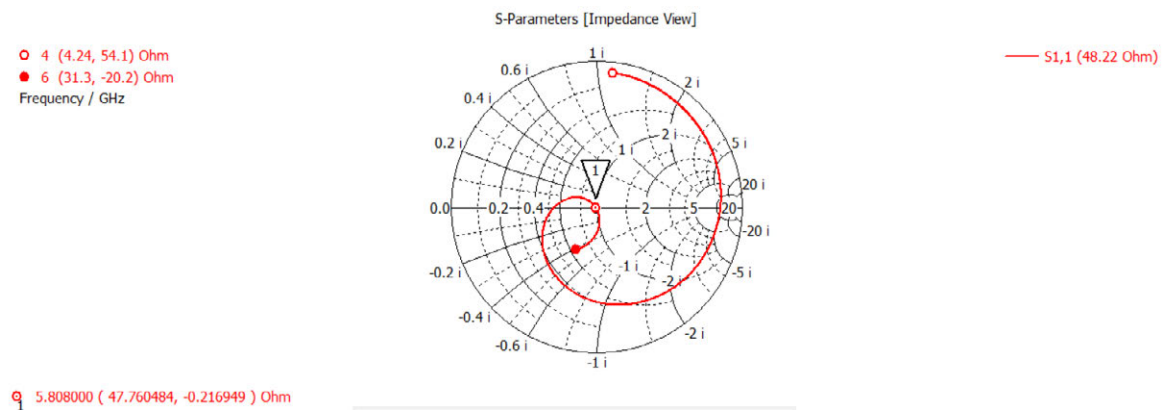


Figura 53. Carta de Smith array 5.8GHz

VSWR: El valor a 5.8 GHz se sitúa en 1.02, la potencia suministrada llega a la antena sin apenas onda reflejada.

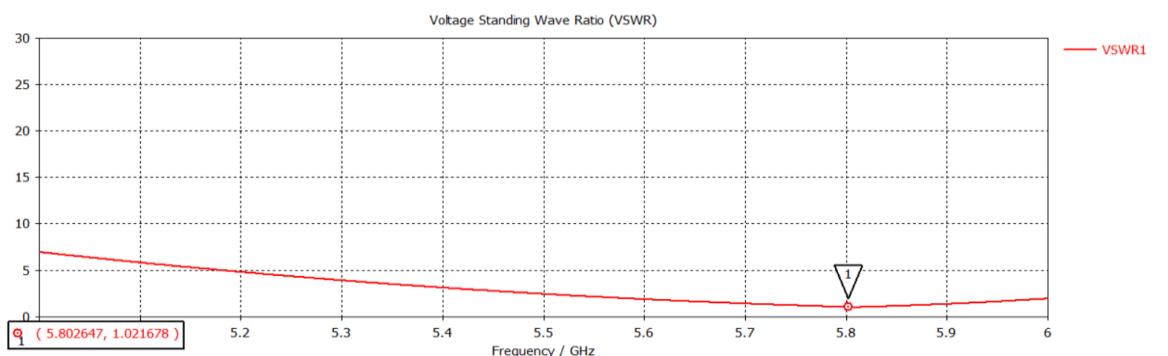


Figura 54. VSWR array 5.8GHz

Distribución de energía

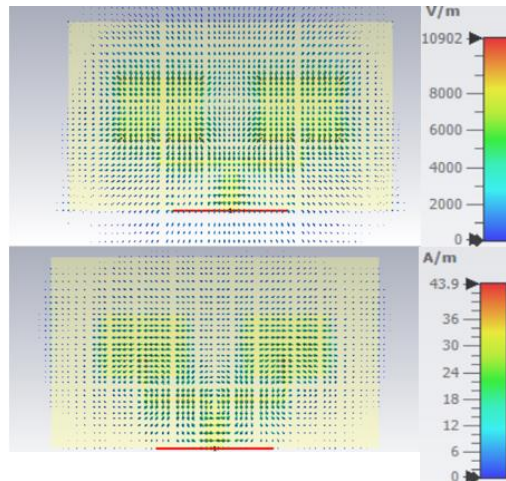


Figura 55. Planos E y H

Patrón de radiación unidimensional: La directividad obtenida en el array es de 9.1 dBi en la dirección de máxima radiación, el valor del ancho de haz disminuye ligeramente a 82.5° y el nivel de lóbulo principal a secundario aumenta siendo este valor de -15.4 dB.

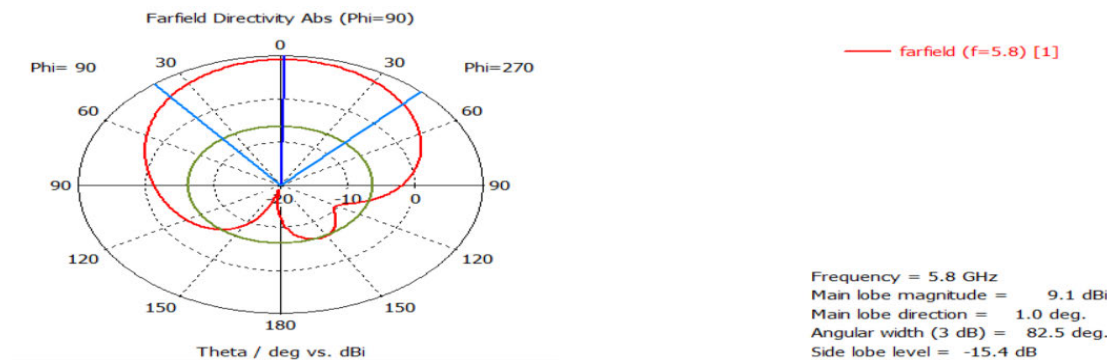


Figura 56. Patrón radiación 1D array 5.8GHz

Patrón de radiación tridimensional: A través de la representación se observa cómo pasa a ser más directivo el patrón de radiación. Respecto al parche individual a 5.8 GHz la directividad aumenta ligeramente, aunque para esta frecuencia se ha obtenido mayor directividad, a la frecuencia de 2.4 GHz se aprecia más el aumento de la directividad al pasar del parche individual al array.

