



Analysis and Design of a Microstrip Patch Antenna Array

María Vicente Jaramillo

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación UOC-URL
Tecnologías de antenas

Dr. Jaume Anguera and Dr. Aurora Andújar

Fecha Entrega: 17/01/2018



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>Analysis and Design of a Microstrip Patch Antenna Array</i>
Nombre del autor:	<i>María Vicente Jaramillo</i>
Nombre de los consultores:	<i>Jaume Anguera Pros y Aurora Andújar Linares</i>
Nombre del PRA:	<i>Germán Cobo Rodríguez</i>
Fecha de entrega (mm/aaaa):	01/2018
Titulación:	<i>Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación UOC-URL</i>
Área del Trabajo Final:	<i>Tecnologías de antenas</i>
Idioma del trabajo:	<i>Castellano</i>
Palabras clave	<i>Microstrip, array, simulación, diagrama de radiación</i>
<p>Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras): <i>Con la finalidad, contexto de aplicación, metodología, resultados y conclusiones del trabajo.</i></p>	
<p>Este documento presenta un método para simulación de antenas de parche y agrupaciones de las mismas. En primer lugar, se realiza un estudio teórico de este tipo de antenas para determinar las características principales que determinarán el diseño, como el espesor del parche y la posición de la sonda de alimentación. Además, se han analizado las características principales de arrays de antenas para poder analizar los resultados obtenidos correctamente, en este caso, el parámetro principal es la separación entre parches.</p> <p>El primer caso de estudio ha sido el de un parche unitario, analizando el comportamiento del mismo para distintas posiciones de la sonda de alimentación y seleccionando finalmente la posición óptima. Este elemento se ha utilizado para los arrays posteriores.</p> <p>Se ha continuado estudiando el caso de un array de 4 elementos dispuestos de forma lineal. Para este tipo de array se han estudiado 4 casos distintos, teniendo en cuenta distintas separaciones entre parches. El caso óptimo resultante ha sido separar los elementos 100 mm. Se ha repetido el caso aumentando el número de elementos de 4 a 6, separados la distancia óptima. Se ha obtenido una mejor directividad al aumentar el número de elementos.</p> <p>Finalmente, se han analizado dos casos de arrays bidimensionales, 2x2 y 3x2. Se ha obtenido la misma directividad aproximada que en los casos anteriores, pero, sin embargo, se obtiene un mejor comportamiento el diagrama de radiación en el plano YZ, obteniéndose un lóbulo principal mucho más directivo.</p>	

Abstract (in English, 250 words or less):

This document shows a method for simulating patch antennas and arrays of them. First, a theoretical study of these types of antennas is conducted to determine the main features that will determine the design, such as the thickness of the patch and the position of the feeding column.

In addition, the main characteristics of antenna arrays have been analyzed to be able to evaluate the results obtained correctly, in this case, the main parameter is the separation between patches.

The first case of study was a single patch, analysing the behaviour of the patch for different feeding column positions and finally selecting the optimal position. This item has been used for the subsequent arrays.

The case of an array of 4 elements arranged in one dimension has been further studied. Four different cases have been studied for this type of array, taking different separations between patches in consideration.

The optimal result has been to separate the elements 100 mm. The case has been repeated by increasing the number of elements from 4 to 6, separated by the optimal distance. Improved directivity has been achieved by increasing the number of elements.

Finally, two cases of two-dimensional arrays have been analyzed, 2x2 and 3x2. The same approximate directivity has been obtained as in the previous cases, but, however, it is obtained a better behavior of the radiation diagram in the YZ plane, obtaining a main lobe much more directional.

Índice

1. Introducción	1
1.1 Contexto y justificación del Trabajo	1
1.2 Objetivos del Trabajo	1
1.3 Enfoque y método seguido	1
1.4 Planificación del Trabajo	1
1.5 Breve resumen de productos obtenidos	1
1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria	2
2. Revisión de bibliografía científica	3
2.1 Introducción	3
2.2 Antenas de parche microstrip	3
2.3 Conceptos importantes	9
2.3.1 Coeficiente de reflexión S11	9
2.3.2 Directividad	10
2.3.3 Ganancia	10
2.4 Agrupación de antenas	10
2.5 Conclusiones	11
3. Simulación elemento de array	12
3.1 Introducción	12
3.2 Generación estructura 2D	13
3.3 Generación estructura 3D	14
3.4 Ejecución fichero wrapper.m	23
3.5 Solución MoM	23
3.6 Conclusiones	28
4. Análisis de un array con configuración 1D	29
4.1 Introducción	29
4.2 Optimización de la distancia para un array 4x1	29
4.2.1 Introducción	29
4.2.2 Caso $d = 75$ mm	31
4.2.3 Caso $d = 100$ mm	33
4.2.4 Caso $d = 110$ mm	36
4.2.5 Caso $d = 130$ mm	38
4.3 Resultados obtenidos para array 6x1 y distancia óptima	42
4.4 Conclusiones	45
5. Análisis de un array con configuración 2D	46
5.1 Introducción	46
5.2 Estudio de array 2x2	46
5.3 Estudio de array 3x2	49
5.4 Conclusiones	54
6. Conclusiones	56
7. Bibliografía	57
8. Anexos	59
8.1 Código de direct0.m	59
8.2 Código de direct90.m	61

Lista de figuras

Figura 1. Estructura de antena de parche microstrip.....	4
Figura 2. Materiales conductores típicos en la fabricación del parche	4
Figura 3. Materiales dieléctricos típicos para el sustrato.....	4
Figura 4. Tipos de alimentación.....	6
Figura 5. Diagrama de radiación 3-D	7
Figura 6. Dependencia tamaño parche y permitividad relativa	8
Figura 7. Tamaño del parche.....	8
Figura 8. Eficiencia del parche	9
Figura 9. Equilibrio entre parámetros	9
Figura 10. Web para descargar código.	12
Figura 11. Ventana para definir parche 2D	13
Figura 12. Estructura del parche 2D.....	14
Figura 13. Parche 2D definitivo	14
Figura 14. Ventana para definir estructura 3D del parche.....	15
Figura 15. Eliminación de los tetraedros del dieléctrico para definir la sonda...16	
Figura 16. Caras de metal del fondo	17
Figura 17. Ventana selección caras metálicas en dieléctrico.....	17
Figura 18. Selección de polígono	17
Figura 19. Resultado tras pulsar "Close polygon"	18
Figura 20. Ventana para seleccionar aristas de la sonda de alimentación	19
Figura 21. Ventana para seleccionar caras metálicas de la parte superior	19
Figura 22. Selección de polígono	19
Figura 23. Confirmación eliminación tetraedros	20
Figura 24. Selección de distintas vistas 3D	20
Figura 25. Capa de dieléctrico (caras exteriores)	20
Figura 26. Tetraedros de la capa de dieléctrico vista 2D	21
Figura 27. Tetraedros de la capa de dieléctrico vista 3D	21
Figura 28. Caras metálicas vista en 2D	22
Figura 29. Caras metálicas vista en 3D	22
Figura 30. Posición sonda de alimentación	22
Figura 31. Capas metálicas y de dieléctrico	22
Figura 32. Gráfica de impedancia.....	24
Figura 33. Coeficiente de reflexión.....	24
Figura 34. Diagrama de radiación plano XZ ($\phi=0^\circ$)	25
Figura 35. Diagrama de radiación plano YZ ($\phi=90^\circ$)	25
Figura 36. Diagrama de radiación 3D.....	26
Figura 37. Ventana para seleccionar gráfica a mostrar.....	26
Figura 38. Campo magnético 3D.....	27
Figura 39. Campo magnético 2D.....	27
Figura 40. Campo eléctrico 3D. Se observa como el campo eléctrico es máximo en las ranuras radiantes.....	27
Figura 41. Ventana para definir array 1D	30
Figura 42. Ventana para definir estructura 2D caso array 4x1 d=75 mm	31
Figura 43. Estructura 2D array 4x1 d=75 mm. El plano de masa es de 310 x 65 mm. El sustrato dieléctrico es de 1.52 mm y tiene la misma dimensión que el plano de masa. Los parches están sobre el sustrato dieléctrico.	31

Figura 44. Diagrama de radiación plano XZ caso $d=75$ mm	32
Figura 45. Diagrama de radiación plano YZ caso $d=75$ mm	33
Figura 46. Diagrama de radiación 3D caso $d=75$ mm	33
Figura 47. Ventana para generar estructura en 2D caso $d=100$ mm.....	34
Figura 48. Estructura 2D array 4x1 $d=100$ mm. El plano de masa es de 385 x 65 mm. El sustrato dieléctrico es de 1.52 mm y tiene la misma dimensión que el plano de masa. Los parches están sobre el sustrato dieléctrico.	34
Figura 49. Diagrama de radiación plano XZ caso $d=100$ mm	35
Figura 50. Diagrama de radiación plano YZ caso $d=100$ mm	35
Figura 51. Diagrama de radiación 3D caso $d=100$ mm	36
Figura 52. Ventana para generar estructura en 2D caso $d=110$ mm.....	36
Figura 53. Estructura 2D array 4x1 $d=110$ mm. El plano de masa es de 430 x 65 mm. El sustrato dieléctrico es de 1.52 mm y tiene la misma dimensión que el plano de masa. Los parches están sobre el sustrato dieléctrico	37
Figura 54. Diagrama de radiación plano XZ caso $d=110$ mm	37
Figura 55. Diagrama de radiación plano YZ caso $d=110$ mm	38
Figura 56. Diagrama de radiación 3D caso $d=110$ mm	38
Figura 57. Ventana para generar estructura en 2D caso $d=130$ mm.....	39
Figura 58. Estructura 2D array 4x1 $d=130$ mm. El plano de masa es de 490 x 65 mm. El sustrato dieléctrico es de 1.52 mm y tiene la misma dimensión que el plano de masa. Los parches están sobre el sustrato dieléctrico	39
Figura 59. Diagrama de radiación plano XZ caso $d=130$ mm	40
Figura 60. Diagrama de radiación plano YZ caso $d=130$ mm	40
Figura 61. Diagrama de radiación 3D caso $d=130$ mm	41
Figura 62. Ventana para generar estructura en 2D array 6x1 $d=100$ mm	42
Figura 63. Estructura 2D array 6x1 $d=100$ mm. El plano de masa es de 600 x 65 mm. El sustrato dieléctrico es de 1.52 mm y tiene la misma dimensión que el plano de masa. Los parches están sobre el sustrato dieléctrico	42
Figura 64. Diagrama de radiación array 6x1 plano XZ $d=100$ mm	43
Figura 65. Diagrama de radiación array 6x1 plano YZ $d=100$ mm	44
Figura 66. Diagrama de radiación array 6x1 3D $d=100$ mm	44
Figura 67. Ventana para definir array 2x2 $d=100$ mm	47
Figura 68. Resultado array 2x2 $d=100$ mm	47
Figura 69. Diagrama de radiación array 2x2 plano XZ $d=100$ mm	48
Figura 70. Diagrama de radiación array 2x2 plano YZ $d=100$ mm	48
Figura 71. Diagrama de radiación 3D array 2x2 $d=100$ mm	49
Figura 72. Ventana para definir array 3x2 $d=100$ mm	50
Figura 73. Resultado array 3x2 $d=100$ mm	50
Figura 74. Resultado array 3x2 en 3D $d=100$ mm. El plano de masa es de 280 x 180 mm. El sustrato dieléctrico es de 1.52 mm y tiene la misma dimensión que el plano de masa. Los parches microstrip están impresos sobre el sustrato dieléctrico.....	51
Figura 75. Diagrama de radiación array 3x2 plano XZ $d=100$ mm	51
Figura 76. Diagrama de radiación array 3x2 plano YZ $d=100$ mm	52
Figura 77. Diagrama de radiación 3D array 3x2 $d=100$ mm	52
Figura 78. Ventana para seleccionar campo cercano	53
Figura 79. Resultado campo eléctrico array 3x2 $d=100$ mm	53
Figura 80. Resultado campo eléctrico array 3x2 $d=100$ mm	54

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

Este proyecto surge de la necesidad de disponer de un software que permita realizar simulaciones de distintas configuraciones de antenas de parche.

Es muy útil disponer de este tipo de software en código abierto y utilizando Matlab para adaptarlo completamente a las necesidades del diseñador y del problema de estudio.

Se desea disponer de un método para realizar distintas simulaciones que permita estudiar el comportamiento de un array de antenas y que ayude a elegir las mejores características de diseño.

1.2 Objetivos del Trabajo

Los objetivos del trabajo son los siguientes:

- Entender el funcionamiento completo del programa para adaptar las funcionalidades a las necesidades de diseño.
- Simular distintas configuraciones de array para estudiar efecto de espaciado entre parches.
- Analizar tanto configuraciones en una dimensión como configuraciones bidimensionales y estudiar la diferencia entre ambas.

1.3 Enfoque y método seguido

Se ha adaptado el código de Matlab alojado en la web para conseguir realizar los diseños de los distintos casos de estudio deseados.

Entre los distintos casos de estudio se han realizado simulaciones y se han ido tomando decisiones para optimizar el diseño y los resultados obtenidos.

1.4 Planificación del Trabajo

La única necesidad en cuanto a recursos para realizar el trabajo es disponer de un ordenador con Matlab instalado. para realizar el trabajo son: ordenador con Matlab R2008 instalado, además de conexión a Internet para acceder a la web y descargar el código.

1.5 Breve sumario de productos obtenidos

En el Capítulo 2 se obtiene un repaso de la teoría necesaria para el proyecto.

En el Capítulo 3 se consigue un parche para utilizarlo durante todo el trabajo.

En el Capítulo 4 se obtiene un estudio del espaciado entre parches para elegir el espaciado óptimo que maximiza la directividad.

Finalmente, en el Capítulo 5 se consigue estudiar el comportamiento de arrays bidimensionales.

1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

En el Capítulo 2 se realiza un breve repaso de la teoría de antenas en general, haciendo especial hincapié en parámetros de antenas que servirán para el diseño posterior utilizando el software. Además, se estudia en concreto el tipo de antena de parche para poder tener en cuenta las características más relevantes. Finalmente se han analizado las características de las agrupaciones de antenas.

Posteriormente, en el Capítulo 3 se ha utilizado el software para diseñar el elemento de antena de parche que se utilizará en los capítulos posteriores. Se ha determinado tanto el espesor del mismo como la posición de la sonda de alimentación teniendo en cuenta el valor que toma la gráfica de impedancia.

A continuación, en el Capítulo 4, se ha estudiado el efecto del espaciado entre los distintos parches, separando los parches a distintos valores para elegir el mejor caso de espaciado. En un primer lugar se han utilizado arrays 4x1, para una vez definida la distancia óptima realizar la misma simulación con un array 6x1.

Para concluir el trabajo, en el Capítulo 5 se estudian distintas configuraciones de arrays bidimensionales para poder analizar el comportamiento de repetir la estructura en los dos ejes, tanto en el x como en el y.

2. Revisión de bibliografía científica

2.1 Introducción

A lo largo de este capítulo se realizará una introducción a las antenas microstrip.

Además, se analizará brevemente la teoría de agrupación de antenas para que, en capítulos posteriores, cuando se trabaje con arrays de antenas, se dispongan de los conocimientos necesarios para su estudio.

2.2 Antenas de parche microstrip

El funcionamiento básico de una antena consiste en una aceleración/desaceleración de la carga eléctrica que implica una variación en el tiempo de la corriente eléctrica. Esta variación produce una radiación electromagnética. Se realiza de esta forma la transmisión de señales inalámbricas.

El tamaño de la antena depende inversamente de la banda de frecuencia de funcionamiento. Por ejemplo, una antena que opera en baja frecuencia puede tener una longitud de varios metros (por ejemplo, las antenas transmisoras de radio) mientras que una antena que trabaja en banda de frecuencia mucho más alta puede tener varios centímetros de longitud solamente (por ejemplo, antena de un teléfono móvil). Sin embargo, hay otros factores que influyen en el tamaño de la antena, como pueden ser el material utilizado para el sustrato y su espesor.

Las antenas de parche microstrip surgen de la necesidad de incorporar antenas en dispositivos inalámbricos que son cada vez más pequeños, como terminales telefónicos u ordenadores portátiles. El tamaño de las antenas se ha tenido que adaptar al reducido tamaño de estos dispositivos, surgiendo así la tecnología de parche microstrip que permite tener antenas de varios milímetros posibilitando un tamaño reducido del dispositivo.

La estructura de este tipo de antenas puede observarse en la Figura 1.

Este tipo de antenas está formado por 4 elementos principales:

- Parche conductor.
- El plano de tierra.
- Dieléctrico.
- Línea de alimentación.

Tanto el parche conductor como el plano de tierra se fabrican con el mismo material.

La anchura (W) y la longitud del parche (L), así como el espesor (h) juegan un papel muy importante a la hora de determinar la frecuencia de resonancia.

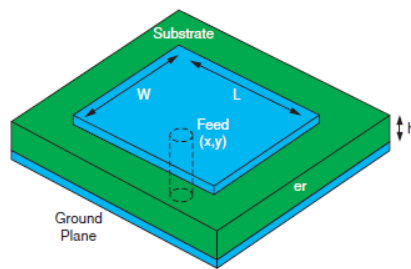


Figura 1. Estructura de antena de parche microstrip

El material elegido para el parche afecta a la eficiencia de la antena, mientras que el material elegido para el dieléctrico afecta a las dimensiones de a antena.

En la siguiente figura se pueden observar los materiales típicos para la fabricación el parche:

Table 1. Conductive material used in the fabrication of patch antennas.		
Material	Conductivity (σ S/m)	Relative permittivity (ϵ_r)
Aluminum	3.5×10^7	1
Brass	2.6×10^7	1
Copper	5.8×10^7	1
Gold	4.8×10^7	1

Figura 2. Materiales conductores típicos en la fabricación del parche

En la siguiente figura se pueden observar los materiales típicos en la fabricación del dieléctrico:

Table 2. Dielectric material used as the substrate of patch antennas.		
Material	Relative permittivity ^a (ϵ_r)	Loss tangent ^a ($\tan \delta$)
Alumina	~9 – 10	0.0003
FR-4	~4.5	0.025
Silicon	~11.9	0.004
Teflon	~2.1	0.0004

*Relative permittivity and loss tangent are frequency dependant; values in Table 2 are nominal.

Figura 3. Materiales dieléctricos típicos para el sustrato

La fabricación del parche se realiza colocando el parche conductor sobre el sustrato dieléctrico, por encima de un plano de tierra conductor, como se puede observar en la Figura 1. La excitación del parche se realiza a través de la sonda de alimentación. Esta sonda proporcionará al parche la señal eléctrica que se convertirá en una onda electromagnética para transmitirse inalámbricamente.

La facilidad de diseño y fabricación consiguen que el coste de la antena sea muy bajo. Además, su facilidad de integración con estructuras planas unido a lo anteriormente citado ha fomentado su popularidad.

El mecanismo de radiación de una antena de parche es el siguiente:

- 1º. La sonda excita al parche, entonces aparece una distribución de carga positiva en un momento determinado en el fondo del parche y una distribución de carga negativa en el plano de tierra.
- 2º. Las fuerzas de atracción entre estas cargas negativas y positivas harán que se unan la mayoría en la superficie inferior del parche y superior del plano de tierra.
- 3º. En la superficie del parche, las cargas del mismo signo generan una fuerza repulsiva que tienden a empujar alguna de las cargas hacia los bordes. Estas cargas generan radiación en los extremos.

Las ventajas de las antenas de parche son las siguientes:

- Bajo coste de fabricación y baja complejidad.
- Se pueden adaptar en una superficie curva, como puede ser la superficie de un coche.
- Resistencia a choques y vibraciones.
- Posibilidad de generar polarización circular y lineal, basándose en las posiciones de la alimentación.
- Rangos de ganancia y patrones de radiación elevados (2.5 – 10 dBi, que es la ganancia calculada en relación con un radiador isotrópico que radia de la misma forma en todas las direcciones).
- Posibilidad de integrarse dentro de un circuito de microondas en el mismo sustrato.
- Espesor de antena muy pequeño.
- Posibilidad de diseñar antenas miniatura, multibanda y de alta directividad.[1][3][9][10][11]

Aunque las ventajas de este tipo de antenas son numerosas y muy atractivas, existen algunas limitaciones:

- Ancho de banda estrecho (5 – 10 %) son valores típicos sin posibilidad de mejora.
- Pérdidas dieléctricas y de conductor elevadas en parches delgados, afectando a la eficiencia de la antena.
- Sensibilidad a factores ambientales, como pueden ser la temperatura o la humedad.

Existen tres tipos principales de alimentación de antenas de parche:

- Alimentación desde el plano de tierra. Existe un agujero pasante en el plano de tierra que posibilita este tipo de alimentación. La sonda que viene desde el plano de tierra se fija a la capa superior del parche.
- Alimentación microstrip. Una línea de alimentación microstrip grabada en la misma capa del parche y se conecta a uno de sus bordes. Es posible utilizar una línea de alimentación microstrip para lograr adaptación de impedancias entre la línea de alimentación y la entrada al parche.

- Alimentación acoplada por abertura. No se conecta directamente al parche, si no que induce las corrientes al ser insertado en la capa de sustrato.

En la Figura 4 se pueden observar los distintos tipos de alimentación.

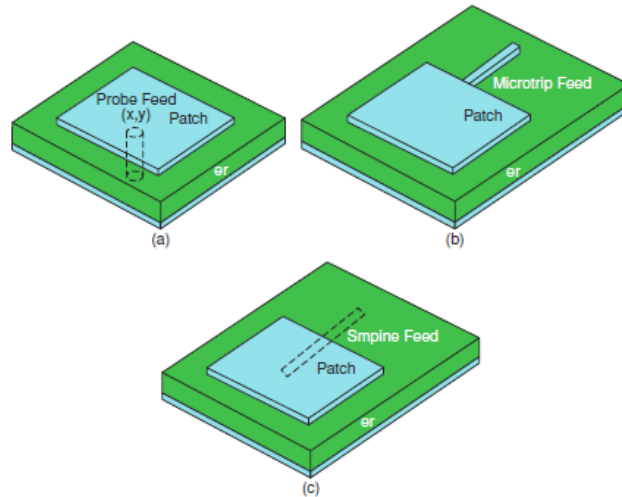


Figura 4. Tipos de alimentación

A continuación, se analizarán cada uno de los parámetros que sirven para caracterizar una antena:

- **Diagrama de radiación:** se trata de una gráfica tridimensional que representa la intensidad del campo relativa frente a la dirección. Se identifican 3 regiones de radiación basándose en la distancia de la antena, campo cercano reactivo, campo cercano radiante y campo lejano radiante. Normalmente, el diagrama de radiación de la antena se refiere al diagrama de campo lejano.