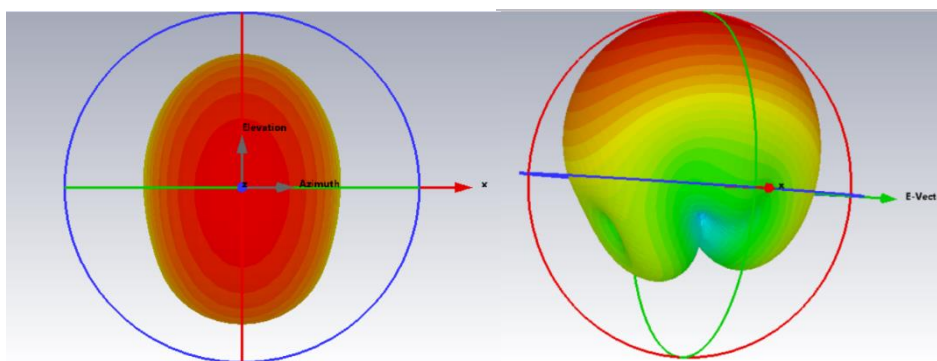


Figura 57. Patrón radiación 3D vista frontal y lateral

6.3 Diseño array 2x2

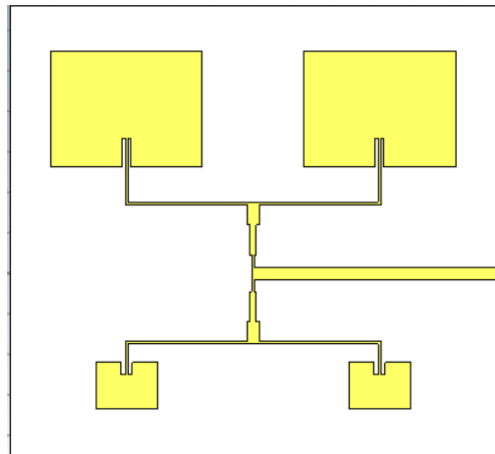


Figura 58. Estructura array 2x2

En la siguiente tabla se indican las medidas obtenidas con Matlab y los valores finales tras la optimización.

Parámetros	Valor Matlab (mm)	Valor optimizado (mm)
$W_{2.4\text{GHz}}$ (Ancho parche)	38.36	37.4
$L_{2.4\text{GHz}}$ (Largo parche)	29.75	28.5
$W_{5.8\text{GHz}}$ (Ancho parche)	15.87	15.25
$L_{5.8\text{GHz}}$ (Largo parche)	11.87	11.5
W_s (Ancho sustrato)	-	120
L_s (Largo sustrato)	-	112
$y_{0\ 2.4\ \text{GHz}}$ (Largo inset)	9.23	7
$y_{0\ 5.8\text{GHz}}$ (Largo inset)	3.66	3
$x_{0\ 2.4\ \text{GHz}}$ (Ancho inset)	-	0.7
$x_{0\ 5.8\text{GHz}}$ (Ancho inset)	-	1
W_f (Ancho línea 50Ω)	3.11	3.11
W_{70}(Ancho línea 70Ω)	1.65	1.6
W_{100}(Ancho línea 100Ω)	0.73	0.73
d (Separación entre parches en horizontal)	$0.7\ \lambda$	64
d (Separación entre parches en vertical)	$0.7\ \lambda$	70

Tabla 10. Medidas array 2x2

Respecto a la distancia entre los elementos del array, dado que las frecuencias son distintas, para 2.4 GHz el valor de la longitud de onda λ es de 0.125 m mientras que para 5.8GHz λ es 0.05 m, si se toma como referencia el valor de $0.7\ \lambda$ por una parte la distancia sería en torno a 87.5 mm y por otro lado de 35 mm. Optimizando los valores en CST el resultado de la separación entre los elementos es a nivel horizontal una distancia de 64 mm entre las antenas y en vertical una distancia de separación de 70 mm.

Parámetro S11: A continuación, se ilustra la gráfica obtenida del coeficiente de reflexión, donde se observa que a las dos frecuencias de trabajo el array funciona. Se obtiene a 2.4 GHz -16.36 dB teniendo un pico de -32.73 dB a la frecuencia de 2.374 GHz, a la frecuencia de 5.89 GHz se aprecia un valor de -33.09 dB. El ancho de banda que se obtiene a la frecuencia de 2.4 GHz es de 116 MHz un 4.83% de la frecuencia de trabajo, mientras que a 5.8 GHz el ancho de banda es de 370 MHz, es decir un 6.37%.

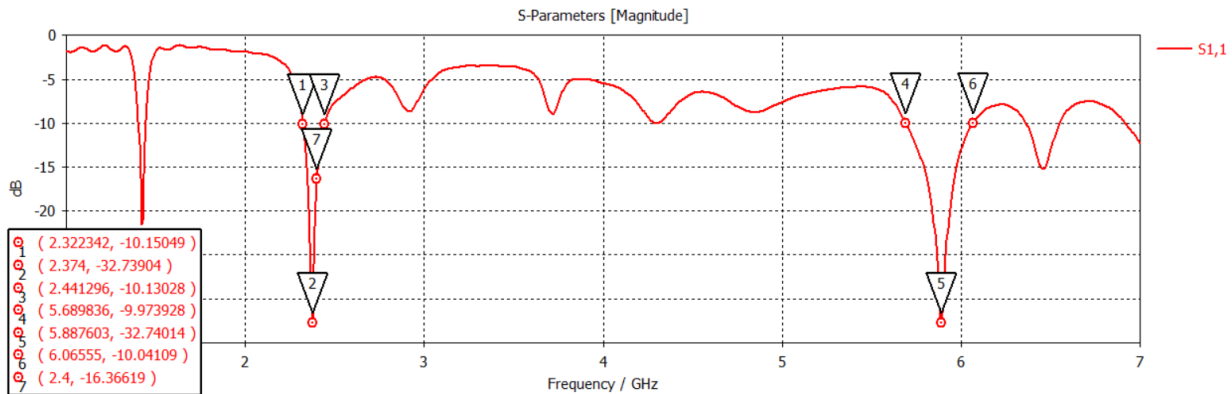


Figura 59. S11 array 2x2

A través de la representación del diagrama de Smith se observan las impedancias de las dos bandas con un valor de $37.37 + j4.2\Omega$ y $50 - j2.20\Omega$ a 2.4 y 5.8 GHz respectivamente. Los valores obtenidos con el array 2x2 son positivos, indican una buena adaptación.