En este diagrama, aparecen distintos parámetros importantes:

- **Lóbulo principal:** lóbulo de máxima radiación.
- **Dirección de apuntamiento:** dirección en la cual se encuentra el lóbulo principal.
- **Lóbulos secundarios:** cada uno de los lóbulos que no son el principal.
- **Ancho de haz a -3 dB.** Intervalo de direcciones en el que la densidad de potencia radiada es mayor a la mitad de la potencia máxima.

En la Figura 5 se muestra el diagrama de radiación de una antena de parche GPS.

- **Eficiencia:** sirve para medir las pérdidas sufridas por una antena. Mientras mayor es la eficiencia, menor son las pérdidas y mejor será el rendimiento. La eficiencia depende del material

y la dimensión de la antena, además de la topología de alimentación utilizada.

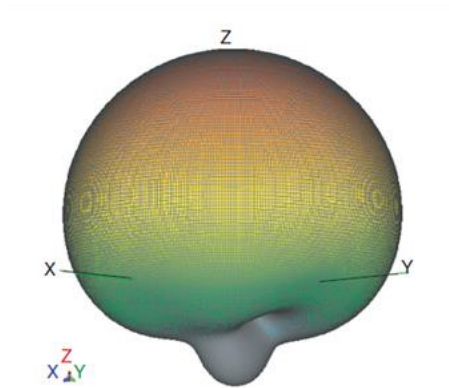


Figura 5. Diagrama de radiación 3-D

- **Frecuencia de resonancia:** se trata de la frecuencia de operación deseada de la antena. Dentro de la banda de frecuencias en la que opera la antena, la frecuencia de resonancia suele ser el punto medio.
- **Ancho de banda:** es la región de 3 dB a ambos lados de la frecuencia de resonancia. Mientras menor es el ancho de banda, más selectiva es la antena y mejor el rechazo que ofrece a las señales interferentes fuera de la banda.
- **Impedancia de entrada:** la ubicación de la sonda de alimentación determina la impedancia de entrada del parche, que debe ser igual que la de la sonda de alimentación para que la potencia transmitida sea la máxima posible.
- **Polarización:** describe la dirección variable en el tiempo y la magnitud relativa de la onda de propagación con el sentido del trazado. Existen tres tipos de polarización, lineal, circular y elíptica. El sentido de la polarización de la antena y el de la onda recibida deben coincidir para que las pérdidas sean mínimas.

Los parámetros de la antena dependen de las propiedades de los materiales conductores y dieléctricos, las dimensiones del parche, la frecuencia de operación y la altura del parche desde el plano de tierra.

En la Figura 6 se muestra la dependencia del tamaño del parche (longitud y anchura) en función del material del sustrato con un espesor de sustrato fijo de 1 mm. Al aumentar el valor de la permitividad relativa del material dieléctrico menor será el tamaño del parche.

En la Figura 7 se muestra el tamaño del parche en función de la constante dieléctrica y la frecuencia de funcionamiento, con un espesor de sustrato fijo de 1mm.

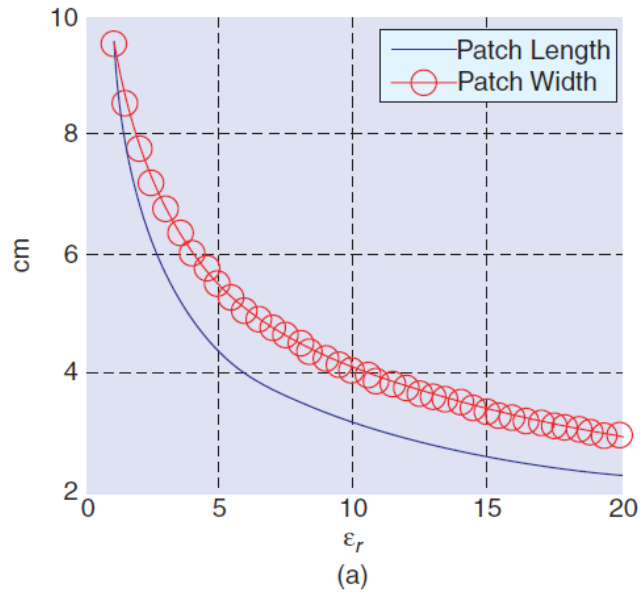


Figura 6. Dependencia tamaño parche y permitividad relativa

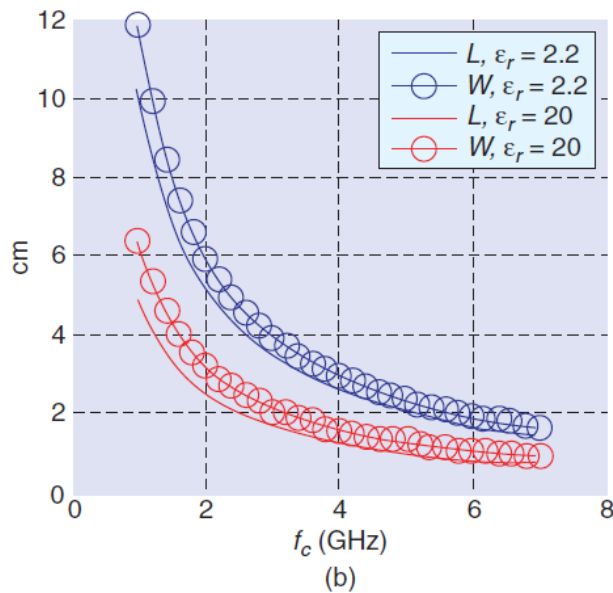


Figura 7. Tamaño del parche

En la Figura 8 se muestra la eficiencia del parche rectangular en función del espesor del sustrato normalizado con la longitud de onda operativa para dos constantes dieléctricas diferentes. Se observa como disminuye la eficiencia a medida que aumenta la altura del sustrato y cuando aumenta la constante dieléctrica. El ancho de banda aumenta a medida que aumenta el espesor del sustrato y disminuye para las constantes dieléctricas más altas.

En la Figura 9 se propone el equilibrio óptimo entre todos los parámetros.

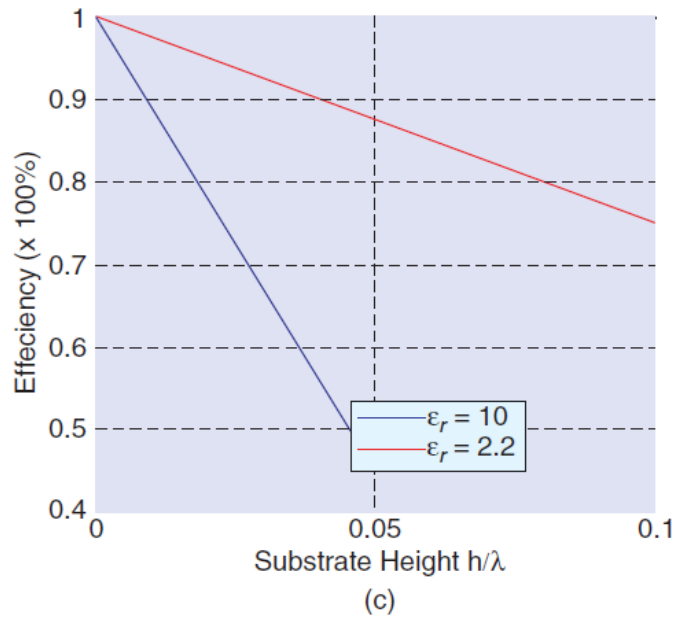


Figura 8. Eficiencia del parche

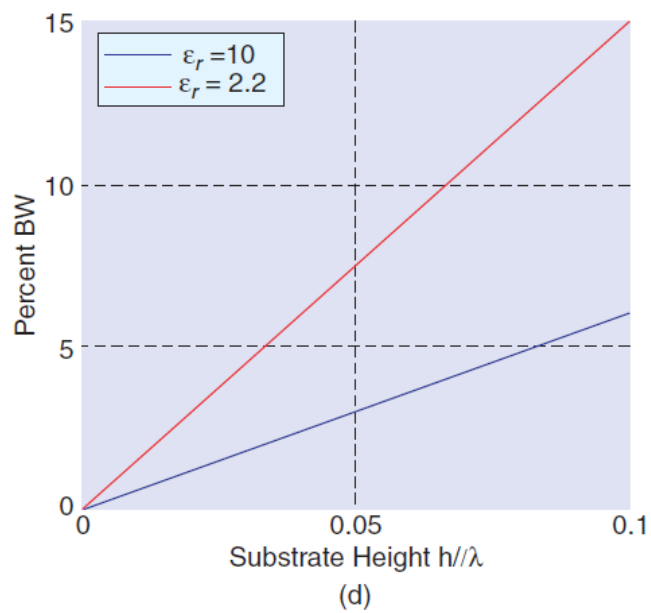


Figura 9. Equilibrio entre parámetros

2.3 Conceptos importantes

2.3.1 Coeficiente de reflexión S11

Este coeficiente determina la potencia que se refleja en el terminal 1 cuando incide una onda en el mismo. Es muy interesante desde el punto de vista del diseño del parche que este coeficiente tome un valor muy bajo, para que se produzca la máxima transferencia de potencia y la transmisión sea lo más eficiente posible.

2.3.2 Directividad

La directividad es la relación entre la intensidad de radiación en una dirección y la intensidad de radiación que produciría una antena isotrópica. Normalmente se habla de la directividad de una antena en su dirección de máximo apuntamiento, pues esta es la dirección deseada y en la que se trabajará.

2.3.3 Ganancia

La ganancia es la relación entre la intensidad de radiación en una dirección determinada y la intensidad de radiación de una antena isotrópica con igual potencia de entrada que la antena que se está estudiando.

2.4 Agrupación de antenas

Una agrupación de antenas es un conjunto de antenas en el cual, si se manipula la amplitud y la fase de excitación de cada elemento, además de la distancia de separación entre cada uno de ellos, se puede conseguir un diagrama de radiación específico que no se puede conseguir con un único elemento.

Existen tres tipos distintos de arrays, array lineal o 1D, en el cual los elementos están alineados, array plano o 2D, con agrupaciones bidimensionales cuyos elementos se encuentran sobre un plano o arrays conformados, los cuales tienen las antenas sobre una superficie curva.

A continuación, se muestran las 3 ventajas principales de trabajar con agrupaciones de antenas en vez de con antena básicas:

- **Aumento de la directividad:** al trabajar con arrays de antenas y manipular convenientemente la separación entre los distintos elementos, la amplitud y la fase de excitación se consigue un aumento de la directividad. Una técnica utilizada para aumentar la directividad es aumentar la longitud eléctrica de la antena. Por tanto, se aumentará la directividad si se aumenta de forma conveniente la longitud eléctrica de la antena.
- **Barrido de haz:** mediante las agrupaciones de antenas se puede conseguir variar la dirección del máximo de radiación modificando ciertos parámetros como puede ser la fase de excitación de cada elemento. De esta forma, se podrá realizar un barrido en el espacio modificando estos parámetros de forma mecánica o automáticamente.
- **Síntesis de diagramas:** las agrupaciones de antenas permiten adaptar el número de elementos, la distancia entre ellos y la fase entre elementos para conseguir un diagrama de radiación determinado.

El **factor de agrupación** o **factor de array** es el diagrama de radiación de un conjunto de elementos. Si se trabaja con una array en el que todos los elementos tienen el mismo diagrama de radiación y, además, están orientado en la misma dirección del espacio, el producto del factor de array por el diagrama de radiación del elemento proporciona el diagrama de radiación del array.

A continuación, se presentan algunos factores que influyen en el diseño de agrupaciones de antenas:

- **Distancia entre antenas:** es uno de los factores más importantes pues de esta separación entre antenas depende el número de máximos de radiación en el espectro real.
 - o Si la separación entre antenas es $d < \lambda/2$, tan solo aparece un máximo.
 - o Si la separación entre antenas es $d > \lambda$, aparecen máximos secundarios que se denominan lóbulos de difracción.

Por tanto, la separación entre antenas (d) deberá estar entre los valores $\lambda/2$ y λ .

- **Número de elementos:** un aumento del número de elementos del array implica una antena de mayor dimensión, por tanto, provoca un aumento de la directividad.

Existen diversos métodos para calcular el array que habrá que utilizarse para conseguir un diagrama de radiación deseado. Algunos de ellos son Síntesis de Fourier, Síntesis de Schelkunoff y Síntesis de Tschebyscheff.

2.5 Conclusiones

Durante el desarrollo del capítulo se han presentado parámetros que serán de gran utilidad durante el desarrollo de los capítulos anteriores.

Cabe destacar que este tipo de antenas es muy adecuado para dispositivos móviles de uso diario, por las grandes ventajas que presentan como el tamaño reducido y su resistencia a choques y vibraciones.

Estos parámetros servirán para orientar el diseño en una dirección o en otra, dependiendo de los valores que se vayan obteniendo.

Los diseños posteriores se realizarán con la finalidad de disminuir el coeficiente de reflexión para el caso de la antena de parche y aumentar la directividad en el caso de la agrupación de antenas.

3. Simulación elemento de array

3.1 Introducción

A lo largo de este documento se estudiarán distintos casos de simulación para estudiar los parámetros importantes en el diseño de antenas de parche.

El programa que se ha utilizado es un código abierto desarrollado en Matlab. Tanto los códigos como las instrucciones de utilización se pueden encontrar en la web <http://ece.wpi.edu/mom/index.html>.

A continuación, se muestra en la Figura 10 la interfaz de la web para descargar el código:

Chapter II Half Wavelength Patch Antenna

Contents

- [Home](#)
- [Chapter 1](#)
- [Chapter 2](#)
 - [Source codes](#)
 - [Manual \(pdf\)](#)
- [Chapter 3](#)
- [Chapter 4](#)
- [Chapter 5](#)
- [Chapter 6](#)
- [Chapter 7](#)
- [Chapter 8](#)
- [Chapter 9](#)
- [Appendix A](#)
- [Appendix B](#)
- [Appendix C](#)
- [New-64bit RCS codes](#)
- [Updates](#)
- [Feedback](#)
- [People](#)
- [Some Links](#)
- [MathWorks, Inc.](#)

This work has been supported by [National Science Foundation](#).

Grant #0231312

([Sergey N. Makarov](#) and [Leo C. Kempel](#))

Contents

- 2.1. LP patch antenna (1.0% bandwidth, $\epsilon_{pr} = 2.33$)
- 2.2. LP patch antenna (2.0% bandwidth, $\epsilon_{pr} = 2.55$)
- 2.3. LP patch antenna (0.6% bandwidth, $\epsilon_{pr} = 9.29$)
- 2.4. Bandwidth estimate and enhancement
- 2.5. RHCP patch antenna for 2.4 GHz ISM band (5% bandwidth, $\epsilon_{pr} = 3.38$) [13]

<http://ece.wpi.edu/mom/index.html>
Copyright 2005 WPI ECE Department

Figura 10. Web para descargar código.

Una vez dentro de la web, en el menú de la izquierda se selecciona el capítulo deseado, cada uno de ellos estudia un parche con unas características determinadas. Posteriormente, se selecciona “Source Code” para descargar todos los códigos disponibles para generar el parche de estudio.

El parche elegido es una breve variación de los casos que se encuentran en la web para adaptarse al caso de estudio. El parche elegido como elemento base del array que se estudiará en apartados posteriores tiene unas dimensiones de 33 x 33 mm. Además, el plano de tierra tendrá una longitud de 45 x 45 mm.

La posición en la que se ha colocado la sonda de alimentación es en $y = 0$ y $x = -3.8$. Se ha elegido esta posición y no otra porque es en la que el coeficiente de reflexión S_{11} toma su valor mínimo.

A continuación, se muestran los pasos que se han ido dando y las conclusiones que han hecho elegir unos parámetros en vez de otros.

3.2 Generación estructura 2D

En primer lugar, se utiliza el código de Matlab struct2d.m. Este código permite generar la estructura en 2D del parche.

Una vez se ejecuta este código, aparece la ventana que se muestra en la Figura 11.

Se observa como se van creando estructuras, que posteriormente se irán seleccionando para crear el parche, ground plane y sonda de alimentación.

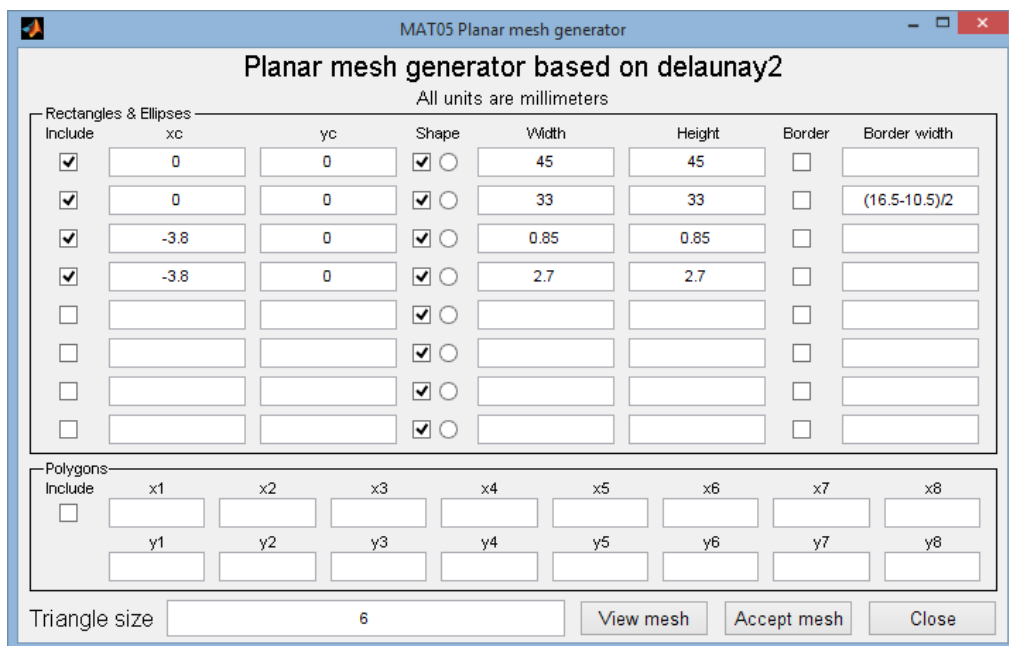


Figura 11. Ventana para definir parche 2D

La primera línea, indica que se crea un cuadrado centrado en $x = 0$ e $y = 0$ de 45×45 mm (que será el plano de tierra). La segunda indica que se crea un cuadrado centrado en $x = 0$ e $y = 0$ de 33×33 mm (que será el parche). Por otra parte, en las líneas 3 y 4 se genera la estructura de la sonda, centrada en $x = -3.8$ e $y = 0$ tendrá unas dimensiones de 0.85×0.85 mm.

El tamaño de los triángulos (en la parte inferior de la Figura 11) determina la precisión de los resultados. Para esta simulación se establece el tamaño en 6.

Una vez se determina el tamaño del parche y la posición de la sonda, se pulsa sobre "View mesh" y se obtiene la Figura 12:

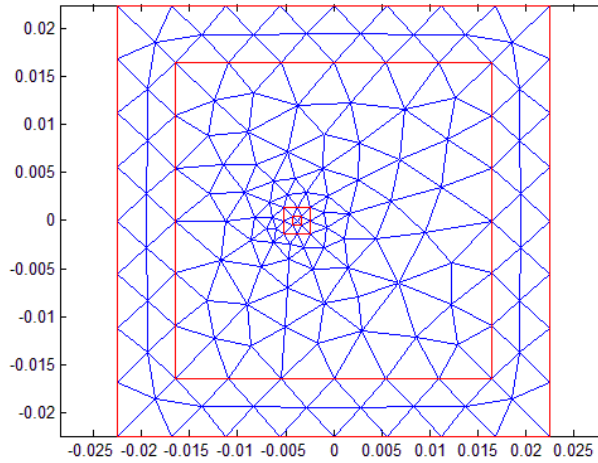


Figura 12. Estructura del parche 2D

Una vez se confirma que la estructura es la deseada, se pulsa sobre “Accept mesh” y se obtiene la Figura 13:

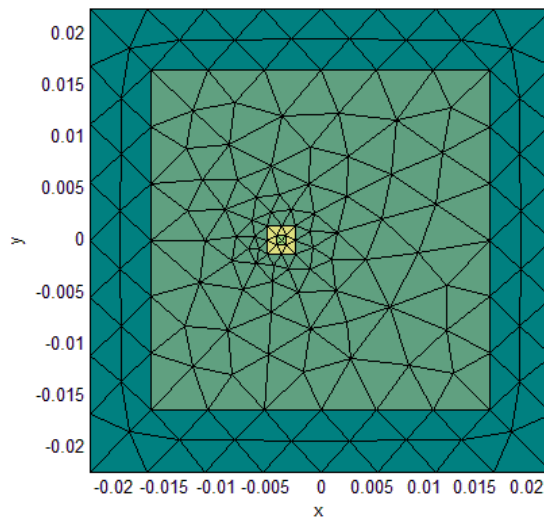


Figura 13. Parche 2D definitivo

3.3 Generación estructura 3D

Una vez se ha determinado la estructura en 2D del parche, se procede a definir qué es cada parte. Esto se realizará ejecutando el archivo struct3d.m en Matlab.

En este punto, se diseña la estructura 3D del parche. Para ello, tras ejecutar struct3d.m, aparece la ventana que se puede observar en la Figura 14.

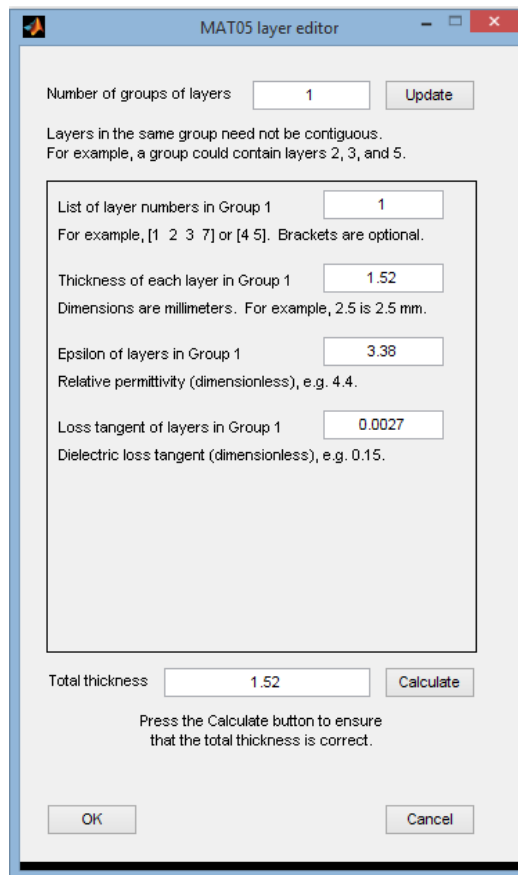


Figura 14. Ventana para definir estructura 3D del parche

En esta ventana, se observa al inicio una casilla para introducir el número de grupos de niveles con el que se trabajará. Se debe introducir un valor entero positivo y pulsar el botón “Update” para actualizar el resto de la ventana y crear nuevos niveles. En el ejemplo que se ilustra en ese documento se ha considerado únicamente un nivel.

Para el caso de estudio en este documento, se trabajará con un parche de espesor 1.52 mm y una permitividad relativa (ϵ_r) de 3.38. Además, la tangente de pérdidas tomará un valor de 0.0027.

Es importante que cada vez que se cambie uno de los valores que aparecen en esta ventana de la Figura 14, se pulse el botón “Calculate” para que se actualice el valor del espesor total y poder comprobar que el espesor es correcto.

Una vez se han introducido los valores deseados en cada una de las casillas, se pulsa sobre el botón “Ok”.

A partir de este punto, se comienzan a definir cada uno de los elementos de la estructura del parche: sonda de alimentación, parche, plano de tierra,... Las ventanas para ir seleccionándolos irán apareciendo una tras otra tras pulsar el botón “Done”. En total son 5 las ventanas que aparecen para definir las estructuras. Nota: Matlab estará ejecutando el archivo struct3d.m hasta que se cierre la ventana que se muestra en la Figura 14 una vez finalizado el proceso, esto significa que no se podrá ejecutar ningún otro archivo en paralelo hasta la finalización de todo el proceso.

Tras pulsar “Ok”, se muestra lo que se observa en la Figura 15:

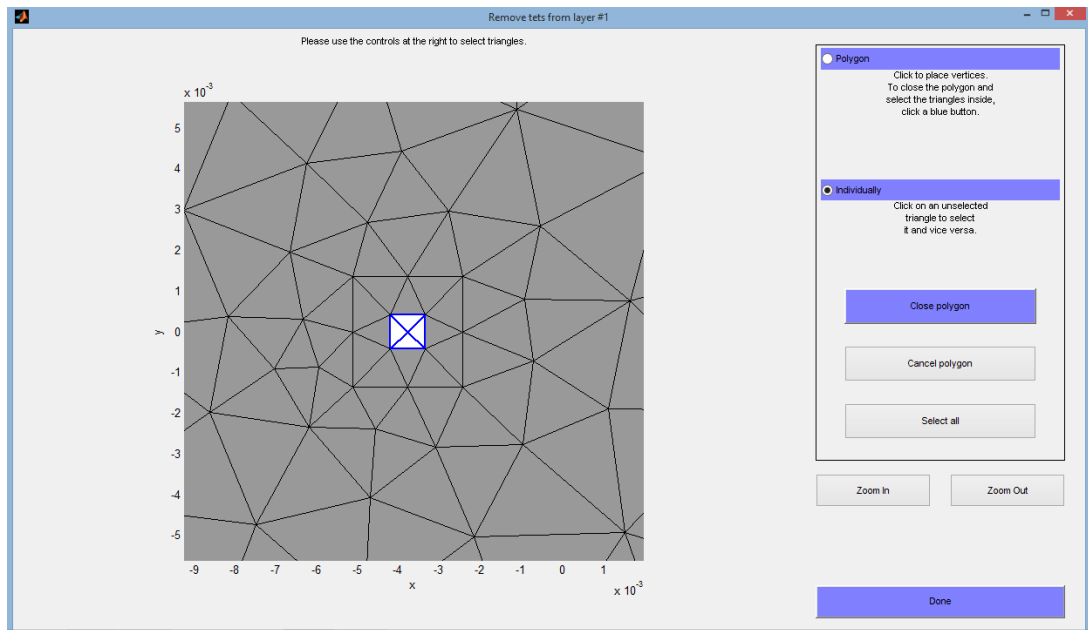


Figura 15. Eliminación de los tetraedros del dieléctrico para definir la sonda

En este punto, la finalidad es eliminar los tetraedros del dieléctrico para dejar libre la columna de alimentación. Para ello, se selecciona a la derecha “Individually”, de esta forma, se tendrán que marcar cada uno de los triángulos que formen parte del área en la que se desee insertar la sonda. La forma de seleccionarlos es haciendo click sobre la superficie del triángulo que se desee. Una vez se han seleccionado, se observa en blanco con los bordes azules el área delimitada por estos triángulos. Como se puede observar en la Figura 15, se han seleccionado los triángulos pertenecientes al cuadrado de 0.85×0.85 que se había definido en la Figura 11.

Una vez seleccionados correctamente los tetraedros del dieléctrico, se pulsa el botón “Done” para pasar al siguiente paso.

A continuación, en la Figura 16, se seleccionan las caras metálicas del “Ground plane”.

Como se observa en la Figura 16, en este punto se deben seleccionar las caras metálicas del “Ground Plane”. Para el caso que se trata, se debe seleccionar toda la estructura, por lo que se pulsa “Select all” (a la derecha de la Figura 16) y finalmente “Done” para pasar a la siguiente ventana.

En la Figura 17 se seleccionan las caras metálicas del dieléctrico. Las caras metálicas serán las correspondientes a la sonda de alimentación. Para ello, se seguirá un procedimiento distinto a los que se han visto con anterioridad.

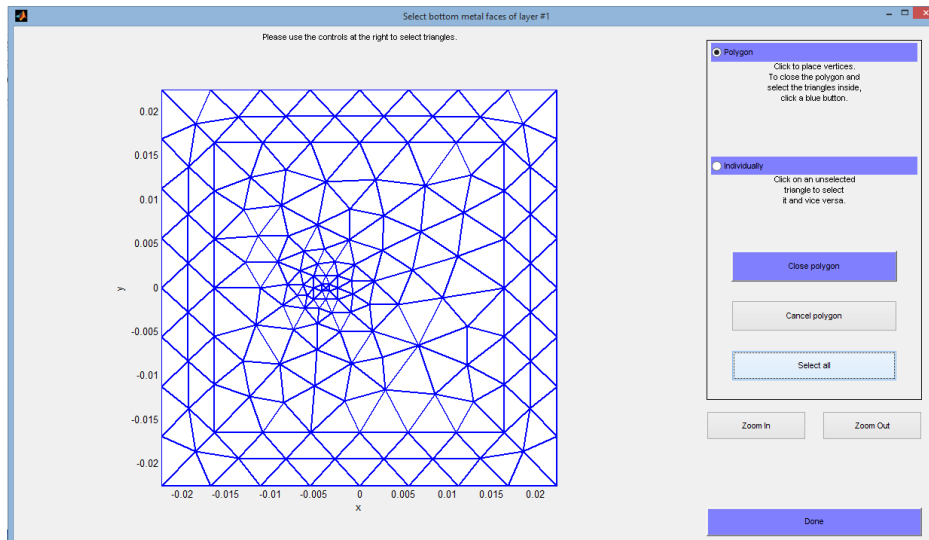


Figura 16. Caras de metal del fondo

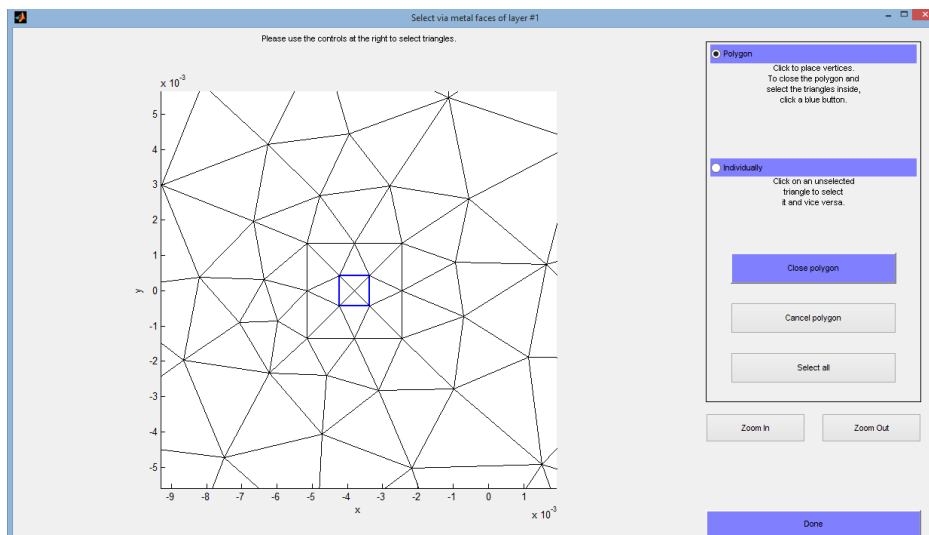


Figura 17. Ventana selección caras metálicas en dieléctrico

En este punto, para seleccionar las caras metálicas del dieléctrico, seleccionando solo las aristas y no el área contenida, se utilizará el modo "Polygon". De este modo, se irán seleccionando una a una las aristas que componen el polígono deseado. Se debe hacer click creando una estructura paralela a la deseada (ver Figura 18), posteriormente se pulsa en "Close polygon" (ver Figura 17) y aparecen seleccionadas las aristas que se han elegido.

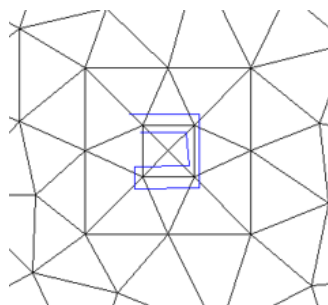


Figura 18. Selección de polígono

El resultado tras pulsar "Close polygon" es el que se muestra en la Figura 19:

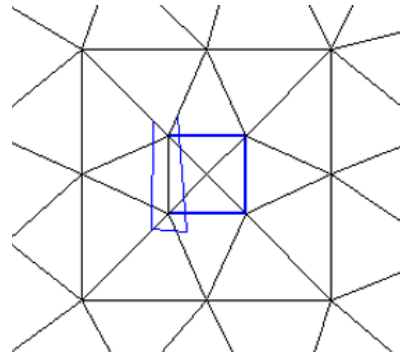


Figura 19. Resultado tras pulsar "Close polygon"

Además, queda una arista por seleccionar que se debe seleccionar de igual forma que las tres aristas anteriores, como se puede observar en la Figura 19. Tras seleccionar la arista, se vuelve a pulsar "Close polygon" y el resultado es el que se ha mostrado en la Figura 17.

A continuación, se deben seleccionar las aristas de la sonda de alimentación. Para ello se utilizará el mismo método descrito anteriormente, seleccionando las aristas del polígono y no el área contenida. El resultado obtenido se puede observar en la Figura 20. Finalmente se pulsa sobre "Done" para pasar a la siguiente ventana.

Finalmente, para terminar el proceso, se seleccionan las caras metálicas de la parte superior. Este proceso se puede observar en la Figura 21.

Para ello, se utiliza el modo "Polygon" al igual que en los dos casos anteriores. Sin embargo, en este punto sí que se debe seleccionar el área contenida. Por lo tanto, el modo de seleccionar el área será el que se muestra en la Figura 22. Se debe hacer click sobre cada una de las esquinas del cuadrado deseado (ver Figura 22) para, posteriormente, pulsar sobre "Close polygon" y obtener el resultado que se muestra en la Figura 21.

Tras pulsar "Done" en la última ventana, la mostrada en la Figura 21, se muestra la interfaz de la Figura 23 de forma automática. En esta interfaz se debe pulsar el botón "OK" con la opción "Remove" seleccionada para eliminar los tetraedros seleccionados durante los pasos anteriores.

Después de pulsar "OK", aparece la ventana que se muestra en la Figura 24.

En la ventana mostrada en la Figura 24, se puede elegir entre 4 distintas vistas para mostrar.

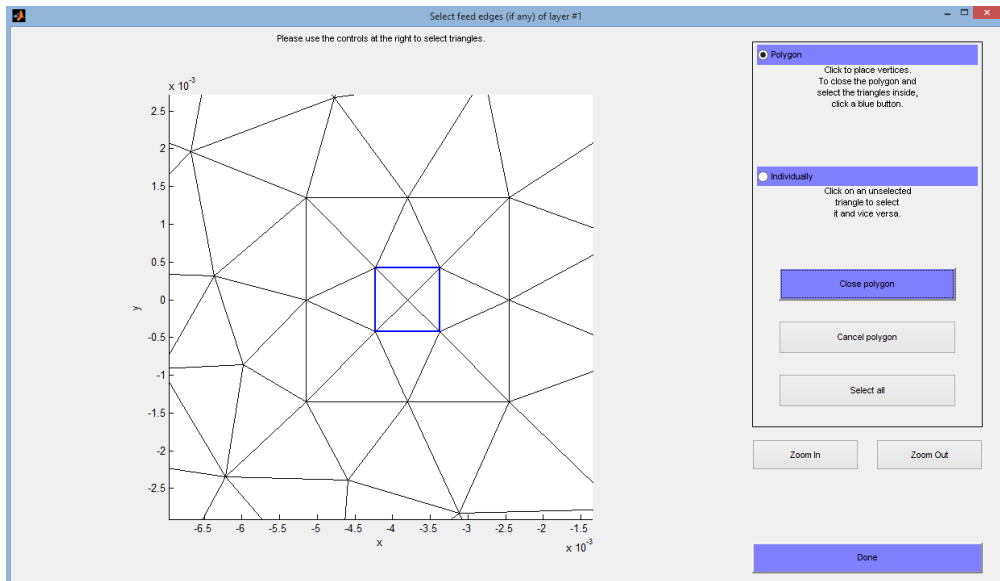


Figura 20. Ventana para seleccionar aristas de la sonda de alimentación

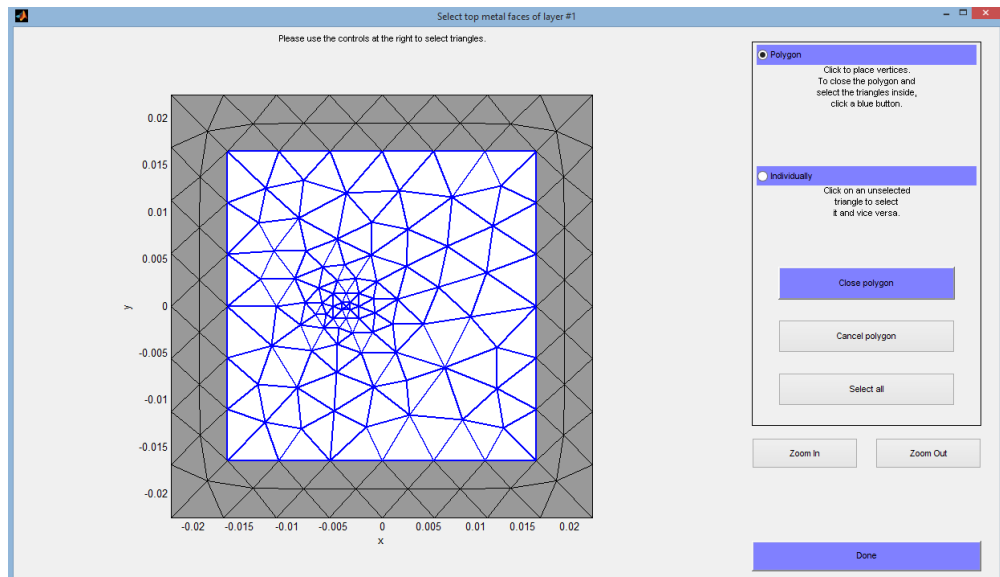


Figura 21. Ventana para seleccionar caras metálicas de la parte superior

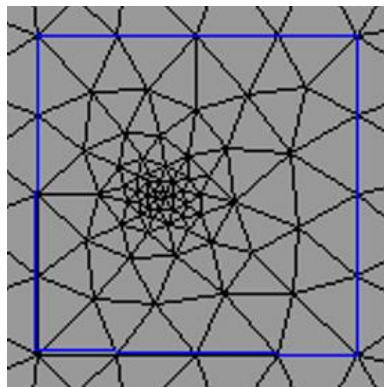


Figura 22. Selección de polígono

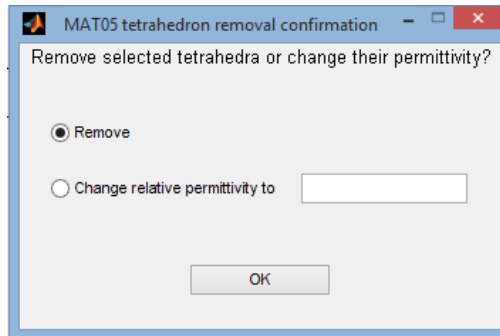


Figura 23. Confirmación eliminación tetraedros

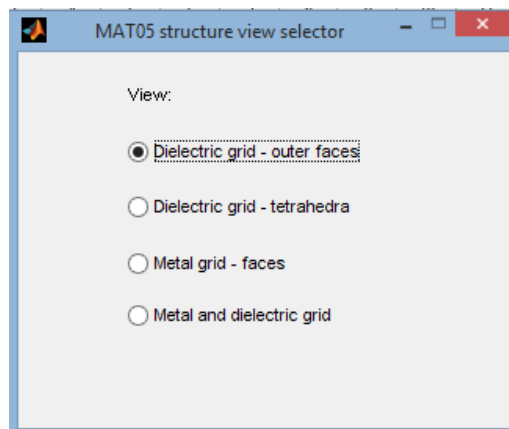


Figura 24. Selección de distintas vistas 3D

En primer lugar, al pulsar la primera opción se muestran las capas de dieléctrico (caras exteriores) que se han configurado en el diseño:

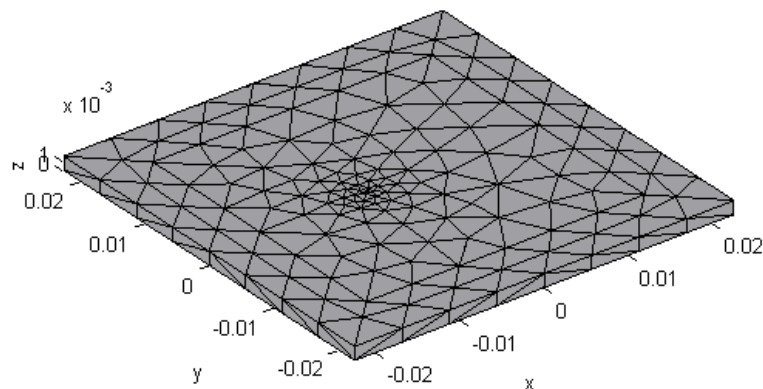


Figura 25. Capa de dieléctrico (caras exteriores)

En la segunda opción, se muestran los tetraedros de la capa de dieléctrico, tal y como se puede observar en la Figura 26. Se observa en la Figura 26 la zona en la que se han eliminado los tetraedros del dieléctrico (ver Figura 15) para dejar lugar para la sonda metálica.

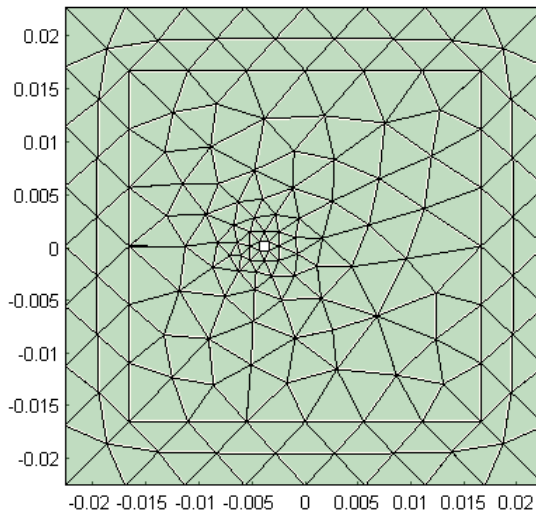


Figura 26. Tetraedros de la capa de dieléctrico vista 2D

La vista en 3D de la Figura 26 sería la siguiente:

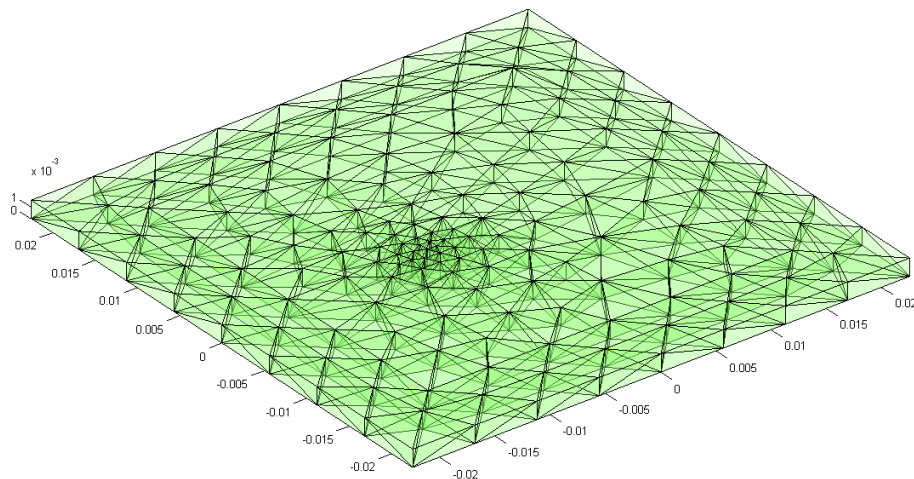


Figura 27. Tetraedros de la capa de dieléctrico vista 3D

A continuación, seleccionando la tercera opción, se muestran las caras metálicas. El resultado se puede ver en la Figura 28.

A continuación, en la Figura 29, se muestra una vista en 3D de la Figura 28 en la que se puede observar mejor el “Ground Plane”, y el parche. Además, se puede observar la columna de alimentación que forma la sonda.

Si se gira la gráfica mostrada en la Figura 29, se puede observar la posición de la sonda de alimentación de forma más clara, en la Figura 30.

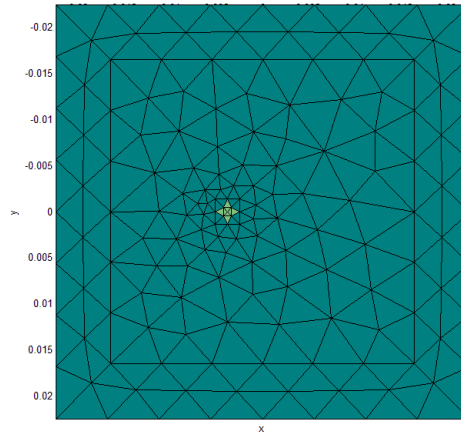


Figura 28. Caras metálicas vista en 2D

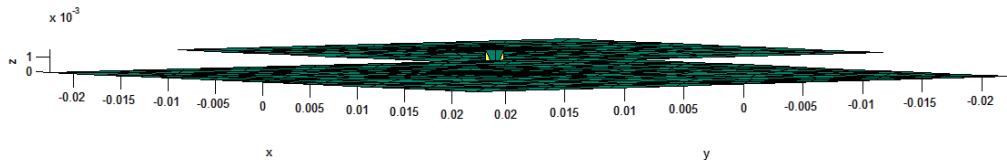


Figura 29. Caras metálicas vista en 3D

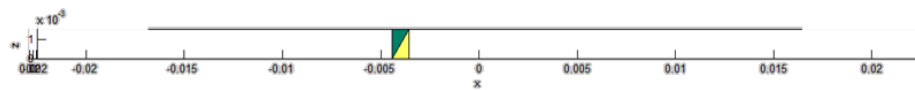


Figura 30. Posición sonda de alimentación

Como se puede observar en la Figura 30, la sonda está correctamente colocada en la posición $x=-3.8$ e $y=0$ mm.