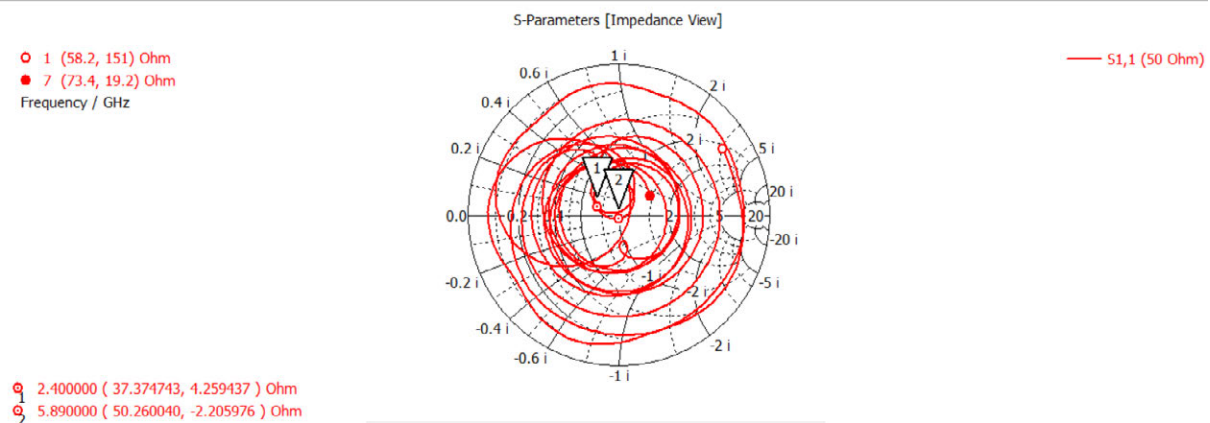


Figura 60. Carta Smith array 2x2

VSWR: El valor de relación de onda estacionaria cumple las especificaciones para las dos bandas. Con un valor inferior a 1.5 V lo que indica que la potencia suministrada a la antena apenas tiene reflexión.

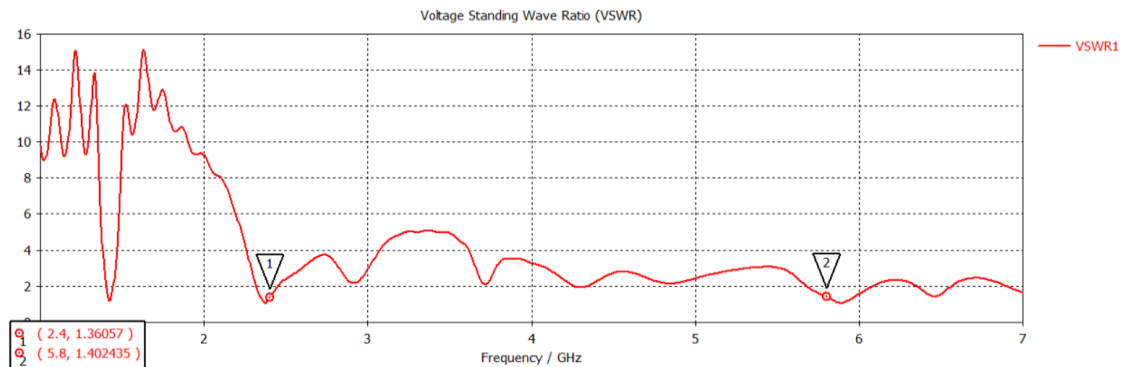


Figura 61. VSWR array 2x2

Distribución de energía:

A continuación, se ilustra la distribución de la energía por la superficie de la antena tanto en el plano E como en el H para las dos bandas de trabajo.

2.4 GHz

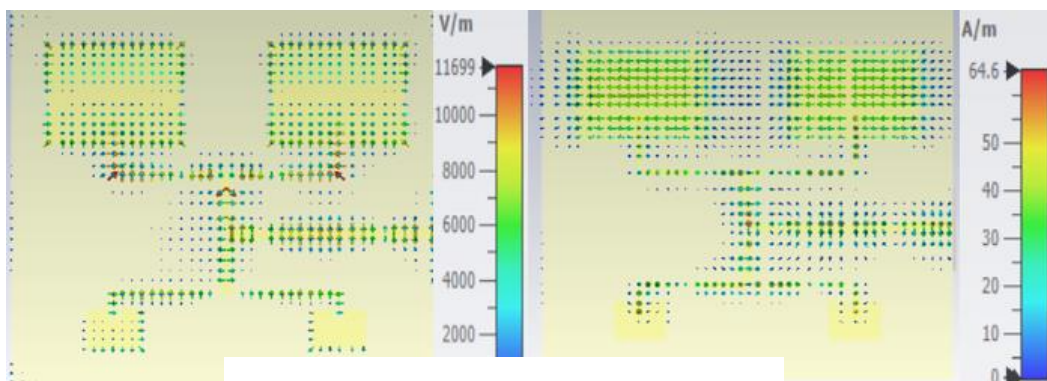


Figura 62. Plano E y H

5.8 GHz

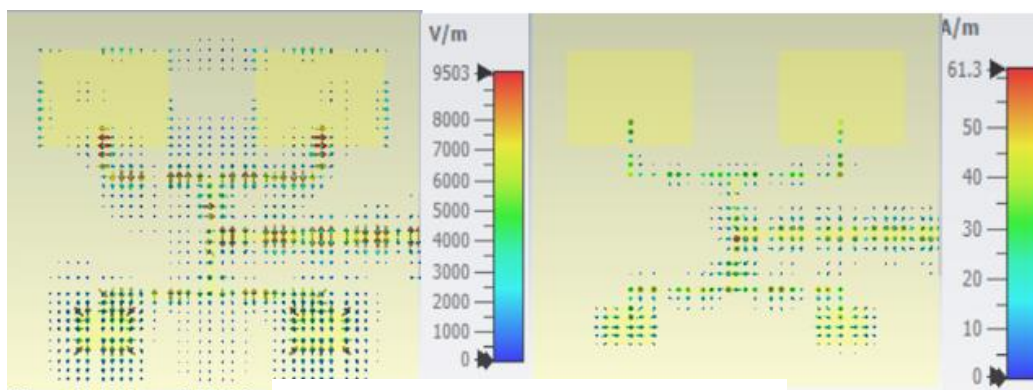


Figura 63. Plano E y H

Patrón de radiación unidimensional: A través del patrón de radiación se puede extraer la siguiente información, la directividad es de 8.65dBi para 2.4 GHz y 9.78dBi para 5.8GHz prácticamente se mantiene en el primer caso y aumenta en el segundo caso respecto a la configuración de array 1x2. Comparando los dos patrones de radiación se observa que a la frecuencia de 2.4 GHz el ancho de haz aumenta notablemente proporcionando una mayor cobertura mientras que para 5.8 GHz el ancho de haz disminuye, lo que quiere decir que la antena es más directiva concentrando su energía en la dirección de máxima radiación.