Finalmente, la cuarta opción del diálogo mostrado en la Figura 24 permite ver la estructura al completo, mostrando tanto la parte metálica como la parte de dieléctrico. El resultado se muestra en la Figura 31.

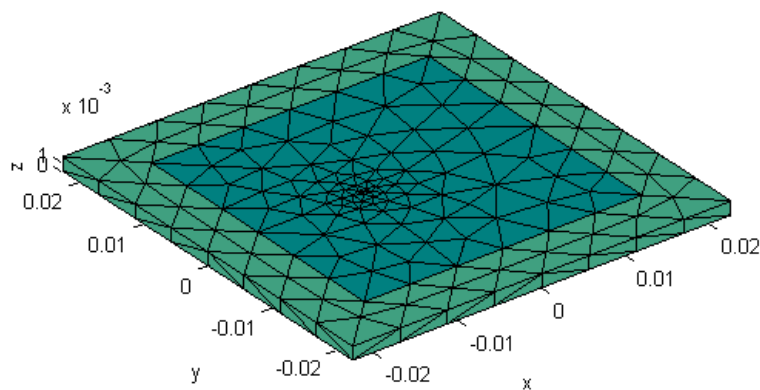


Figura 31. Capas metálicas y de dieléctrico

3.4 Ejecución fichero wrapper.m

La ejecución de este archivo hará uso de la información almacenada en el archivo struct3d.mat. En este fichero se encuentra almacenada toda la información que se ha añadido sobre la estructura del parche.

En este punto, simplemente se debe ejecutar el archivo wrapper.m. Este archivo, llamará a metal.m y dielectric.m y la información obtenida se almacenará en el archivo basis.mat, que se utilizará posteriormente para calcular la impedancia, el diagrama de radiación, los campos eléctricos y magnéticos, ...

3.5 Solución MoM

En este apartado se plasmará el resultado de la simulación de la estructura que se ha definido en los puntos anteriores.

En primer lugar, se debe ejecutar el archivo impedance.m. La ejecución de este archivo generará el archivo out.mat que será el que se utilice en la simulación del diagrama de radiación, la representación de los campos magnéticos y eléctricos,...

El intervalo de simulación que se ha definido para la frecuencia es de 2.2 a 2.8 GHz.

La frecuencia de trabajo utilizada para todas las simulaciones toma el valor de 2.4 GHz.

El resultado de ejecutar impedance.m se puede observar en la Figura 32. Se observa una correcta adaptación de impedancia en la frecuencia de trabajo deseada.

A continuación, en la Figura 33, se representa el coeficiente de reflexión s_{11} . Se puede observar, como a la frecuencia de trabajo deseada, este coeficiente de reflexión presenta un mínimo.

La condición que se ha utilizado para seleccionar la posición de la sonda de alimentación es que a la frecuencia de trabajo deseada el coeficiente de reflexión tome un valor mínimo, como se puede observar en la Figura 33. Ya se ha mencionado anteriormente que esto se ha conseguido con la sonda de alimentación colocada en $x=-3.8$ e $y=0$.

El valor que toma el coeficiente de reflexión en la posición elegida es un aspecto muy importante a tener en cuenta, debido a que esto ayudará a disminuir las pérdidas de la antena y a mejorar el rendimiento de la misma.

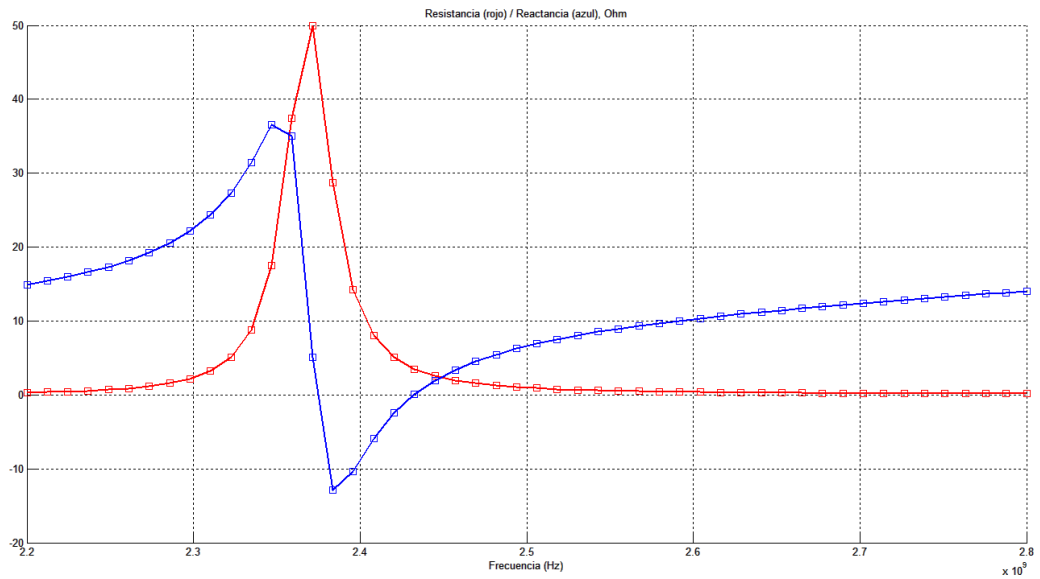


Figura 32. Gráfica de impedancia

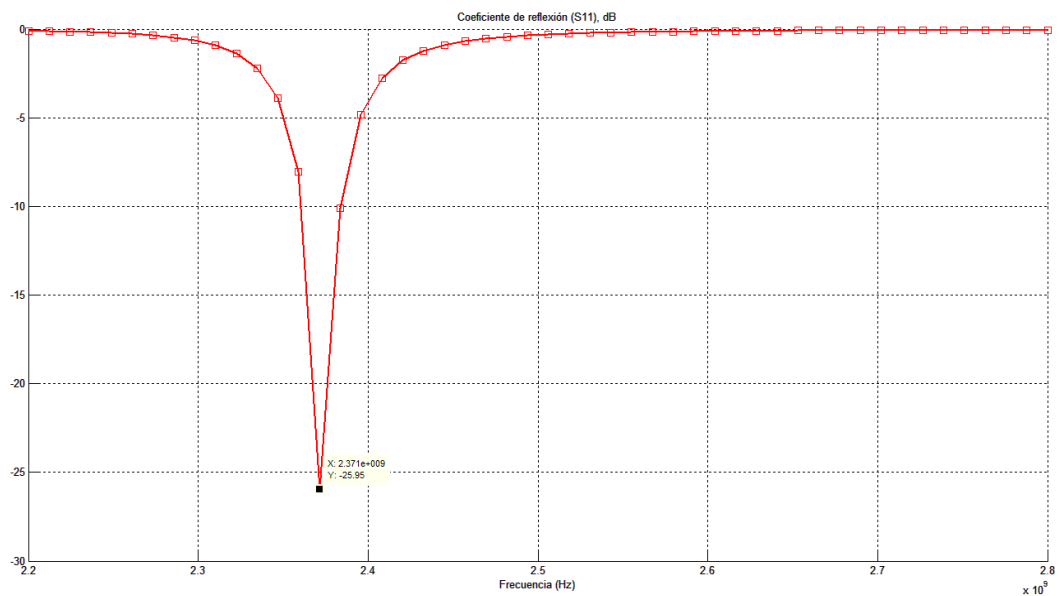


Figura 33. Coeficiente de reflexión

En la Figura 34 se muestra el diagrama de radiación en el plano XZ, es decir, el diagrama para el cual el valor de Φ vale 0° .

El código para calcular estos diagramas de radiación se ha incluido al final del documento, en el Anexo correspondiente.

Se observa en el diagrama de radiación la directividad obtenida, 3.24 dB. Se estudiará en los capítulos siguientes cómo varía este valor al aumentar el número de elementos de forma adecuada.

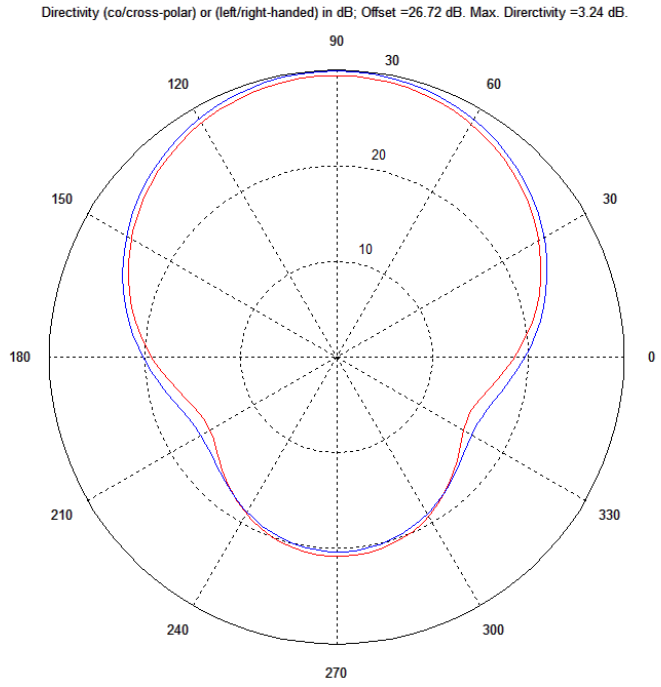


Figura 34. Diagrama de radiación plano XZ ($\phi=0^\circ$)

A continuación, se muestra el diagrama de radiación para el plano $\Phi=90^\circ$, es decir, el plano YZ.

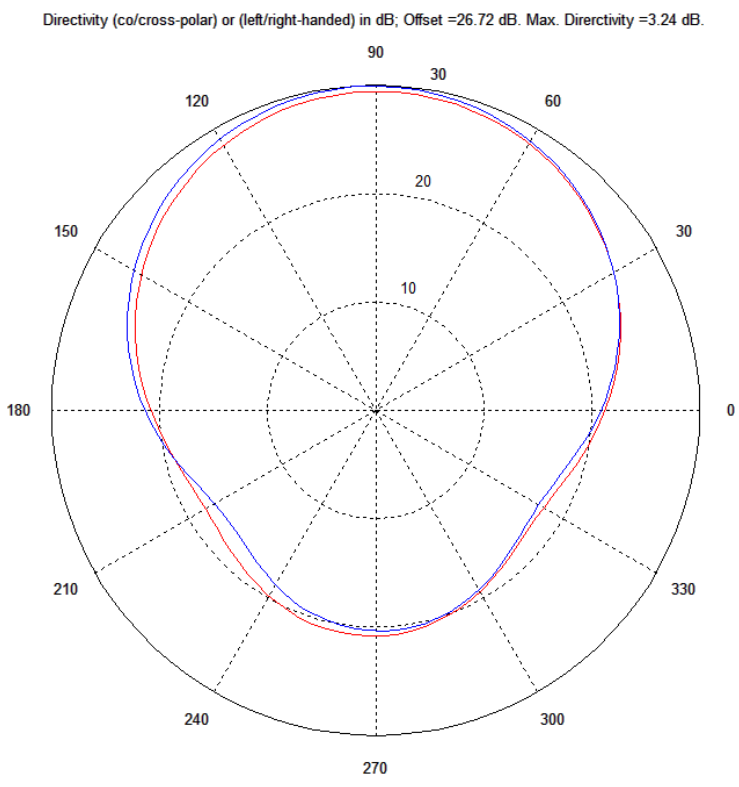


Figura 35. Diagrama de radiación plano YZ ($\phi=90^\circ$)

En la Figura 36 se muestra el diagrama de radiación 3D:

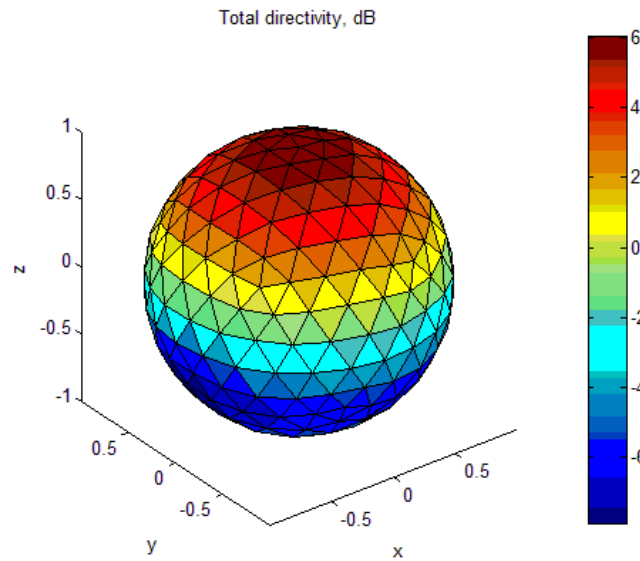


Figura 36. Diagrama de radiación 3D

Finalmente, se va a calcular tanto el campo magnético como el campo eléctrico. Para ello, se ejecutará el archivo "nearfield.m". Tras ejecutarlo, se mostrará la ventana que se puede observar en la Figura 37 y tras seleccionar en la columna de la derecha el tipo de gráfica que se desea, se pulsa "Plot Graph" y aparecerá de forma automática la misma.

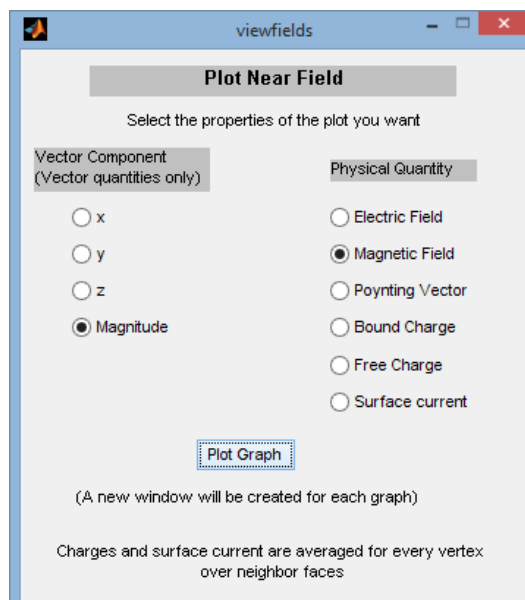


Figura 37. Ventana para seleccionar gráfica a mostrar

El campo magnético se muestra en la Figura 38.

Además, se muestra una vista en 2D en la Figura 39 para analizar mejor los valores y mostrando una visión más clara.

Finalmente, en la Figura 40 se muestra el campo eléctrico obtenido.

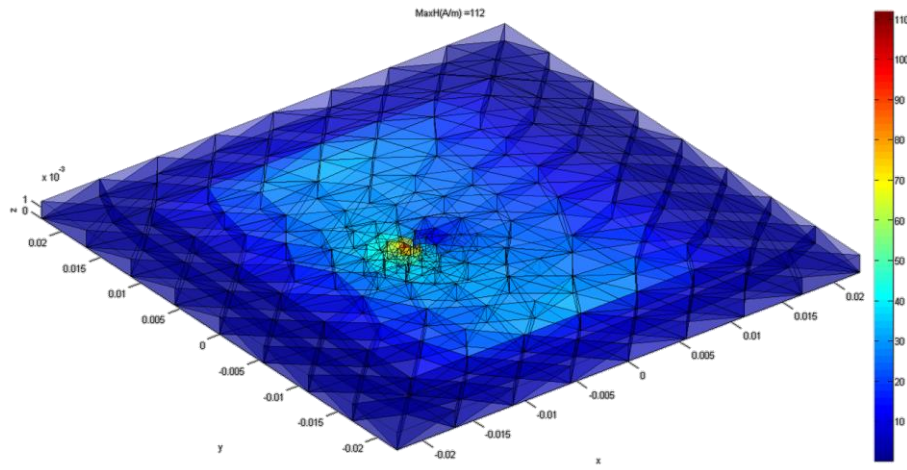


Figura 38. Campo magnético 3D

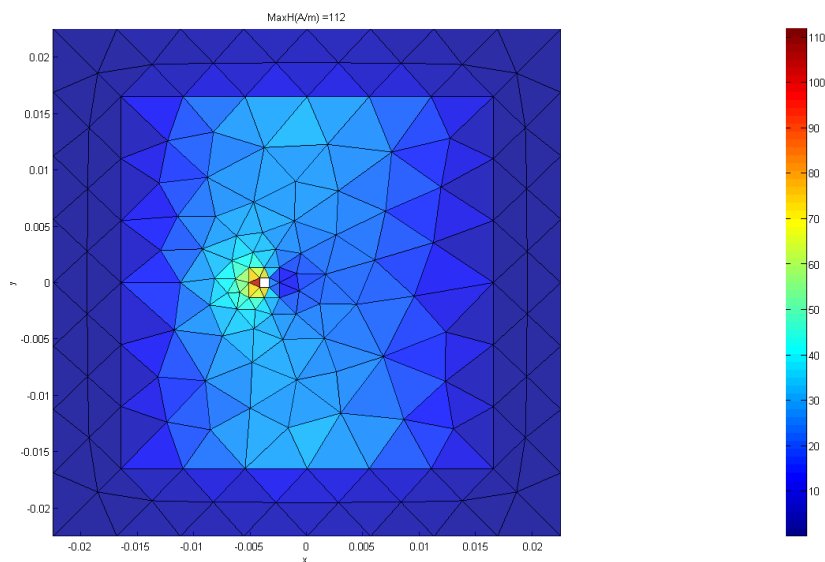


Figura 39. Campo magnético 2D

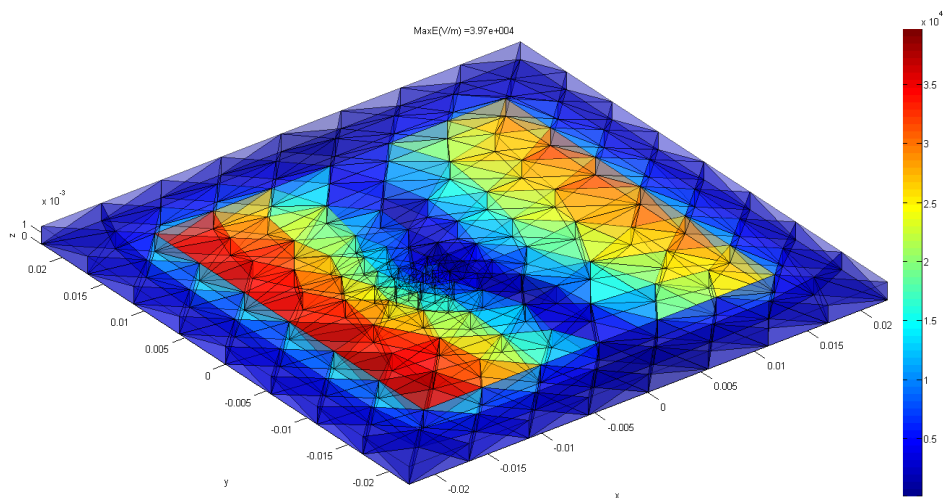


Figura 40. Campo eléctrico 3D. Se observa como el campo eléctrico es máximo en las ranuras radiales

3.6 Conclusiones

En este capítulo se ha realizado la introducción al software que se va a utilizar para realizar el trabajo. Además, se ha realizado la simulación del elemento que formará el array para realizar un correcto diseño del mismo.

Los factores que han influido en el diseño han sido la curva de impedancia y el coeficiente de reflexión. Como se ha comentado en el último punto, se ha buscado la posición de la sonda que minimizaba este coeficiente de reflexión en la frecuencia de trabajo (2.4 GHz), tomando un valor de -25.95 dB.

La directividad del parche es de 3.24 dB. A lo largo de la memoria se analizará como varía la directividad al colocar más de un elemento idéntico al que se ha analizado en este apartado.

4. Análisis de un array con configuración 1D

4.1 Introducción

En este apartado se realizará un estudio de distintas configuraciones de array para establecer la distancia óptima a la que deben colocarse los distintos parches. La distancia óptima será aquella en la que no aparezcan lóbulos de difracción.

En un primer momento, se trabajará con una configuración de 4 parches y, una vez definida la distancia óptima, se estudiará la configuración de un array de 6 elementos para estudiar cómo varían los resultados al aumentar el número de elementos.

Finalmente, se analizará un array de dos dimensiones para estudiar en este caso cómo varía también el diagrama de radiación.

4.2 Optimización de la distancia para un array 4x1

4.2.1 Introducción

Se utilizará la misma herramienta que se ha estado utilizando hasta este momento para definir el array.

Se estudiarán varios casos de separación entre parches (d). Para seleccionar los distintos casos de estudio, en primer lugar se calculará λ .

La distancia entre los centros de los distintos parches del array debe ser menor que la longitud de onda, λ .

Una vez calculada la longitud de onda, se elegirán las distintas distancias entre centros que se estudiarán en cada uno de los casos. El cálculo se realizará teniendo en cuenta que la frecuencia de trabajo es 2,4 GHz.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2.4 \cdot 10^9} = 125 \text{ mm}$$

De cara a que el diseño elegido sea el mejor, se estudiarán 4 casos, en primer lugar, una separación entre centros de 75 mm, seguidamente 100 mm, para continuar con los casos de separación de 110 y 130 mm.

A continuación, se explica de forma detallada el proceso de creación del array y la definición de la estructura.

En primer lugar, se ejecutará el archivo `struct2d.m` para definir la estructura en 2D del parche. A continuación, se muestra la ventana utilizada en la Figura 41.

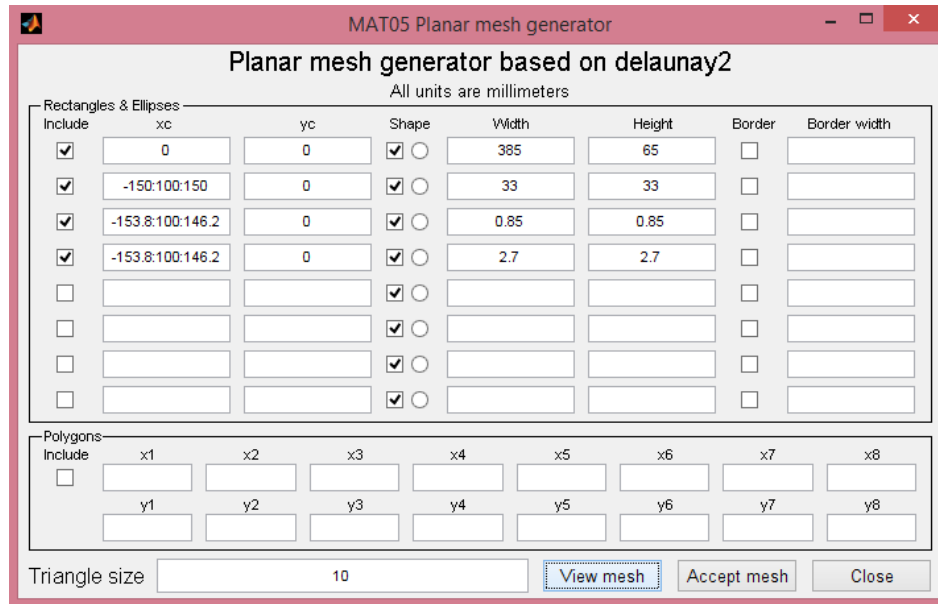


Figura 41. Ventana para definir array 1D

Al igual que en la Figura 11 se definía la estructura en dos dimensiones del parche, en la Figura 41 se indica el diseño de un array de 4 elementos.