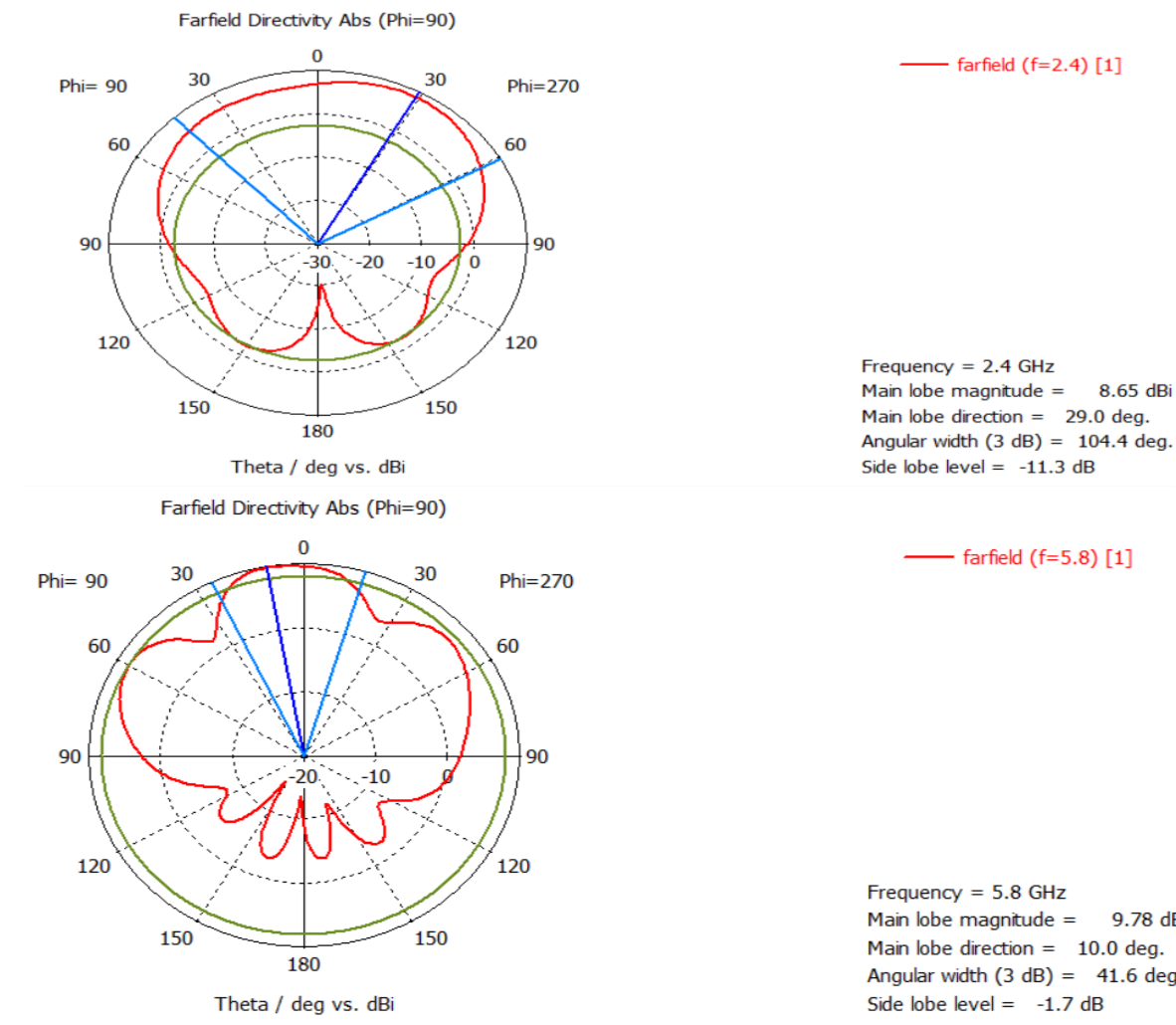


Figura 64. Patrón radiación 1D array 2x2

Patrón de radiación tridimensional: En las siguientes imágenes se representa el patrón de radiación en 3D a las dos frecuencias de trabajo, se puede observar cómo aparecen nuevos lóbulos secundarios, lo que indica que al aumentar el número de elementos del array aumenta el número de lóbulos secundarios.

Frecuencia 2.4 GHz

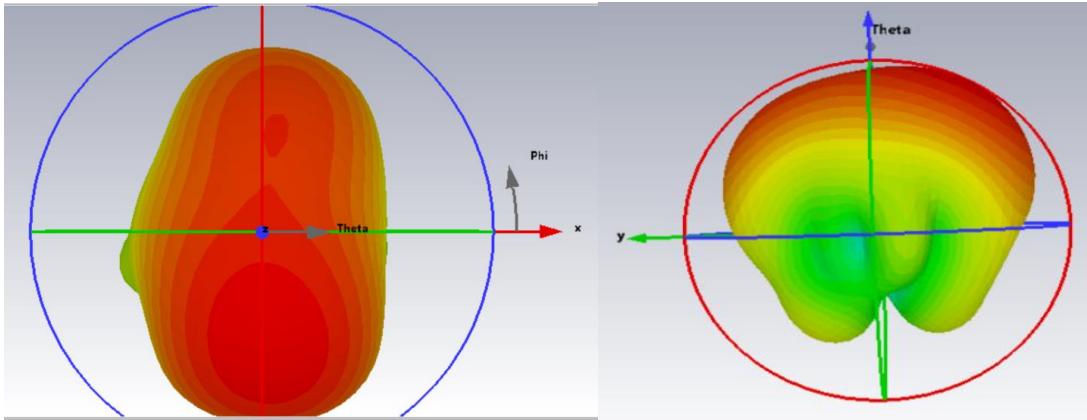


Figura 65. Patrón radiación 3D frontal y lateral array 2x2

Frecuencia 5.8 GHz

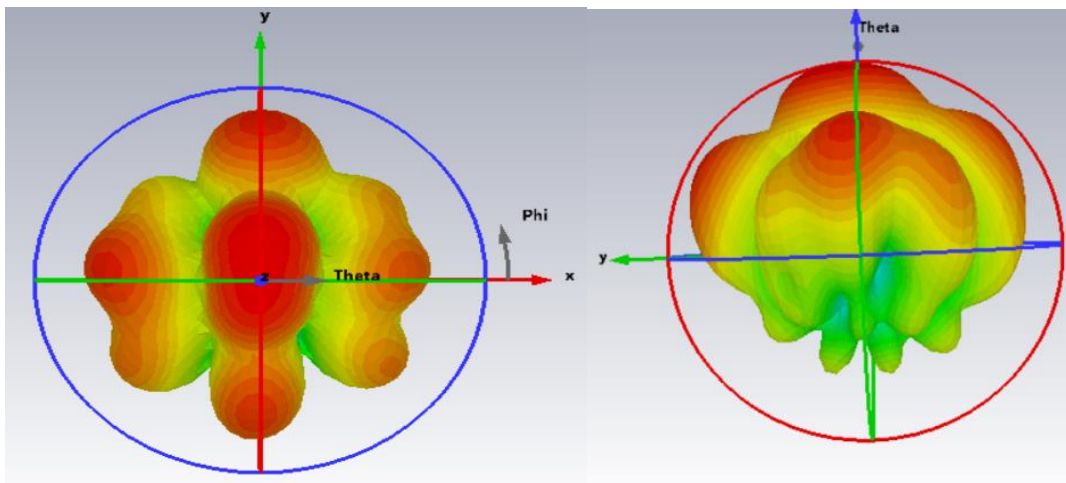


Figura 66. Patrón radiación 3D frontal y lateral array 2x2

Los resultados obtenidos en la simulación del array 2x2 son óptimos y cumplen con las especificaciones planteadas al inicio del proyecto, a lo largo del desarrollo se puede apreciar cómo con un array se consigue mejores prestaciones que con una antena individual.

Cabe destacar que al realizar el array 2x2 este no está formado por 4 antenas con una misma frecuencia, sino que se buscan unas dimensiones de compromiso para que el array pueda funcionar a dos frecuencias distintas sin perder apenas efectividad. Se aprecia en los resultados cómo las prestaciones a cada frecuencia con respecto al array 1x2 disminuyen ligeramente por el motivo mencionado.

7. Construcción del prototipo y medidas

Una vez realizada la simulación y obtenidos los valores optimizados del array final, en este capítulo se explicará el procedimiento de construcción del arreglo de antenas microstrip realizado en el laboratorio, además de los resultados obtenidos al realizar las medidas reales.

En primer lugar, se imprime el circuito sobre la placa PCB, para ello se exporta el diseño de CST a formato .DXF en 2D para poder realizar la impresión sobre un fotolito sobre el que se insolará la placa, el tiempo de insolación aproximado es de 150 segundos. A continuación, se quita la capa de cobre sobrante con un líquido revelador, y con una mezcla de agua oxigenada y ácido clorhídrico en partes iguales. Una vez eliminado el cobre sobrante se utiliza acetona y agua para terminar de eliminar los posibles restos.

El siguiente paso es soldar el conector SMA hembra a la placa, asegurando la correcta conexión entre el conector, la línea de alimentación microstrip y el plano de masa. En la siguiente imagen se puede observar el prototipo obtenido.

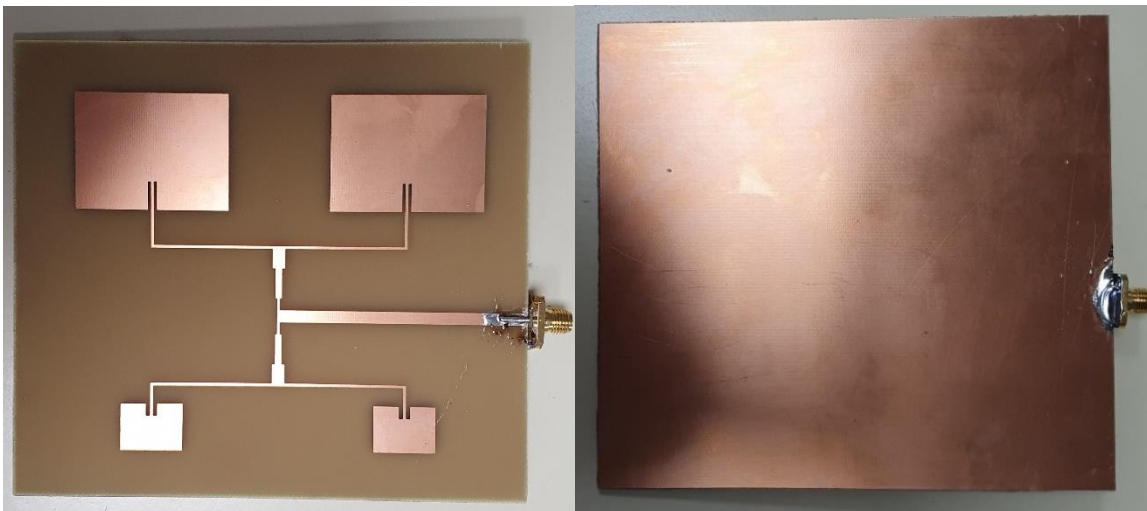


Figura 67. Diseño del prototipo vista frontal y trasera

Una vez realizado el array de antenas, se procede a hacer las medidas para comprobar el funcionamiento mediante el analizador de redes ZVRE de la marca Rohde&Schwarz disponible en el laboratorio. La única restricción es que dicho analizador solo funciona en un rango de frecuencias entre 9kHz a 4 GHz con lo que las medidas se realizarán exclusivamente para la frecuencia de 2.4GHz.

Antes de empezar a medir es importante calibrar el analizador para obtener los resultados más precisos a la frecuencia de trabajo, después se conecta a la antena a través de alguno de sus puertos, por ejemplo, el puerto 1 como se muestra en la siguiente imagen.

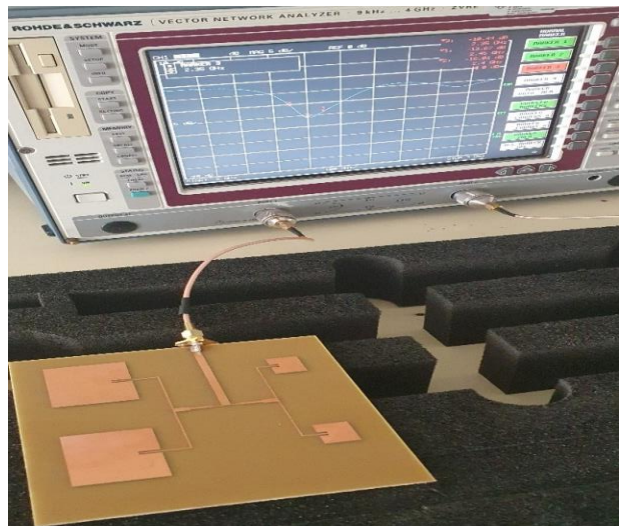


Figura 68. Conexión antena y analizador de redes

Una vez lista la conexión se mide el parámetro S11 para poder apreciar el coeficiente de reflexión en el puerto 1, obteniendo un pico a la frecuencia 2.4 GHz de -16.29 dB.



Figura 69. Coeficiente de reflexión S11

El resultado obtenido cumple la especificación planteada para el funcionamiento de la antena. En cuanto a la adaptación analizada a través de la carta de Smith se puede observar en la figura 70 cómo está bastante bien adaptado con un valor de 41Ω y una parte reactiva de $-j11.36 \Omega$.

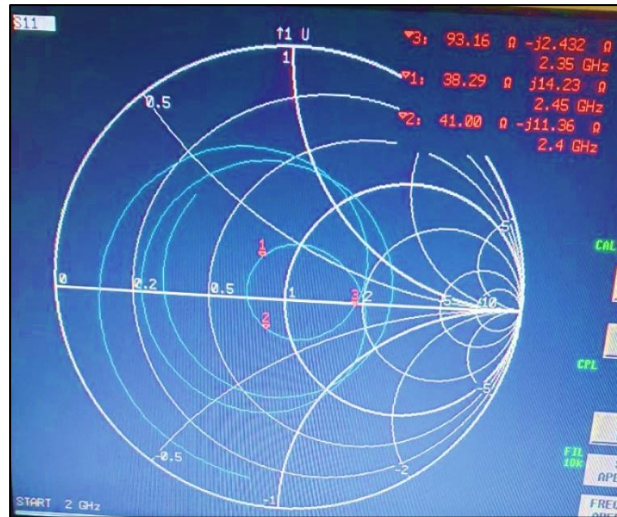


Figura 70. Carta de Smith

Al igual que en la simulación se extrae del analizador de redes el valor de VSWR como resultado a 2.4 GHz se observa un valor de 1.387 V.