Para ello, se debe especificar el lugar en el que comienza y el lugar en el que termina la estructura, incluyendo en el centro la distancia entre elementos.

A continuación, se muestran los cálculos para la posición de la sonda de forma más detallada:

- En la Figura 11 se definía que la posición de la sonda era $x=-3.8$ e $y=0$.
- En el caso de estudio en este apartado, si se desea tener 4 elementos separados una distancia d , por ejemplo, 100 mm, se tendrá que colocar la sonda en la posición $p1 = 0-100/2-100-3.8 = -153.8$ mm. La sonda comenzará a aparecer centrada en $x=-153.8$ e $y=0$ y, además, cada 100 mm. La posición de finalización será $p2=0+50+100-3.8=146.2$ mm. Por tanto, para definir la coordenada x de la sonda se deberá incluir $p1:d:p2$, en este caso $-153.8:100:146.2$ (la coordenada y es siempre 0).

Y finalmente la posición del parche:

- En la Figura 11 se definía que la posición del parche era $x=0$ e $y=0$.
- En el caso de estudio en este apartado, si se desea tener 4 elementos separados una distancia d , por ejemplo, 100 mm, el parche aparecerá en las posiciones $x=-150$, $x=-50$, $x=50$, $x=100$.

- Esto se consigue añadiendo en la celda correspondiente de la ventana que aparece en la Figura 41 -150:100:150.

A continuación, se muestran cada uno de los casos de estudio. En primer lugar, se explicará la estructura analizada para, finalmente, plasmar el diagrama de radiación y discutir los resultados obtenidos.

4.2.2 Caso d = 75 mm

En primer lugar, se ejecuta el archivo struct2d.m, al igual que en el caso anterior.

Tras ejecutar este archivo, aparece la ventana que se observa en la Figura 42. En esta ventana se han incluido los datos necesarios para crear un array 4x1 donde el centro de cada uno de los elementos está separado 75 mm del otro. Las pautas que se han seguido son las que se han explicado en el punto anterior.

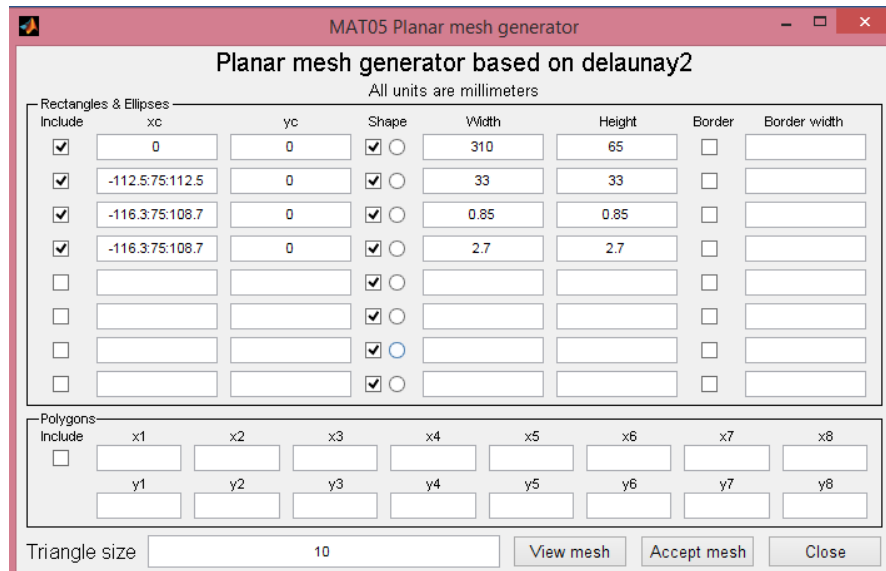


Figura 42. Ventana para definir estructura 2D caso array 4x1 d=75 mm

A continuación, se muestra en la Figura 43 la estructura que se ha diseñado. Si se compara con la Figura 13, se puede comprobar que el elemento sigue siendo el mismo con la misma estructura. Sin embargo, este elemento de parche se repite 4 veces separado 75 mm a través de todo el plano de tierra.

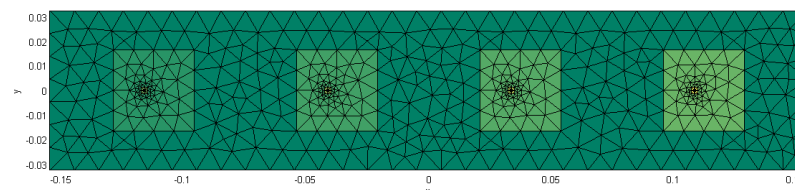


Figura 43. Estructura 2D array 4x1 d=75 mm. El plano de masa es de 310 x 65 mm. El sustrato dieléctrico es de 1.52 mm y tiene la misma dimensión que el plano de masa. Los parches están sobre el sustrato dieléctrico.

A continuación, se muestra el diagrama de radiación que se ha obtenido ejecutando los archivos direct0.m y direct90.m. Estos archivos se incluyen

en el Anexo de esta memoria y se basan en el archivo radpattern.m para calcular el patrón de radiación.

Se han realizado dos modificaciones en radpattern.m:

- direct0.m calcula el patrón de radiación en el plano $\Phi=0^\circ$ y direct90.m calcula el patrón de radiación en el plano $\Phi=90^\circ$.
- Se ha incluido el cálculo de la directividad y se ha mostrado en la gráfica.

Tras ejecutar direct0.m, se obtiene el diagrama de radiación en el plano $\Phi=0^\circ$ (plano XZ). El resultado se puede observar en la Figura 44

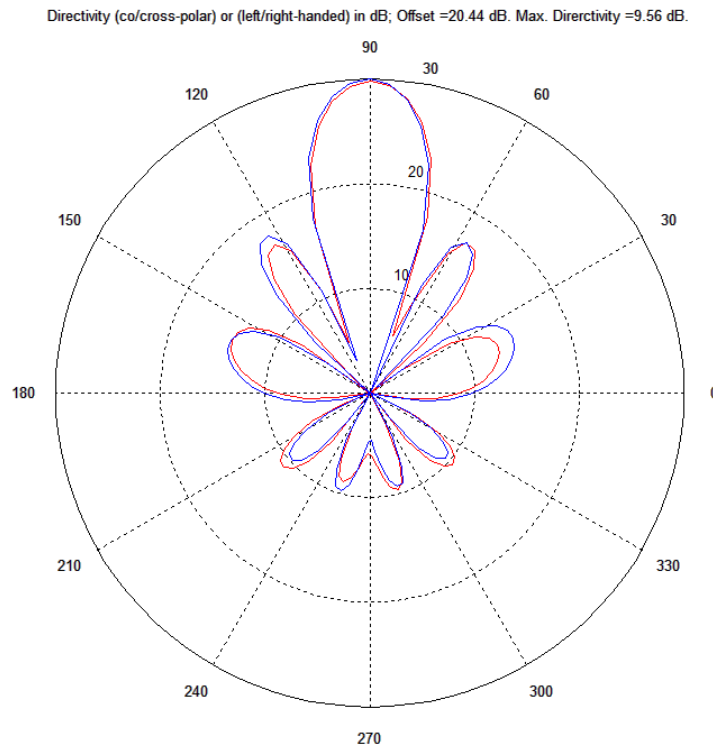


Figura 44. Diagrama de radiación plano XZ caso d=75 mm

Se observa como se consigue una directividad de 9.56 dB con esta separación entre elementos. Si se compara con el elemento de parche (ver Figura 34), la directividad ha aumentado de 3.24 dB a 9.56 dB que se obtienen en este caso.

El diagrama de radiación en el plano XZ contiene un lóbulo principal y dos lóbulos secundarios.

A continuación, se muestra el diagrama de radiación en el plano YZ en la Figura 45.

Finalmente, se muestra en la Figura 46 el diagrama de radiación del array en 3 dimensiones.

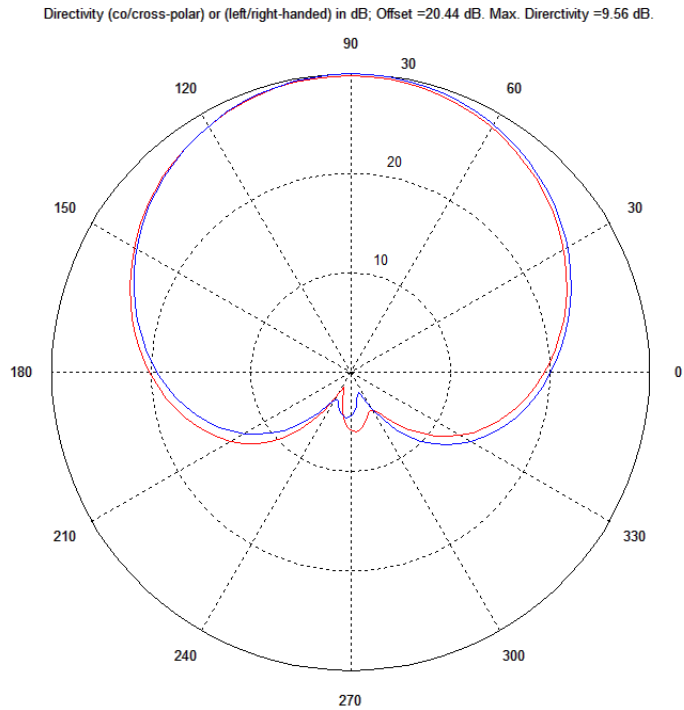


Figura 45. Diagrama de radiación plano YZ caso d=75 mm

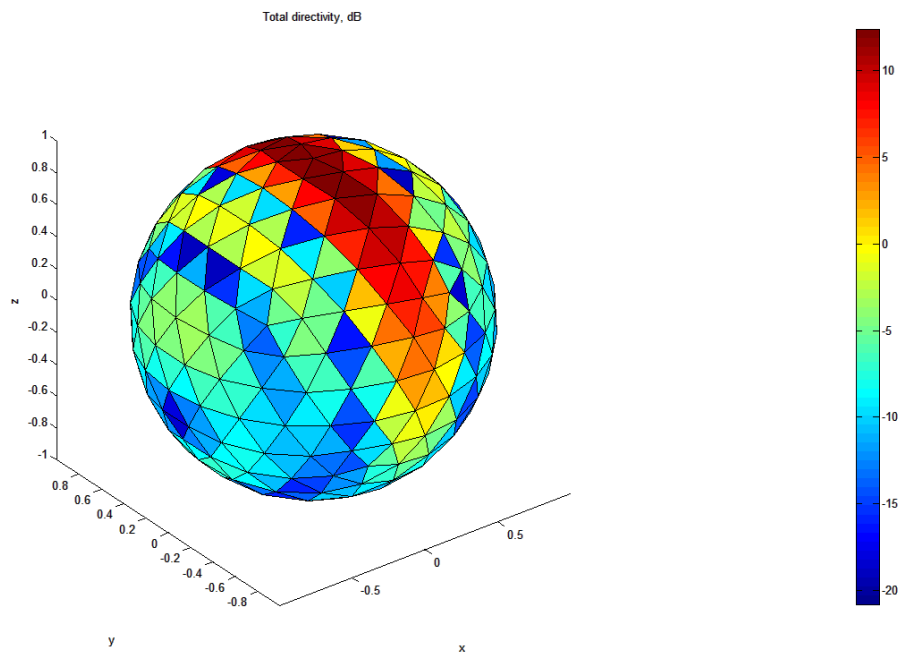


Figura 46. Diagrama de radiación 3D caso d=75 mm

4.2.3 Caso d = 100 mm

En primer lugar, se ejecuta el archivo struct2d.m, al igual que en el caso anterior.

Tras ejecutar este archivo, aparece la ventana que se observa en la Figura 47. En esta ventana se han incluido los datos necesarios para crear un array 4x1 donde el centro de cada uno de los elementos está separado 100 mm del otro. Las pautas para calcular los puntos a incluir son las que se han explicado en el punto anterior.

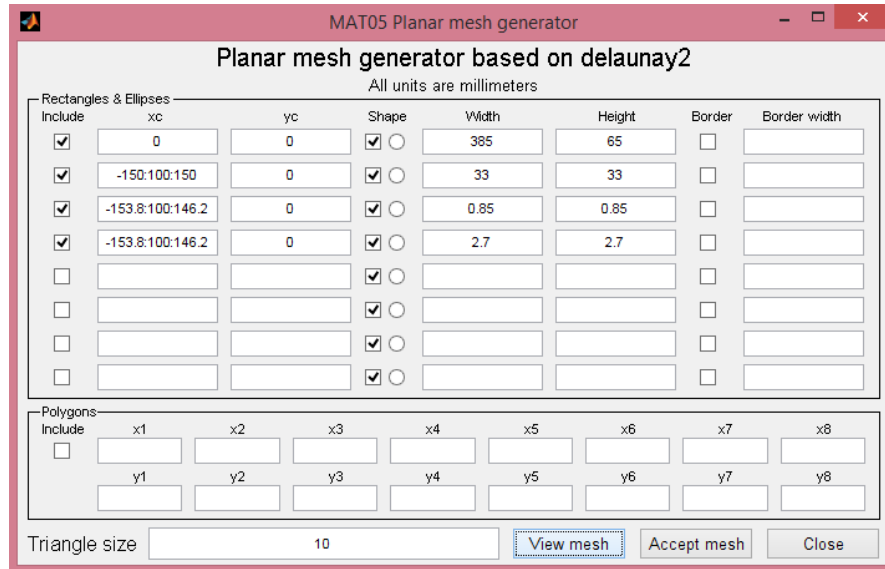


Figura 47. Ventana para generar estructura en 2D caso $d = 100$ mm

Se muestra en la Figura 48 la estructura generada, al igual que en el caso anterior, se trata de un array de 4 elementos, esta vez separados 100 mm.

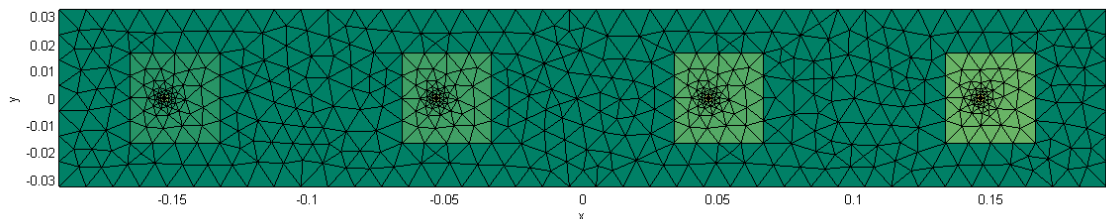


Figura 48. Estructura 2D array 4x1 $d=100$ mm. El plano de masa es de 385 x 65 mm. El sustrato dieléctrico es de 1.52 mm y tiene la misma dimensión que el plano de masa. Los parches están sobre el sustrato dieléctrico.

En la Figura 49 se muestra el diagrama de radiación en el plano XZ. Se puede observar como la directividad toma un valor de 10.09 dB.

Además, en la Figura 50 se muestra el plano YZ del diagrama de radiación.

Finalmente, el diagrama de radiación en 3D del array 4x1 con una separación entre elementos de 100 mm se muestra en la Figura 51.

Se puede observar que al aumentar la distancia de separación de 75 mm a 100 mm se ha conseguido aumentar la directividad de 8.54 dB a 10.09 dB.

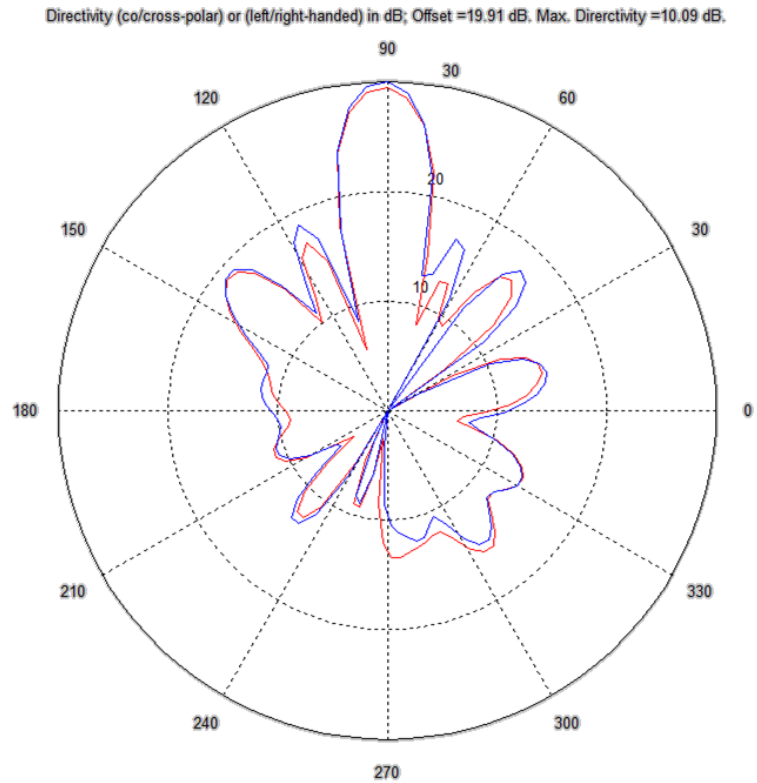


Figura 49. Diagrama de radiación plano XZ caso d=100 mm

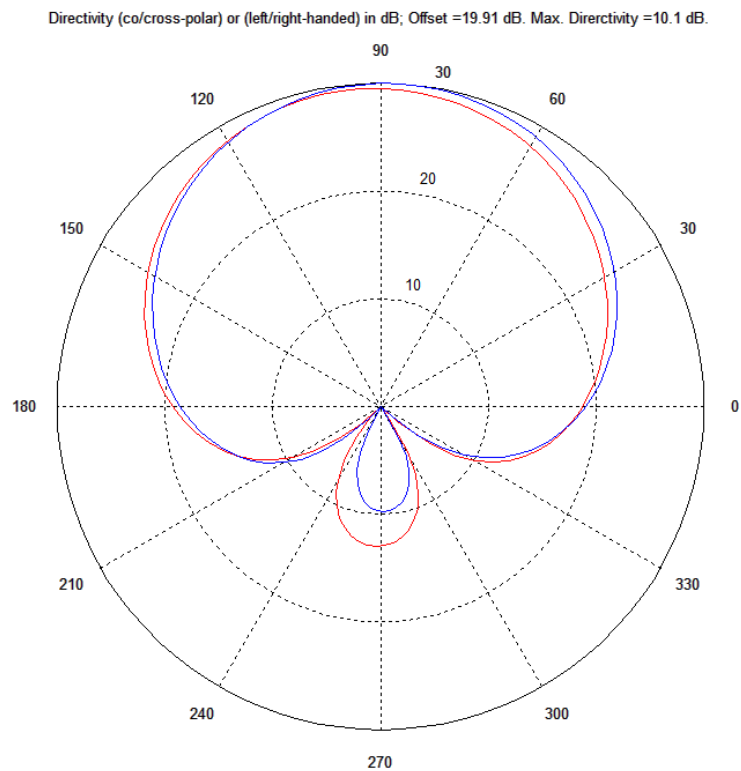


Figura 50. Diagrama de radiación plano YZ caso d=100 mm

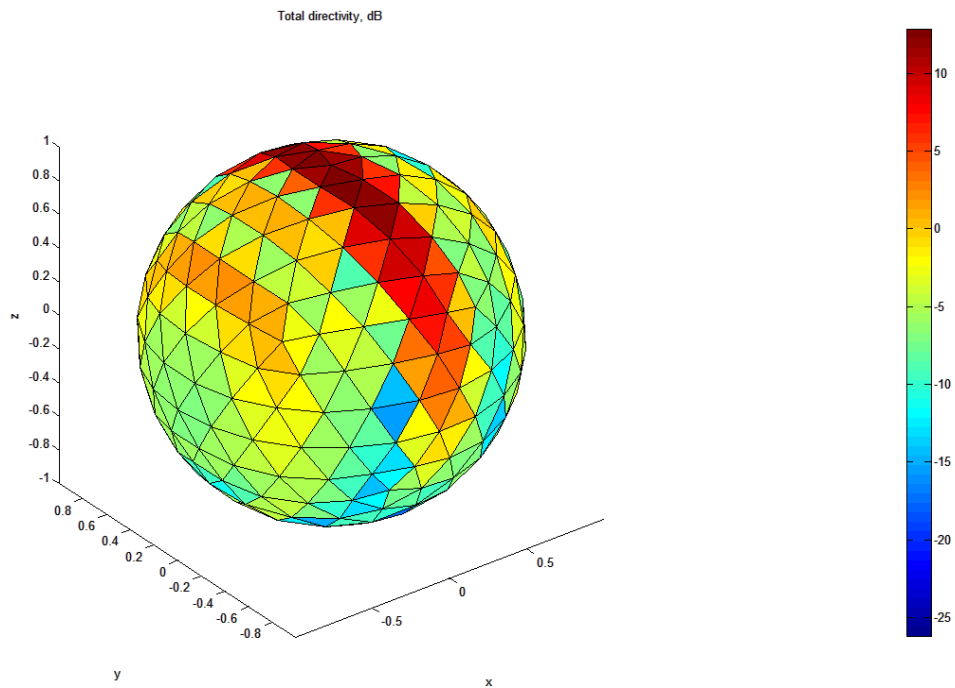


Figura 51. Diagrama de radiación 3D caso d=100 mm

4.2.4 Caso d = 110 mm

Al igual que se ha realizado en los casos anteriores, en primer lugar, se ejecuta el archivo struct2d.m.

Tras ejecutar este archivo, aparece la ventana que se observa en la Figura 52. En esta ventana se han incluido los datos necesarios para crear un array 4x1 donde el centro de cada uno de los elementos está separado 110 mm del otro. Las pautas para calcular los puntos a incluir son las que se han explicado en la introducción.

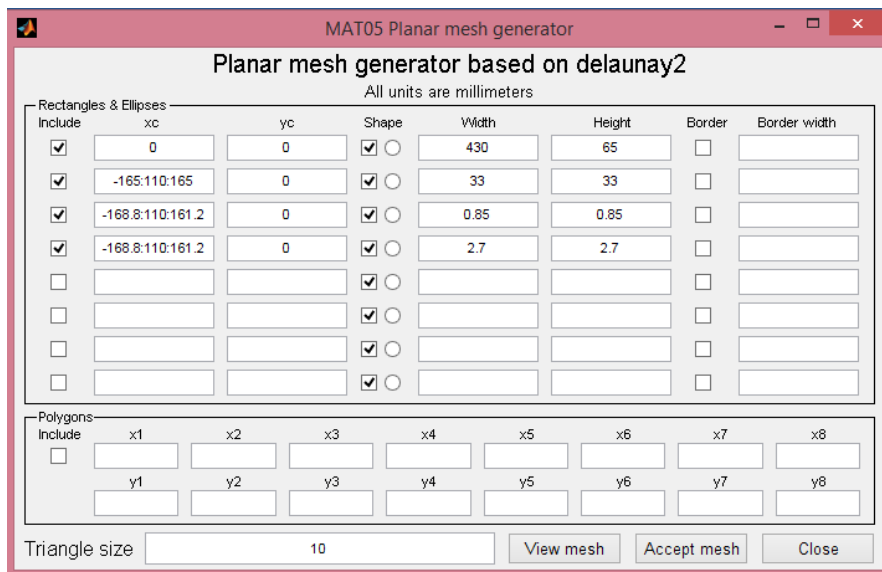


Figura 52. Ventana para generar estructura en 2D caso d=110 mm

Se muestra en la Figura 53 Figura 48 la estructura generada, al igual que en el caso anterior, se trata de un array de 4 elementos, esta vez separados 110 mm.

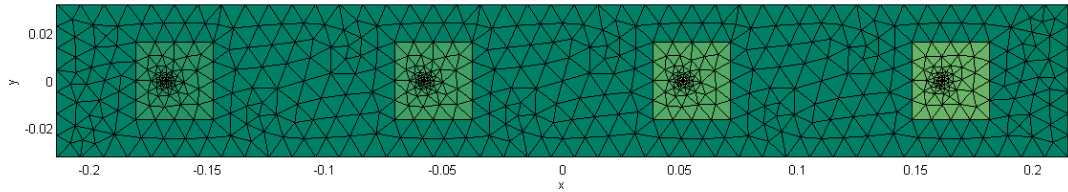


Figura 53. Estructura 2D array 4x1 $d=110$ mm. El plano de masa es de 430 x 65 mm. El sustrato dieléctrico es de 1.52 mm y tiene la misma dimensión que el plano de masa. Los parches están sobre el sustrato dieléctrico

En la Figura 54 se muestra el diagrama de radiación en el plano XZ. Se puede observar como la directividad toma un valor de 9.62 dB.

Además, en la Figura 55 se muestra el plano YZ del diagrama de radiación.

Finalmente, el diagrama de radiación en 3D del array 4x1 con una separación entre elementos de 110 mm se muestra en la Figura 56.

Se puede observar que al aumentar la distancia de separación de 100 mm a 110 mm ha disminuido la directividad de 10.09 dB a 9.62 dB.

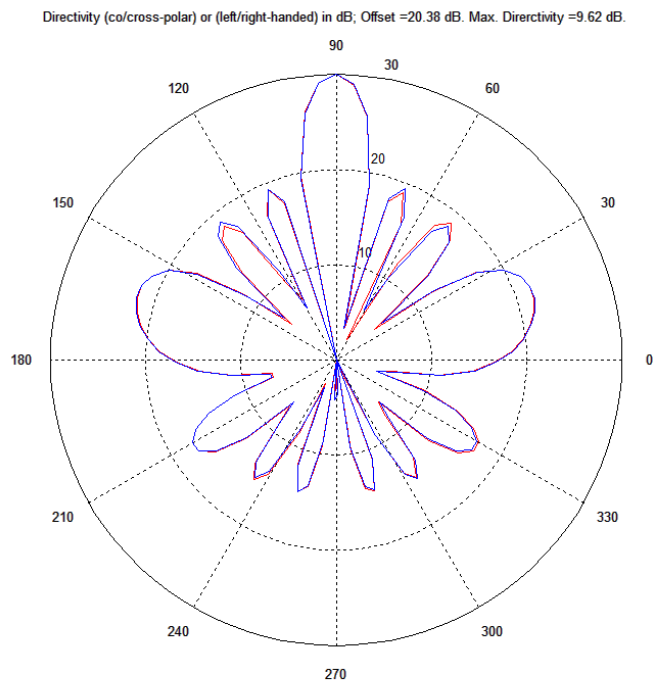


Figura 54. Diagrama de radiación plano XZ caso $d=110$ mm

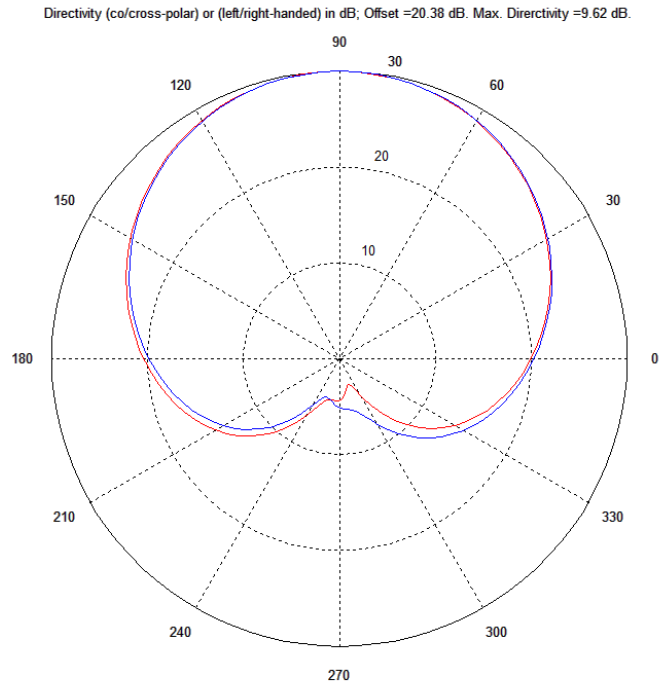


Figura 55. Diagrama de radiación plano YZ caso d=110 mm

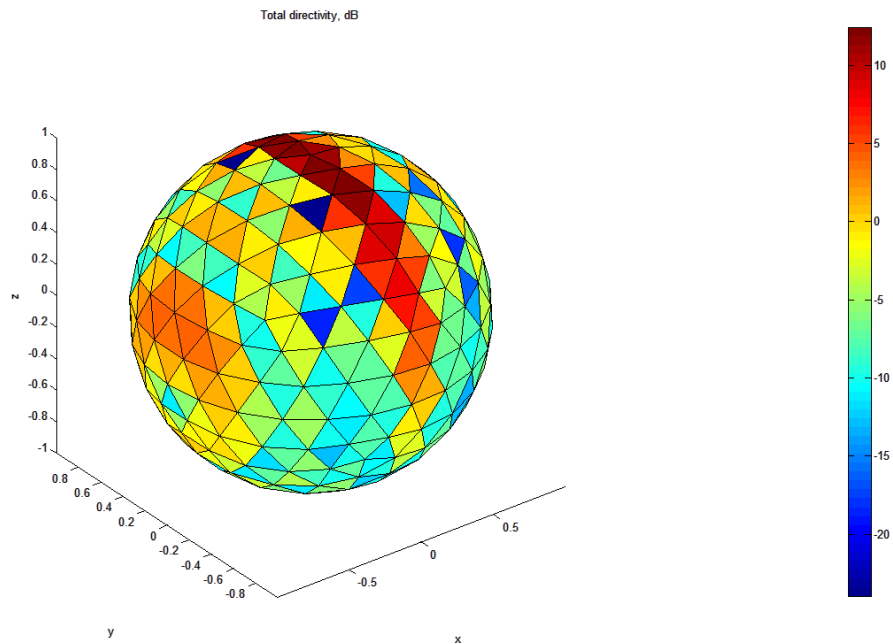


Figura 56. Diagrama de radiación 3D caso d=110 mm

4.2.5 Caso d = 130 mm

Al igual que se ha realizado en los casos anteriores, en primer lugar se ejecuta el archivo struct2d.m.

Tras ejecutar este archivo, aparece la ventana que se observa en la Figura 57. En esta ventana se han incluido los datos necesarios para crear un array 4x1 donde el centro de cada uno de los elementos está separado

130 mm del otro. Las pautas para calcular los puntos a incluir son las que se han explicado en la introducción.

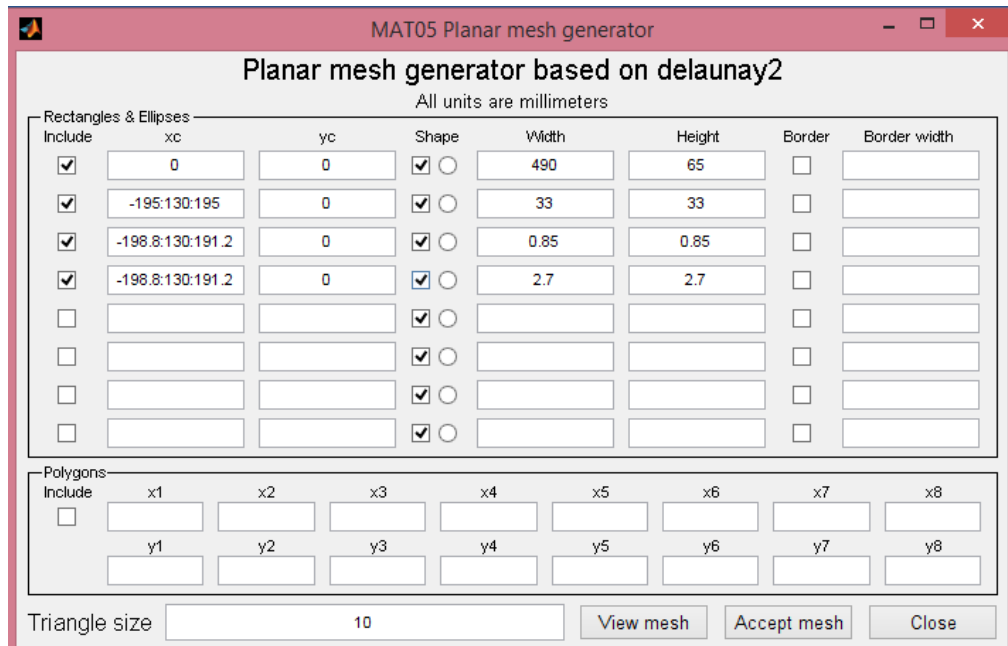


Figura 57. Ventana para generar estructura en 2D caso d=130 mm

Se muestra en la Figura 58 la estructura generada, al igual que en el caso anterior, se trata de un array de 4 elementos, esta vez separados cada uno de ellos 130 mm.

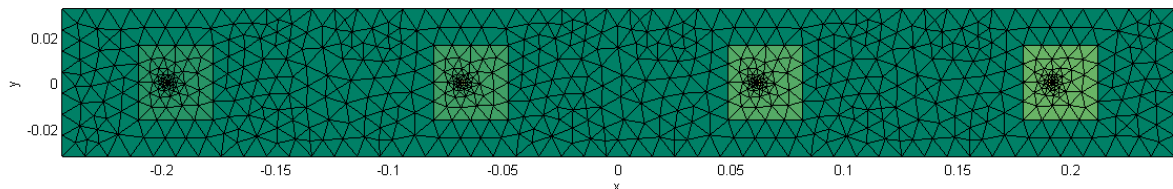


Figura 58. Estructura 2D array 4x1 d=130 mm. El plano de masa es de 490 x 65 mm. El sustrato dieléctrico es de 1.52 mm y tiene la misma dimensión que el plano de masa. Los parches están sobre el sustrato dieléctrico

En la Figura 59 se muestra el diagrama de radiación en el plano XZ. Se puede observar como la directividad toma un valor de 8.11 dB.

Además, en la Figura 60 se muestra el plano YZ del diagrama de radiación.

Finalmente, el diagrama de radiación en 3D del array 4x1 con una separación entre elementos de 130 mm se muestra en la Figura 61.

Se puede observar que al aumentar la distancia de separación de 110 mm a 130 mm ha disminuido la directividad de 9.62 dB a 8.11 dB.

Por tanto, a partir de d=100 mm cada vez que se ha aumentado la distancia de separación entre centros se ha ido perdiendo directividad.

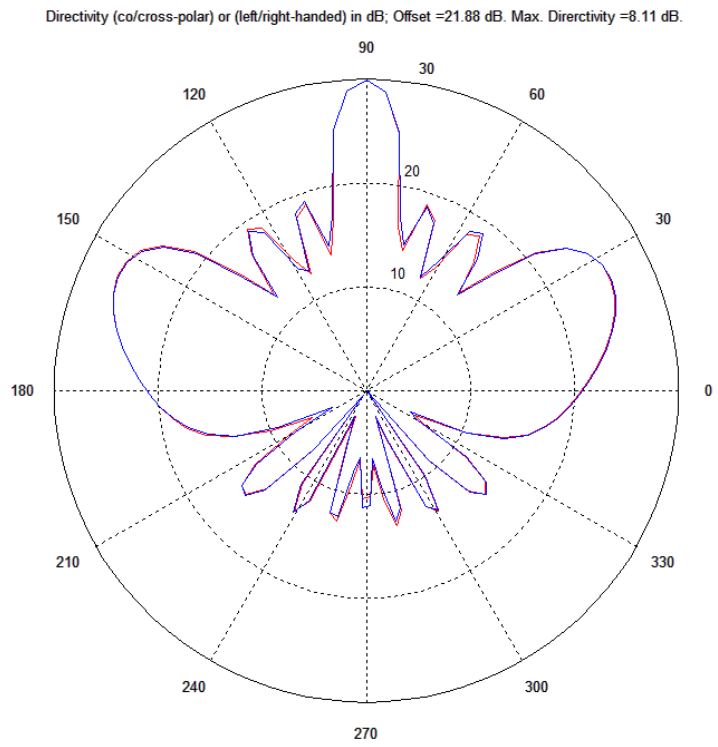


Figura 59. Diagrama de radiación plano XZ caso d=130 mm

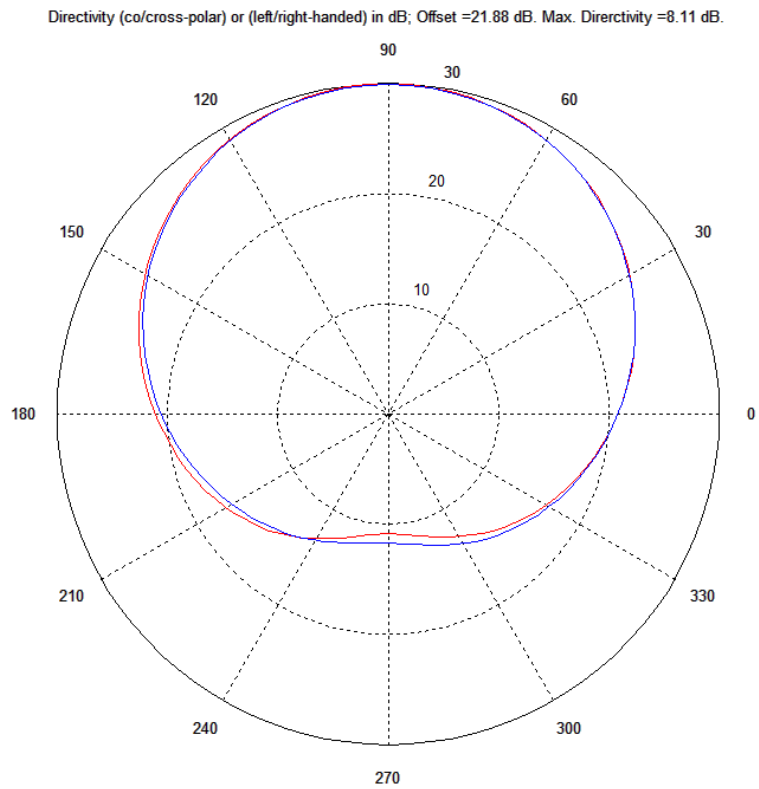


Figura 60. Diagrama de radiación plano YZ caso d=130 mm

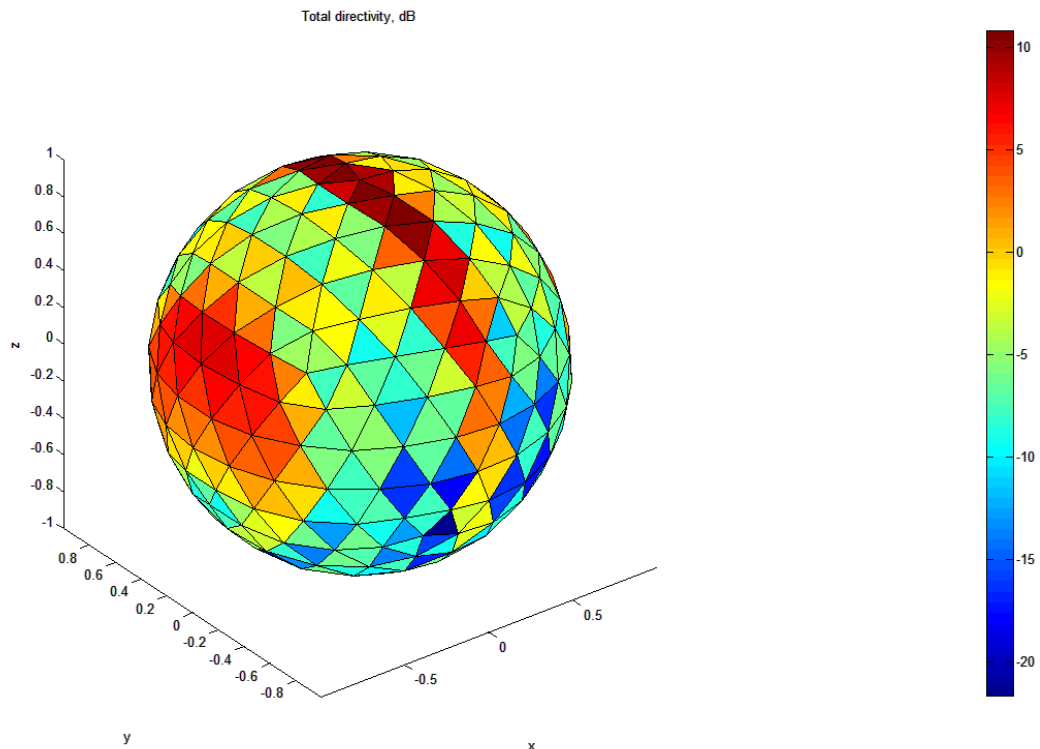


Figura 61. Diagrama de radiación 3D caso d=130 mm

Para concluir el apartado, se resumen en la siguiente tabla los valores de directividad que se ha conseguido para cada uno de los casos anteriores.

Caso de estudio	Directividad (dB)
Array 4x1 d=75 mm	9.56
Array 4x1 d=100 mm	10.09
Array 4x1 d=110 mm	9.62
Array 4x1 d=130 mm	8.11

Se deduce de los resultados anteriores que la mejor opción es separar los centros de los parches una distancia de d=100 mm. Esta es la distancia que se utilizará para separar los centros en los siguientes casos de estudio.

Para que no aparezcan lóbulos de difracción se debe cumplir lo siguiente de forma aproximada:

$$d < \lambda \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right)$$

Para el caso de estudio, N=4, $\lambda=125$ mm, se obtiene una distancia de 93 mm, por lo que se cumple en los casos anteriores que para una distancia de 110 y 130 mm comienzan a aparecer lóbulos de difracción muy grandes, más que los lóbulos secundarios.

4.3 Resultados obtenidos para array 6x1 y distancia óptima

Una vez obtenida la distancia óptima de separación entre elementos de las simulaciones anteriores, $d=100$ mm, en este apartado se estudiará el caso de aumentar el número de elementos de 4 a 6.

Como se ha estudiado en la teoría de agrupación, al aumentar el número de elementos de un array aumenta su directividad. A continuación se comprobará si se cumple esta afirmación.

En primer lugar, como se ha realizado en cada uno de los casos anteriores, se ejecuta el archivo struct2d.m. Al ejecutarlo se muestra la ventana que se puede observar en la Figura 62.

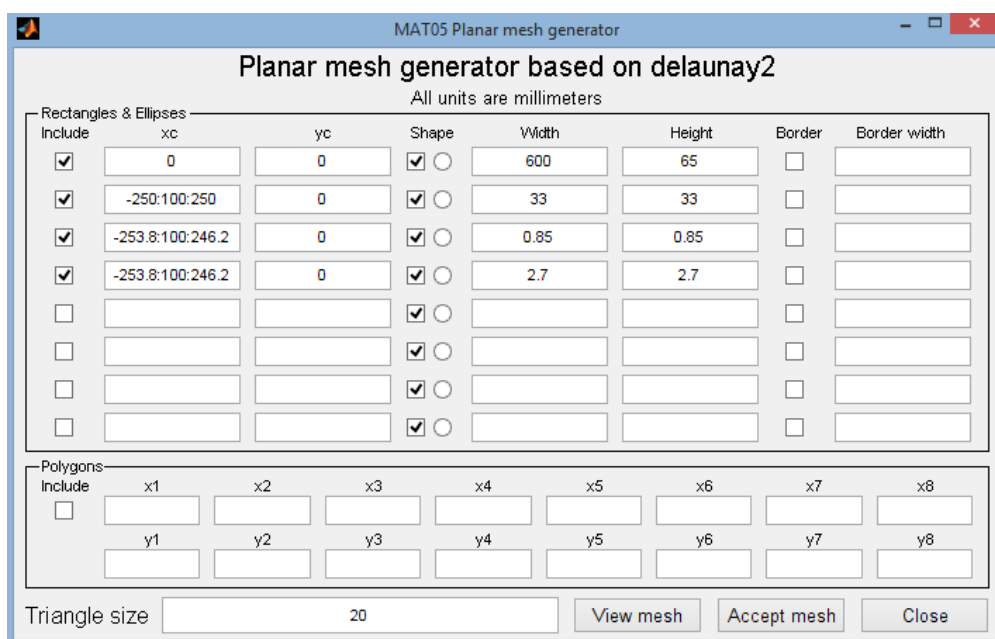


Figura 62. Ventana para generar estructura en 2D array 6x1 $d=100$ mm

Una vez generada, se observa la estructura diseñada en la Figura 63.

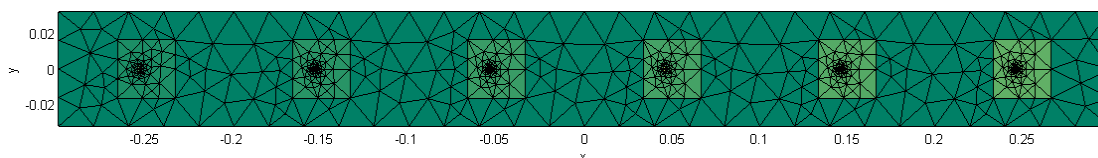


Figura 63. Estructura 2D array 6x1 $d=100$ mm. El plano de masa es de 600 x 65 mm. El sustrato dieléctrico es de 1.52 mm y tiene la misma dimensión que el plano de masa. Los parches están sobre el sustrato dieléctrico

A continuación, se ejecutarán los archivos direct0.m y direct90.m para generar los diagramas de radiación tanto en el plano XZ como en el YZ, respectivamente.