Con los resultados obtenidos se corrobora el funcionamiento de la antena a la frecuencia de 2.4 GHz. No se pueden comprobar las medidas para la frecuencia de 5.8 GHz debido a la limitación de frecuencia de operación del analizador de redes que solo mide la señal hasta los 4 GHz.

Como última medida se duplica el array de antenas, creando un nuevo prototipo para obtener la ganancia en transmisión, parámetro S21, donde un array de antenas funciona como transmisor y el otro como receptor.

De manera teórica, la relación de la potencia recibida P_{RX} y la potencia transmitida P_{TX} se relacionan mediante el balance del enlace como se muestra en la ecuación 22 [1].

$$P_{RX} \text{ (dBm)} = P_{TX} \text{ (dBm)} + G_{ant1} \text{ (dBi)} - L_p \text{ (dB)} + G_{ant2} \text{ (dBi)}$$

Ecuación 22 . Balance de enlace

Siendo G_{ant1} y G_{ant2} la ganancia de la antena en recepción y transmisión respectivamente y L_p las pérdidas debidas a la propagación en el espacio libre.

$$L_p \text{ (dB)} = 32,45 + 20 \log(d \text{ (km)}) + 20 \log(f \text{ (MHz)})$$

Ecuación 23. Fórmula espacio libre

Al ser las antenas iguales, se supone que $G_{ant1} = G_{ant2} = G_{ant}$, la ganancia entonces se determina como:

$$G_{ant} = \frac{P_{RX} - P_{TX} + L_p}{2}$$

Ecuación 24. Ganancia de la antena

Para analizar esta medida se colocan las antenas en 5 orientaciones distintas a una distancia fija de 9 cm para visualizar el espectro con el analizador de redes.

Orientación 1



Figura 71. Antenas enfrentadas en vertical

Orientación 2

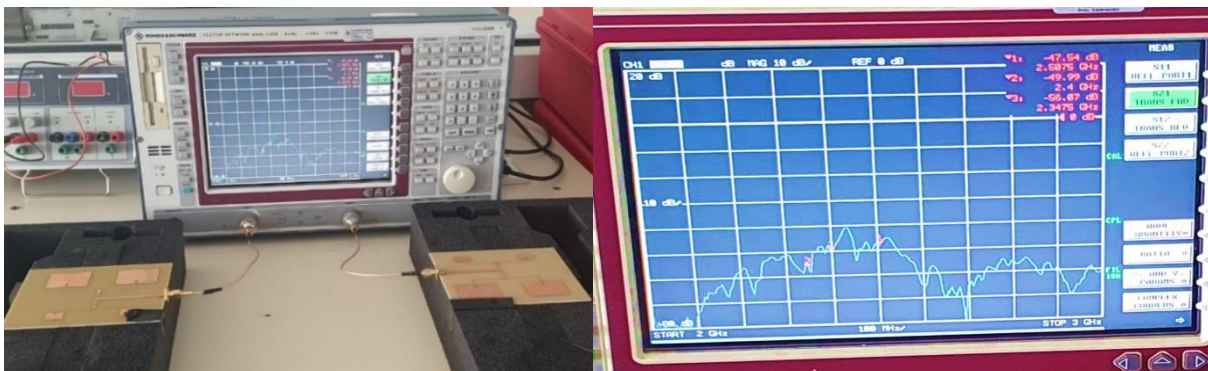


Figura 72. Antenas enfrentadas en horizontal

Orientación 3

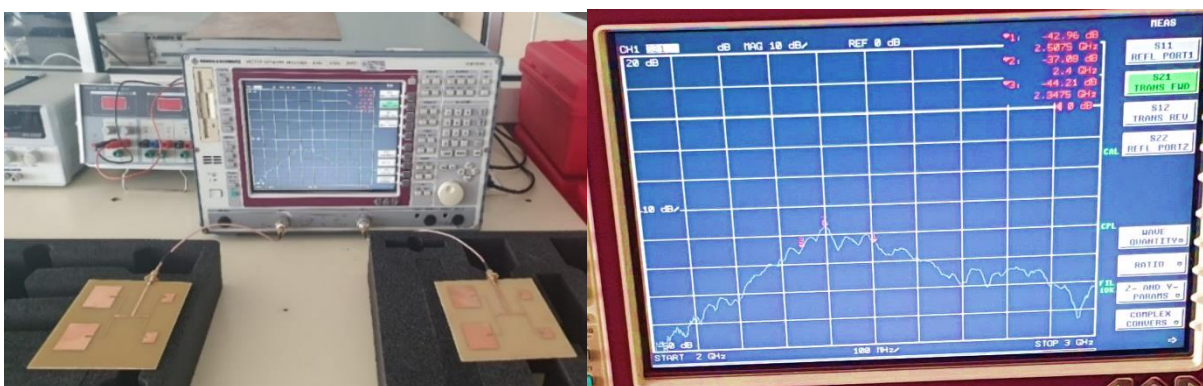


Figura 73. Antenas en horizontal colocadas en paralelo

Orientación 4



Figura 74. Antenas en vertical colocadas en paralelo

Orientación 5



Figura 75. Antenas opuestas

La posición más apropiada como se puede observar a través del espectro es la posición 1 con las antenas enfrentadas, ya que en las posiciones 2, 3 y 4 se observa la señal con ruido y grandes fluctuaciones, en la posición 5 se puede apreciar la radiación trasera generada. Se calcula la ganancia en la posición 1 con un valor de S21 a 2.4 GHz de -23.61 dB como:

$$G_{ant} = \frac{(-S_{21} - L_p)}{2}$$

Donde $S_{21} = P_{RX} - P_{TX}$

Ecuación 25. Ganancia en función de S21

Con lo que a la frecuencia de 2.4 GHz y a una distancia de 9 cm, se obtiene un valor de pérdidas por el espacio libre, $L_p = 19.13$ dB (ecuación 23), dando como resultado una ganancia $G_{ant} = 2.24$ dB.

8. Impacto del proyecto

En la sociedad actual es importante buscar un equilibrio entre el desarrollo tecnológico y la repercusión e impacto que puedan tener las futuras generaciones. En este capítulo se abordan algunas de las implicaciones sociales, de salud y seguridad, ambientales, económicas, tecnológicas o industriales y la posible aportación a alguno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS.

Implicaciones sociales

El array de antenas microstrip estudiado en este proyecto podría facilitar la conexión inalámbrica en distintas aplicaciones como pueden ser las comunicaciones móviles o las redes Wifi entre otras, lo cual contribuye con la necesidad de conectividad dada en la sociedad actual, además de poder facilitar la comunicación en lugares donde exista una brecha digital y así mejorar la calidad de vida en lugares rurales o de difícil acceso a la conexión.

Además de mejorar la conectividad este tipo de antenas se pueden utilizar en otros ámbitos como puede ser la seguridad con sistemas de vigilancia o en aplicaciones médicas de monitoreo.

Implicaciones de salud y seguridad:

Es importante realizar una antena que pueda ser eficiente y que a su vez cumpla con las normas establecidas por los organismos que controlan los límites seguros de exposición urbana como puede ser el comité CCARS (Comité Científico Asesor de Radiofrecuencias y Salud) o el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [19].

Implicaciones ambientales:

Con la antena diseñada para este proyecto se intenta que sea eficiente al incorporar un arreglo de antenas que sea capaz de trabajar en doble banda lo cual al funcionar a dos frecuencias se reduce el número de antenas a fabricar ya que con una sola se obtendría el mismo resultado que teniendo dos distintas, además de optimizar el uso del espectro de frecuencias.

Impacto visual: Diseño compacto de bajo perfil, una de las principales ventajas que tiene la antena propuesta es su reducido volumen y peso, con lo que no tiene apenas impacto a nivel visual.

Implicaciones económicas:

El diseño propuesto tiene un reducido coste de fabricación frente a otro tipo de antenas, requiere de pocos materiales que además tienen un reducido coste, teniendo en cuenta la variedad de aplicaciones y ámbitos en los que se puede utilizar es una gran ventaja. Como se comentó en el punto anterior, al funcionar en dos bandas de frecuencias la fabricación es más rentable al construir un solo array que varias antenas independientes.

Implicaciones tecnológicas:

Uno de los objetivos del presente trabajo es poder contribuir en el avance de las comunicaciones inalámbricas, pudiendo obtener una antena versátil y eficiente de bajo perfil. La implementación de tecnología avanzada implica un mayor crecimiento del sector de las telecomunicaciones.

Además, se puede contribuir con algunos de los objetivos ODS como pueden ser:

ODS 1 (Fin de la pobreza), ODS 3 (Salud y bienestar), ODS 4 (Educación de calidad) o el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) [20]. Facilitando el desarrollo de la comunicación se puede conseguir que áreas menos favorecidas puedan contar con conexión a internet, lo que puede favorecer la educación e incluso se puede generar empleo con trabajos en remoto. Por otra parte, se fomenta la innovación tecnológica.

Tras el COVID-19 la conectividad ha resultado indispensable en todos los ámbitos por ello conviene invertir en tecnología que sea capaz de facilitar la comunicación.

9. Conclusiones

A lo largo de este proyecto de fin de grado se ha realizado un estudio de las antenas, profundizando en las antenas de tipo microstrip para aprovechar las prestaciones y ventajas que ofrece esta tecnología. Se han establecido unas frecuencias y unas especificaciones con el objetivo de diseñar un prototipo que pueda ser operativo, el diseño elegido se compone de un array 2x2 de antenas de parche capaz de transmitir o recibir señal en dos bandas, 2.4 y 5.8 GHz.

Se ha podido comprobar cómo incrementar el número de antenas en el array mejora los resultados en cuanto a rendimiento y directividad, sin embargo, el diseño debe ser minucioso tanto con la distancia que separa los elementos para evitar el acoplamiento como el diseño de la red de alimentación para que el array sea óptimo y no se pierda energía.

El resultado final obtenido cumple en gran parte con los objetivos planteados, se ha conseguido un array de antenas operativo a nivel de simulación, y a nivel de prototipo solo se ha podido comprobar el funcionamiento a la frecuencia de 2.4 GHz debido a que el analizador de redes disponible en el laboratorio tiene una limitación de frecuencia de 4 GHz.

A grandes rasgos la antena construida proporciona una buena adaptación entre la antena y la alimentación, a través de la simulación del array se consigue aumentar considerablemente la directividad teniendo en cuenta que en una antena microstrip suele rondar los 5-7.5 dBi con el array diseñado se ha conseguido una directividad a 2.4 GHz, 8.65 dBi y a 5.8 GHz 9.78 dBi, se obtienen unos parámetros bastante aceptables teniendo en cuenta que el array es capaz de emitir o recibir señal a dos frecuencias distintas.

Los factores clave que se deben considerar en futuros trabajos son la elección del sustrato dieléctrico debido a que según la aplicación en la que se quiera utilizar la antena se debe elegir un sustrato con un determinado grosor o una constante dieléctrica adecuada. La separación entre elementos también influye en el diseño, se debe elegir una distancia de compromiso donde la antena pueda ser operativa sin que tenga interferencia. Como último factor clave se debe tener en cuenta el diseño de la red de alimentación del array, se debe adaptar correctamente para evitar pérdidas de energía o posibles reflexiones y que la antena pueda aprovechar toda la potencia suministrada.

10. Trabajos futuros

De cara a una nueva línea de investigación se podría realizar el estudio del array de antenas analizando la repercusión que tiene utilizar diferentes tipos de sustratos dada su importancia a la hora de realizar el diseño ya que de él depende la eficiencia que pueda tener la antena.

Además, se puede estudiar la antena con diferentes cortes o geometrías del parche para comprobar si las prestaciones de la antena mejoran, así como analizar la configuración con los distintos tipos de alimentación microstrip como la alimentación por coaxial o por acoplamiento electromagnético.

Debido a la limitación tenida en el presente proyecto con el analizador de redes, se debería utilizar otro analizador con un rango más amplio para poder comprobar el funcionamiento de la antena a la frecuencia de 5.8 GHz.

Dado que se ha podido comprobar que realizar el diseño añadiendo más elementos al array proporciona mejores prestaciones que una antena individual, se podría realizar un diseño en el que se incremente el número de elementos para ver si los resultados mejoran.

Teniendo en cuenta el impacto ambiental y la eficiencia energética mencionado en el apartado 8, se debe tener en cuenta el uso de la energía para reducir el consumo de los sistemas, además de utilizar materiales sostenibles, para disminuir de alguna manera el impacto ambiental.