En la Figura 64 se muestra el diagrama de radiación en el plano XZ. Se observa un diagrama de radiación mucho más directivo que en los casos que se han estudiado anteriormente. Además, se puede observar en la Figura 65 el diagrama de radiación en el plano YZ.

Finalmente, se observa el diagrama de radiación en 3 dimensiones en la Figura 66, en esta figura también se observa que el patrón es mucho más directivo que en los casos anteriores cuando el array estaba formado por 4 elementos.

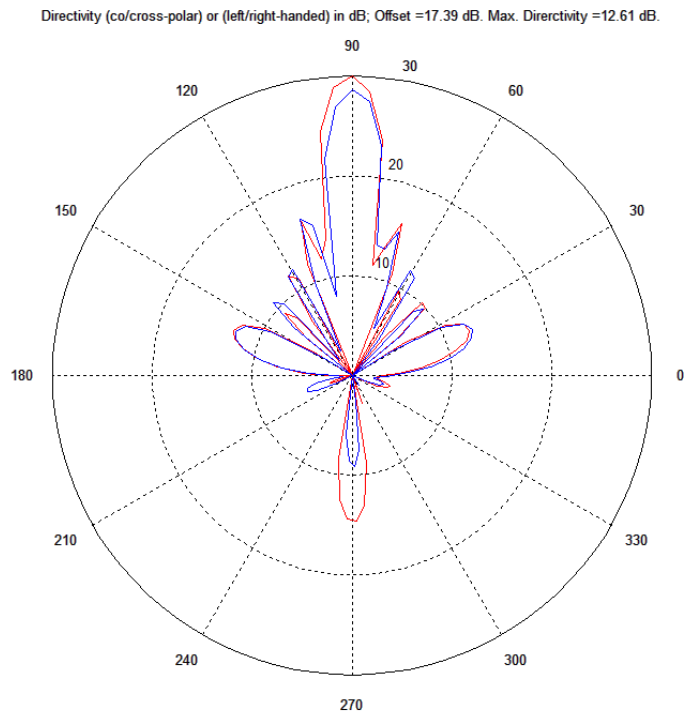


Figura 64. Diagrama de radiación array 6x1 plano XZ d=100 mm

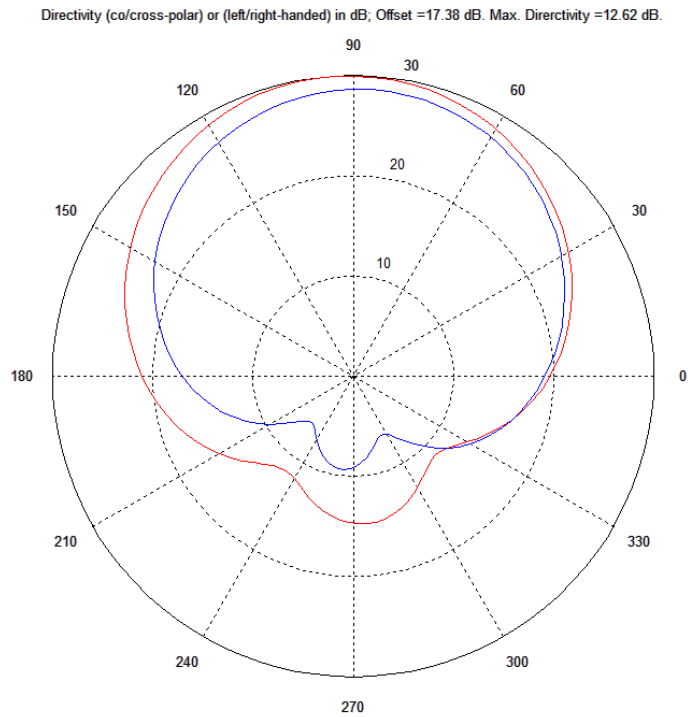


Figura 65. Diagrama de radiación array 6x1 plano YZ d=100 mm

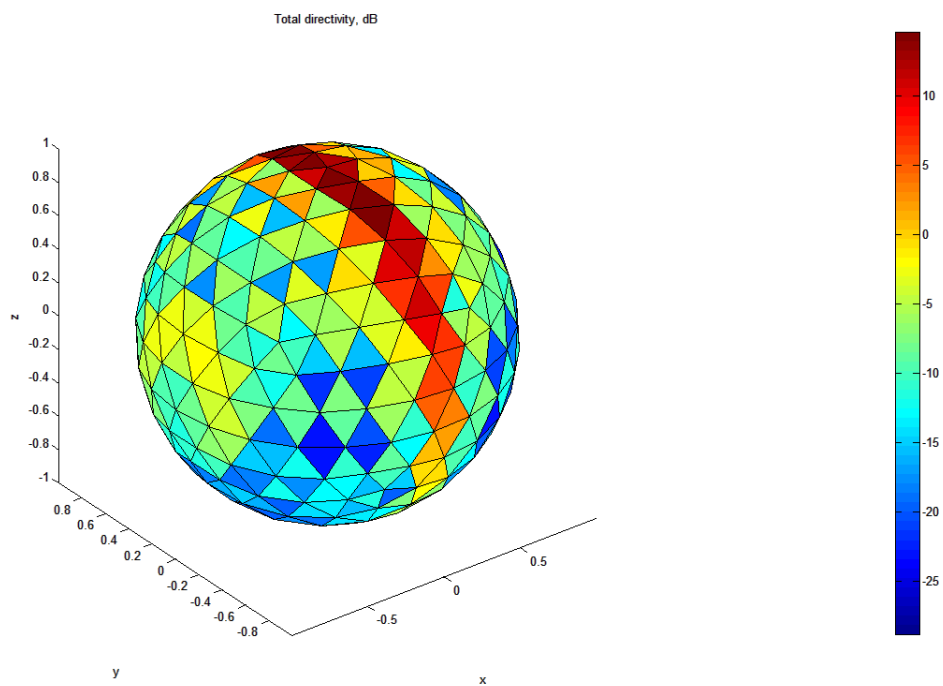


Figura 66. Diagrama de radiación array 6x1 3D d=100 mm

En la siguiente tabla se observa la directividad obtenida para el array de 4 elementos y para el array de 6 elementos.

Caso de estudio	Directividad (dB)
Array 4x1 d=100 mm	10.09
Array 6x1 d=100 mm	12.62

Se puede comprobar que, efectivamente, la directividad aumenta al aumentar el número de elementos, como indica la teoría de agrupación.

4.4 Conclusiones

A lo largo de todo el capítulo se han estudiado distintos casos de separación entre elementos para elegir la distancia óptima entre los mismos.

Tras todas las simulaciones se ha determinado que la distancia óptima de separación es 100 mm, una distancia menor que λ , la longitud de onda, para evitar lóbulos de difracción. Para los casos en los que la distancia vale 110 y 130 mm, entran en el margen visible los lóbulos de difracción y es un aspecto no deseable para un diseño correcto.

Posteriormente y para finalizar el capítulo, se ha realizado la simulación del array aumentando el número de elementos de 4 a 6, para estudiar cómo varía la directividad del array si se aumentan los elementos.

Tal y como muestra la teoría de agrupaciones y se ha discutido en el punto **“2.4 Agrupación de antenas”**, la directividad del array aumenta al aumentar el número de elementos y se ha pasado de tener una directividad de 10.09 dB en el caso de 4 elementos a una directividad de 12.62 dB para el caso de 6 elementos.

La mayoría de las veces aumentar el número de elementos es la solución para conseguir un aumento de la directividad, sin embargo, este aumento está limitado por espacio (los dispositivos actuales son muy pequeños y mientras más elementos tenga el array mayor será el tamaño que necesitará dentro del dispositivo) y por precio, mientras más elementos tenga el array mayor será el coste del mismo.

5. Análisis de un array con configuración 2D

5.1 Introducción

En este capítulo se realizará un estudio de un array con los elementos colocados en dos dimensiones.

La distancia entre elementos será la distancia óptima que se ha calculado en el capítulo anterior, para conseguir maximizar la directividad. Por lo tanto, para todo el capítulo se tendrá en cuenta que $d=100$ mm.

Los casos de estudio que se han elegido son:

- Array 2x2 con los elementos separados una distancia $d=100$ mm.
- Array 3x2 con los elementos separados una distancia $d=100$ mm.

5.2 Estudio de array 2x2

En primer lugar, como se ha realizado en cada uno de los casos del capítulo anterior, se ejecuta el archivo struct2d.m. Al ejecutarlo se muestra la ventana que se puede observar en la Figura 67.

Los valores que se han introducido en las distintas celdas se han calculado siguiendo los pasos que se detallaron en el capítulo anterior. Sin embargo, en este capítulo se incluyen elementos tanto en el eje x como en el eje y, por lo que además de variar el eje x habrá que variar de la misma forma el eje y. La nomenclatura para definir el array es la misma independientemente del eje del que se trate.

El resultado de esta configuración se puede observar en la Figura 68. Como se puede observar, la configuración se ha realizado correctamente tal y como se deseaba y la estructura creada en 2 dimensiones es la estructura objetivo.

A continuación, se muestra en la Figura 69 el diagrama de radiación en el plano XZ, correspondiente a $\Phi=0^\circ$. Se observa un lóbulo principal y dos lóbulos secundarios.

Además, en Figura 70Figura 76 se muestra el diagrama de radiación en el plano YZ, correspondiente a $\Phi=90^\circ$, igualmente, se observan en la imagen un lóbulo principal y dos secundarios.

Finalmente, en la Figura 71 se puede observar el diagrama de radiación en 3 dimensiones del array 2x2.

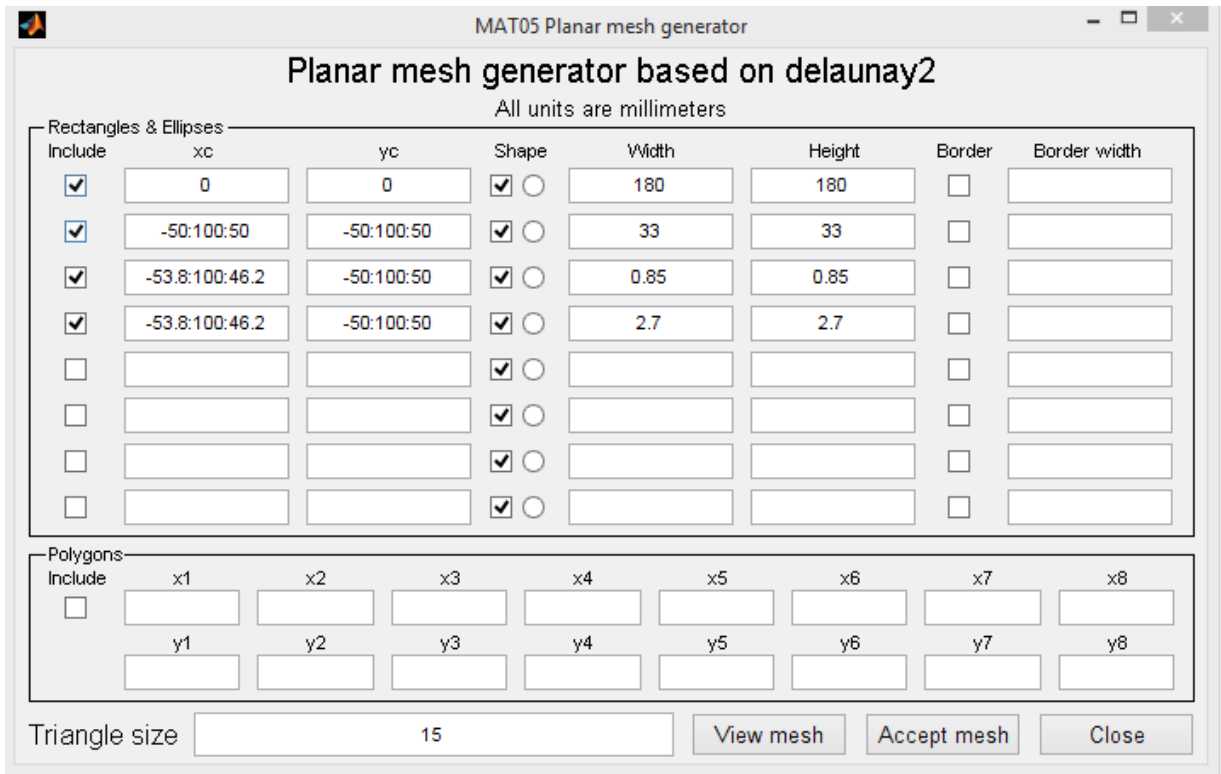


Figura 67. Ventana para definir array 2x2 d=100 mm

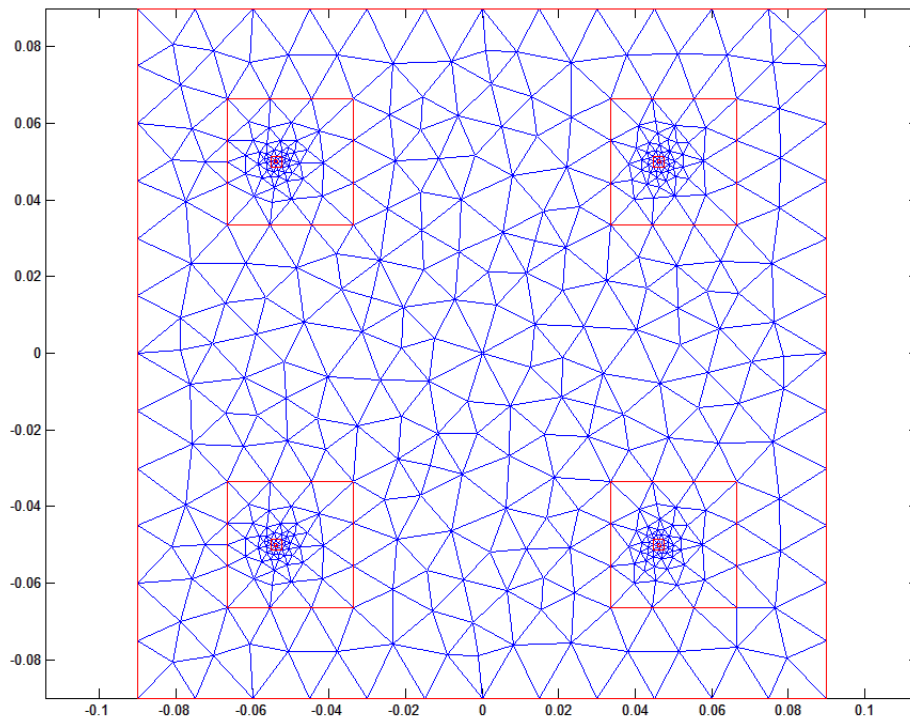


Figura 68. Resultado array 2x2 d=100 mm

Directivity (co/cross-polar) or (left/right-handed) in dB; Offset =18.79 dB. Max. Directivity =11.18 dB

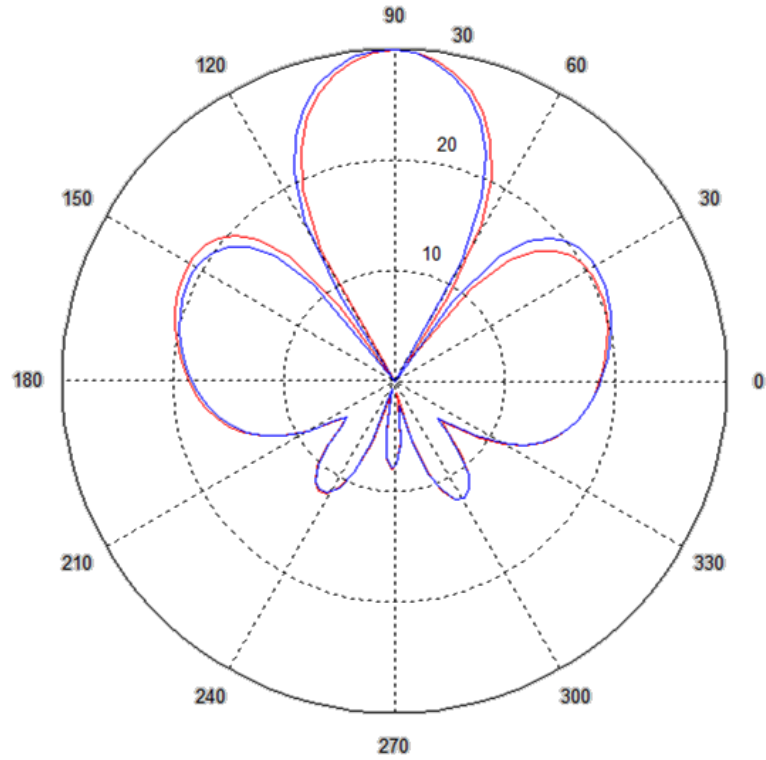


Figura 69. Diagrama de radiación array 2x2 plano XZ d=100 mm

Directivity (co/cross-polar) or (left/right-handed) in dB; Offset =18.79 dB. Max. Directivity =11.18 dB.

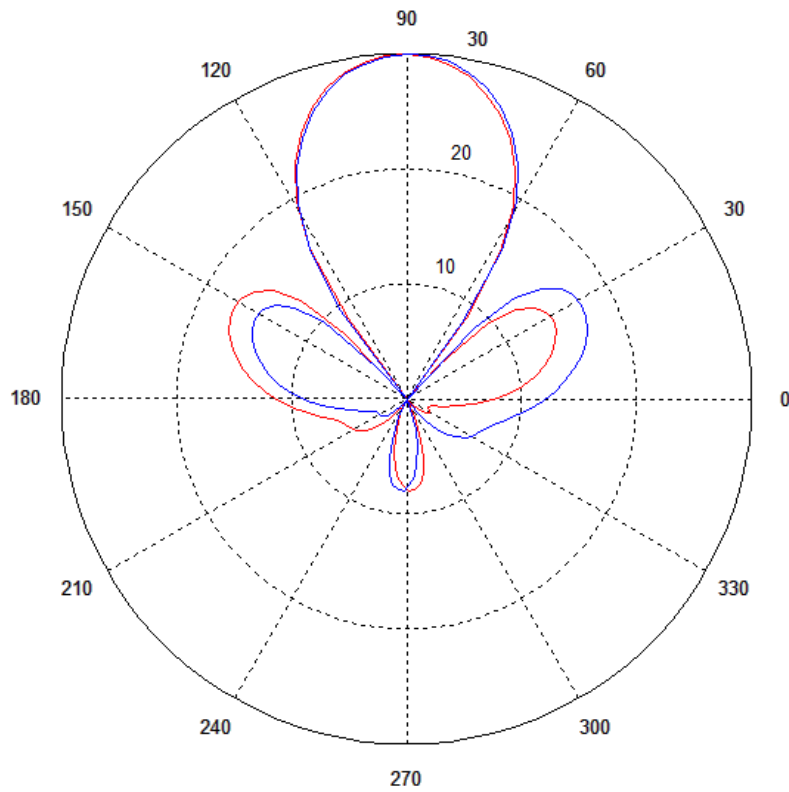


Figura 70. Diagrama de radiación array 2x2 plano YZ d=100 mm

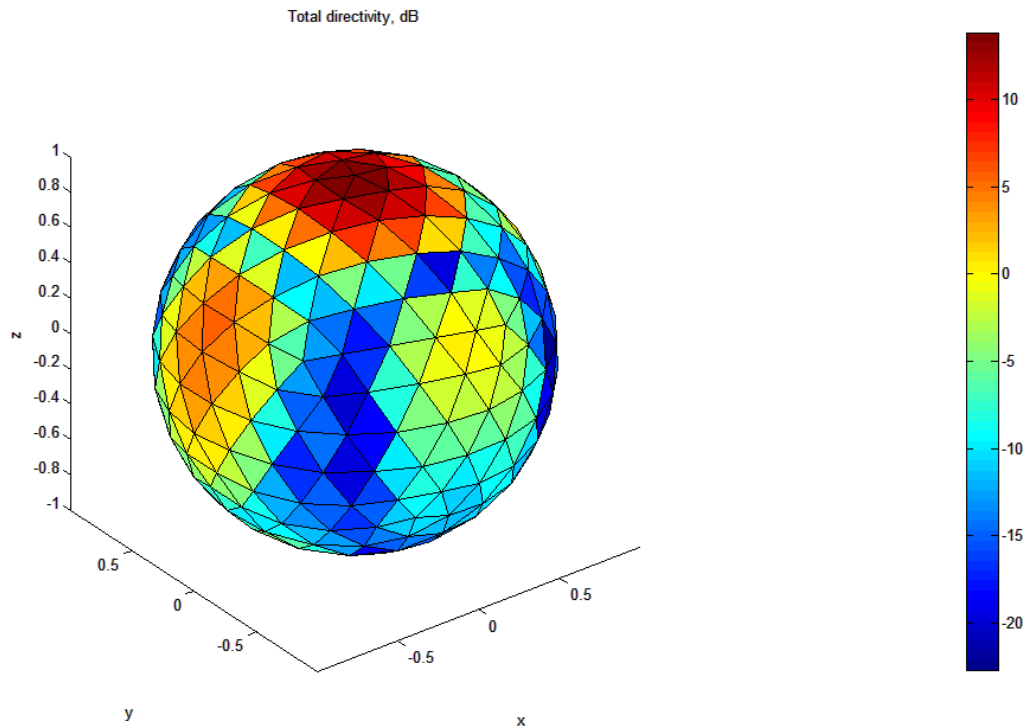


Figura 71. Diagrama de radiación 3D array 2x2 d=100 mm

5.3 Estudio de array 3x2

Al igual que se ha realizado en el caso anterior, en primer lugar se ejecuta el archivo struct2d.m. Al ejecutarlo se muestra la ventana que se puede observar en la Figura 72.

Los valores que se han introducido en las distintas celdas se han calculado siguiendo los pasos del punto anterior. En la Figura 73 se muestra la estructura del array y se puede comprobar que es la estructura deseada.

Además, en la Figura 74 se muestra a estructura del array en 3 dimensiones. Se puede comprobar que tanto la distribución de los parches en el array como el espesor y el plano de tierra son correctos.

En la Figura 75 se muestra el diagrama de radiación en el plano XZ para el array 3x2 con una separación entre elementos de 100 mm. Se puede observar un lóbulo principal y los lóbulos secundarios muy atenuados. La directividad total obtenida es de 12.07 dB, similar a lo que obteníamos en el caso del array 6x1.

Sin embargo, en la Figura 76 se muestra el diagrama de radiación en el plano YZ. En este caso se observa un mejor comportamiento que en el caso anterior, ya que el lóbulo principal es mucho más directivo. En la Figura 1Figura 77 se muestra el diagrama de radiación en 3D de la estructura diseñada.