11. Referencias

- [1] A. Cardama, "Antenas", Editorial: [Nombre de la editorial], Barcelona, España, 2002.
- [2] C. Balanis, "Antenna theory: analysis and design ", 3rd Edition. John Wiley & Sons., 2005.
- [3] J. M Huidobro, "Antenas de telecomunicaciones", *Revista Digital de ACTA*, 2013
- [4] K. Goyo, "Evolución de las antenas", [Online]. Available: [Evolución de las antenas: De sus orígenes a la era digital \(ingenieria.es\)](#) [Último acceso abril 2024]
- [5] UTI, "Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones", 2015. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-!!!PDF-S.pdf [Último acceso abril 2024]
- [5] G. A. Deschamps, "Microstrip microwave antennas," *Third USAF Symposium on Antennas on USAF Antenna Research and Development Program*, October 18–22, 1953.
- [6] D. M. Pozar and D. H. Schaubert, "Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays," IEEE. Press New York, 1995.
- [7] MINECO, "Atribución a los servicios según el RR de la UIT", [Online]. Available: https://avancedigital.mineco.gob.es/espectro/cnaf/tablas_2017.pdf [Último acceso mayo 2024]
- [8] Jaume Anguera, A.P. *Teoría de Antenas*, 2008. [Online]. Available: http://www.salleurl.edu/semipresencial/ebooks/ebooks/ebook_teoría_antenas.pdf [Último acceso junio 2024]
- [9] CST Studio Suite, [Online]. Available: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite> [Último acceso julio 2024]
- [10] J. A. Zárate, "Sistemas de comunicación ISM", *Universitat Oberta de Catalunya*, 2017., [Online]. Available: https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/141046/21/PLA4_Sistemas%20de%20comunicaci%C3%B3n%20en%20la%20banda%20ISM.pdf
- [11] Colegio Oficial de ingenieros de telecomunicación, "Uso de las Bandas Libres de 5470-5725 MHz y 5725-5875 MHz en España". Julio 2012. Online]. Available: https://www.coit.es/sites/default/files/informes/pdf/uso_de_las_bandas_libres_de_5470-5725_mhz_y_5725-5875_mhz_en_espana.pdf [Último acceso junio 2024]
- [12] R.Garg, P.Bartia, I.Bahl and A.Ittipiboon, "Microstrip Antenna Design Handbook", Artech House, EEUU, Nordwood, 2001.
- [13] S. Hernando, "Líneas de transmisión y parámetros S aplicados a la metrología", 2014.
- [14] X. YU, "Diseño de antenas de tipo parche para un transceptor WiMAX basado en el chip MAX2838", Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2014.

[15] Matlab [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/help/rfpcb/ug/design-quarter-wave-transformer-for-impedance-matching-applications.html>[Último acceso julio 2024]

[19] National Geographic, [Online]. Available
:https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/como-se-controla-peligrosidad-radiacion-5g_16008 [Último acceso julio 2024]

[20] Naciones Unidad, “Objetivos Desarrollo Sostenible” [Online]. Available
:<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>[Último acceso julio 2024]

Anexo

Anexo A. Script de Matlab

A continuación, se muestra el script de Matlab utilizado para obtener las dimensiones de la antena de manera iterativa.

```

%% Definición de variables
f = input('Introduzca la frecuencia de trabajo (Ghz): '); % Frecuencia a la que se van
a a realizar los cálculos
er = 4.3; % Constante dieléctrica FR-4
h = 1.6; % Altura del sustrato
c = physconst('LightSpeed'); % Velocidad de la luz%
f = f*1e9; % Conversión de frecuencia a Ghz
h = h*1e-3; % Conversión de altura de sustrato en mm
lambda = c/f; % Longitud de onda en el vacío
ko = 2*pi/lambda; % Número de onda

%% Cálculos del Parche
W = (c/(2*f))*sqrt(2/(er+1)); % Ancho del Parche (Width)
erff = ((er+1)/2) + ((er-1)/2)*(1+12*h/W)^(-1/2); % Coeficiente del dieléctrico
efectiva
Leff = c/(2*f*sqrt(erff)); % Longitud efectiva
A1 = ((0.412*h*(erff+0.3)*((W/h)+0.264))/((erff-0.258)*((W/h)+0.8))); % Incremento de
Longitud normalizada
L = Leff - 2*A1; % Longitud del parche
a = 0.7*lambda; % Separación entre parches

%% Cálculos de línea de alimentación
lambdaguided = lambda/sqrt(erff); % Longitud de onda en medio guiado
Lfeed = lambdaguided/4; % Longitud lambda cuartos

%%Cálculo de la anchura de la línea
for Zo = [50, 70.71, 100]
A = (Zo/60)*(sqrt((er+1)/2))+((er-1)/(er+1))*(0.23+(0.11/er));
B = (377*pi)/(2*Zo*sqrt(er));
Coef = (8*exp(A))/((exp(2*A))-2);
if (Coef <= 2)
    Wline = Coef*h; % Anchura si W/h <= 2
elseif(Coef > 2)
    Coef = (2/pi)*( B-1-log(2*B-1)+((er-1)/(2*er))*(log(B-1)+0.39-(0.61/er)));
    Wline = Coef*h; % Anchura si W/h > 2
end
disp(['Ancho de pista a ', num2str(Zo), ': ', num2str(Wline*(1e3)), ' mm']);
end

%% Cálculos para la longitud del inset
I1 = @(theta) (sin((ko*W/2)*cos(theta))./cos(theta)).^2.*sin(theta).^3;
G1 = integral(I1,0,pi)/(120*pi^2); % Admitancia de la línea de transmisión
I2 = @(theta)
((sin((ko*W/2)*cos(theta))./cos(theta)).^2).*besselj(0,ko*L*sin(theta)).*sin(theta).^3;
G12 = (1/(120*pi^2)).*integral(I2,0,pi); % Admitancia mutua
Rin = 1./(2*(G1+G12)); % Impedancia de entrada
yo = (L/pi).*acos(sqrt(Zo/Rin)); % Longitud del inset

%% Resultados de las medidas

```

```
disp(['Ancho parche ', num2str(W*1e3)]);  
disp(['Largo parche ', num2str(L*1e3)]);  
disp(['Longitud inset ', num2str(yo*1e3)]);  
disp(['La distancia entre parches es : ', num2str(a*1e3), ' mm']);
```

Anexo B. Presupuesto

En este apartado se indican los costes que han sido necesarios para la realización del presente proyecto. Se han tenido en cuenta los materiales utilizados, el tiempo dedicado y los medios empleados como se refleja en las siguientes tablas.

Materiales	Precio / unidad
Placa PCB FR-4 x2	14.95€
Conector SMA hembra x2	10.50€
TOTAL	50.90€

Mano de obra	Precio/h
Ingeniero Junior dedicación de 350h	12.82€
TOTAL	4487€

Medios	Precio
Software CST, licencia 4 meses	2000€
Matlab licencia 4 meses	500€
Analizador de redes	8525€
Ordenador HP Intel core i7	750€
TOTAL	11775€

Importe TOTAL	16312.90€
----------------------	------------------

Para la realización del proyecto los medios han sido proporcionados por la Universidad Politécnica de Madrid.