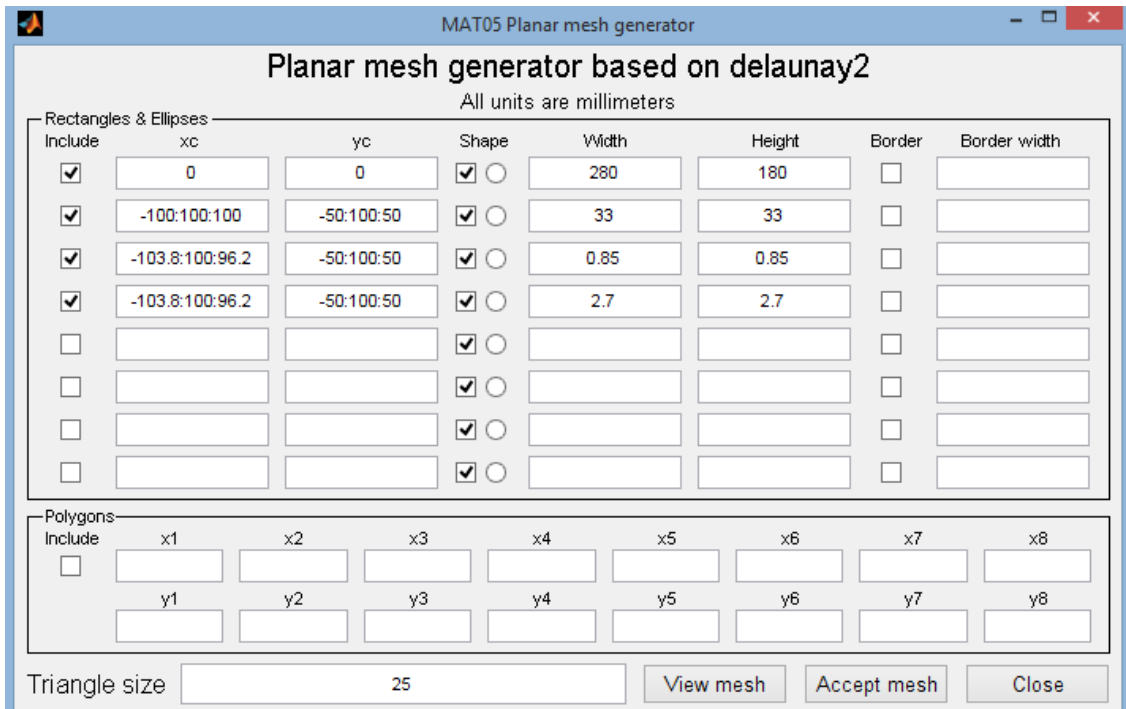


Figura 72. Ventana para definir array 3x2 d=100 mm

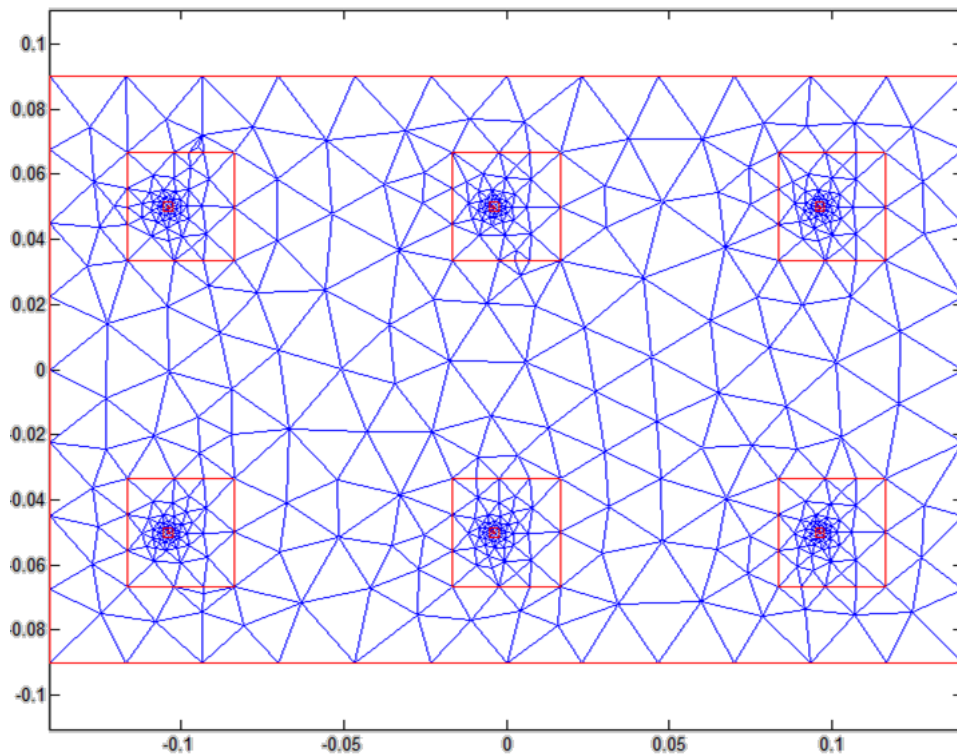


Figura 73. Resultado array 3x2 d=100 mm

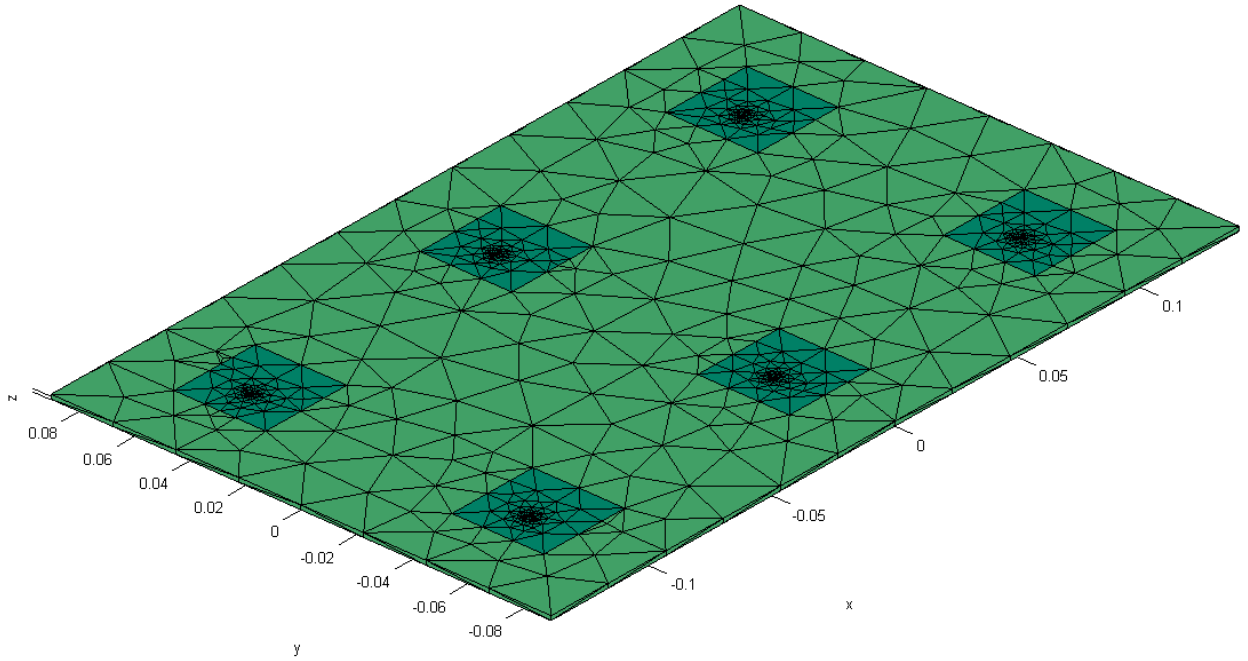


Figura 74. Resultado array 3x2 en 3D $d=100$ mm. El plano de masa es de 280 x 180 mm. El sustrato dieléctrico es de 1.52 mm y tiene la misma dimensión que el plano de masa. Los parches microstrip están impresos sobre el sustrato dieléctrico

Directivity (co/cross-polar) or (left/right-handed) in dB; Offset =17.92 dB. Max. Directivity =12.07 dB.

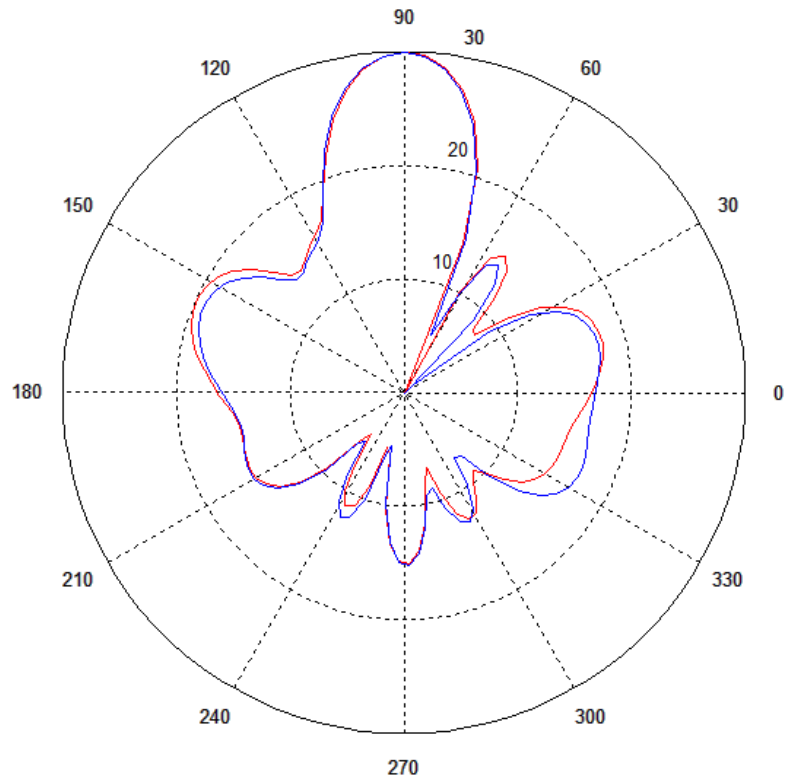


Figura 75. Diagrama de radiación array 3x2 plano XZ $d=100$ mm

Directivity (co/cross-polar) or (left/right-handed) in dB; Offset =17.92 dB. Max. Directivity =12.07 dB.

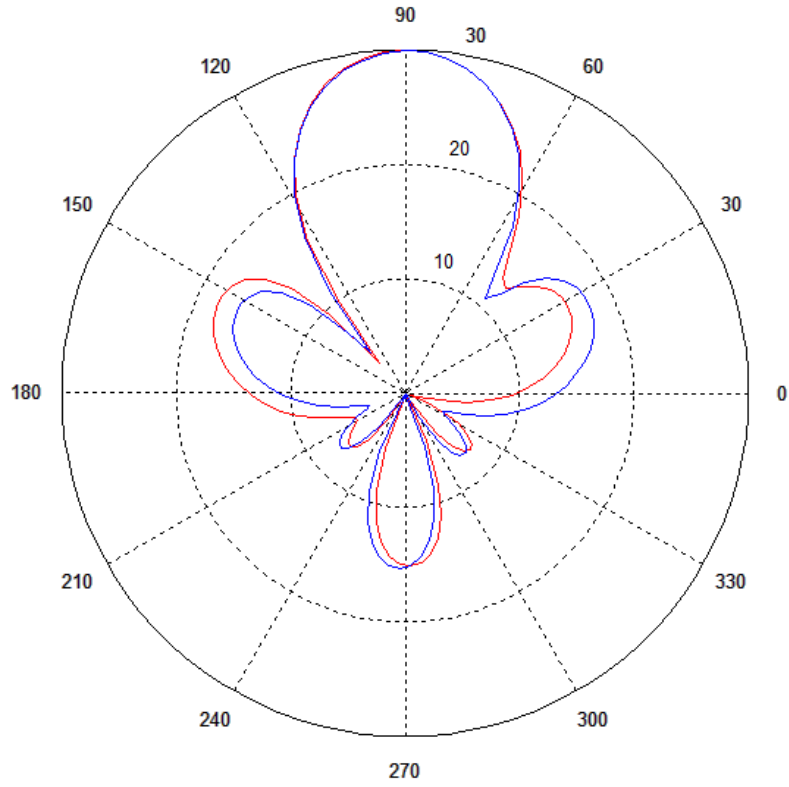


Figura 76. Diagrama de radiación array 3x2 plano YZ d=100 mm

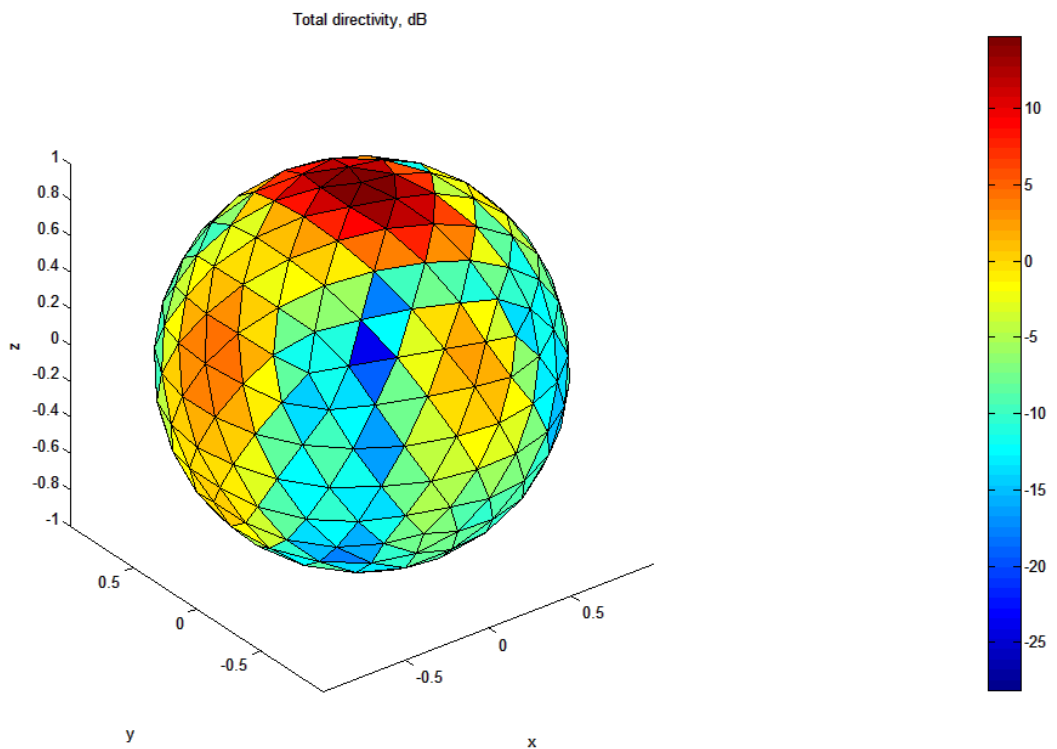


Figura 77. Diagrama de radiación 3D array 3x2 d=100 mm

A continuación, se muestra en la Figura 78 la ventana para seleccionar el tipo de campo a mostrar.

En la Figura 79 se muestra el campo eléctrico y en la Figura 80 el campo magnético.

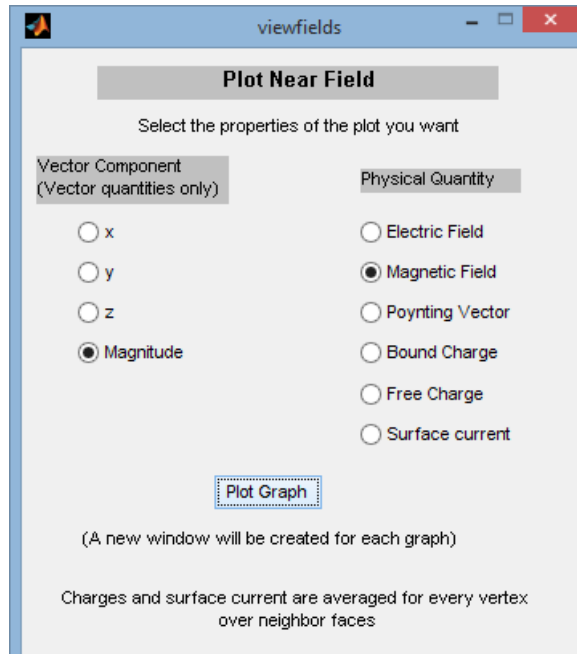


Figura 78. Ventana para seleccionar campo cercano

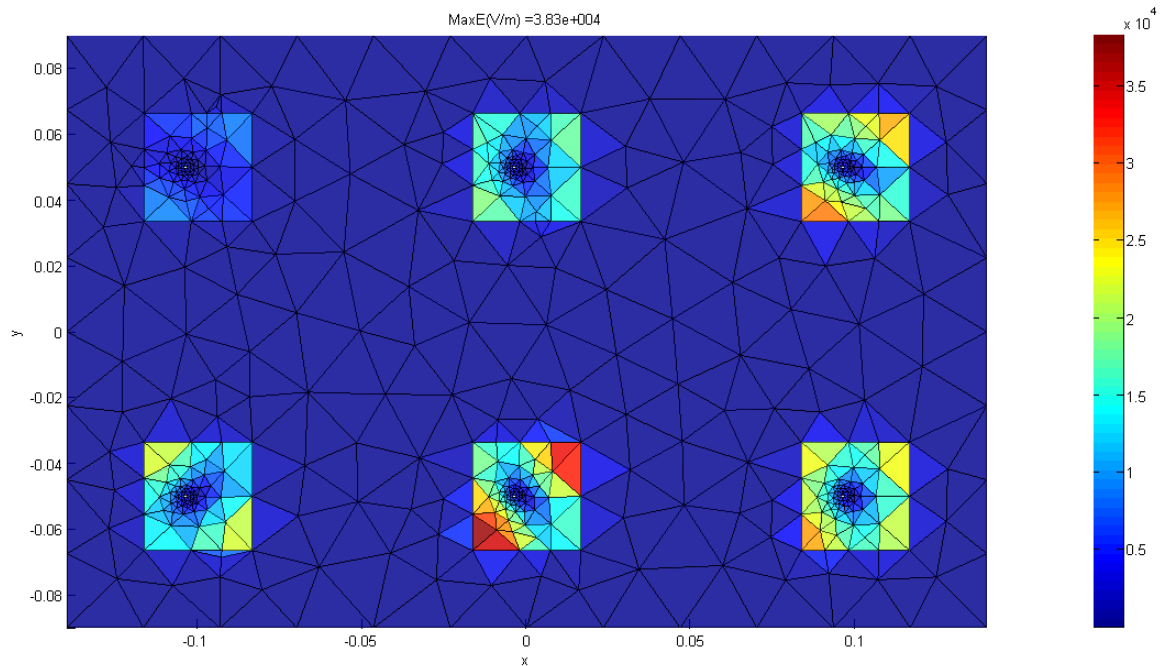


Figura 79. Resultado campo eléctrico array 3x2 d=100 mm

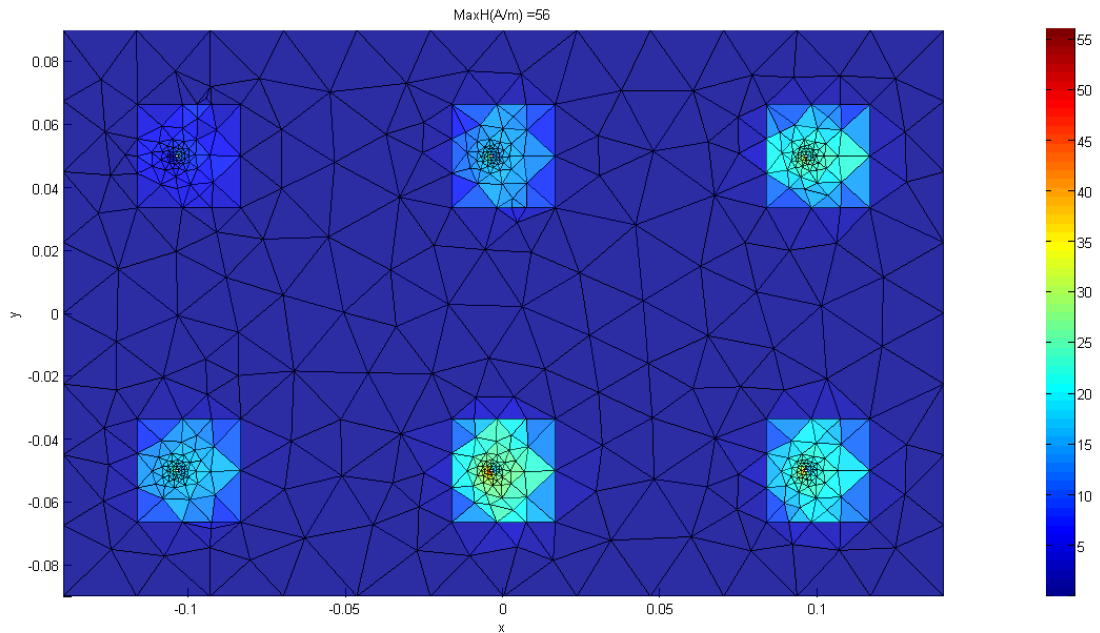


Figura 80. Resultado campo eléctrico array 3x2 d=100 mm

5.4 Conclusiones

Para concluir este apartado se muestra una tabla resumen con todos los resultados obtenidos durante la realización del trabajo. Además, se muestra en la última columna el tiempo de computación para cada uno de los casos de estudio. Las distintas simulaciones se han realizado utilizando un PC con procesador Intel® Core™ i5-5300U CPU @2.30GHz 2.29 GHz y memoria RAM de 4 GB, con SO Windows 8.1.

Caso de estudio	Directividad (dB)	Tiempo de computación (minutos)
Array 4x1 d=75 mm	9.56	220
Array 4x1 d=100 mm	10.09	265
Array 4x1 d=110 mm	9.62	288
Array 4x1 d=130 mm	8.11	300
Array 6x1 d=100 mm	12.61	330
Array 2x2 d=100 mm	11.18	235
Array 3x2 d=100 mm	12.07	273

El mejor resultado desde el punto de vista de la directividad es el array de 6 elementos dispuestos en una dimensión analizado en el punto 3.3. Además, se obtienen lóbulos secundarios de menor valor, lo cual es muy deseable para este tipo de diseños.

El diseño bidimensional ofrece una gran ventaja frente al diseño en 1 dimensión y es que se comporta mucho mejor en ambos planos de radiación, tanto en el plano XZ como en el YZ. Como se puede observar en la Figura 65, el diagrama de radiación en el plano YZ para el array de 6 elementos el lóbulo principal es muy poco directivo, por lo que si se desea tener un lóbulo principal más directivo para aprovechar la máxima potencia en la dirección deseada, una posible solución es utilizar arrays bidimensionales, ya que como se puede observar en la Figura 70 muestra un lóbulo principal mucho más directivo que en el caso anterior.

6. Conclusiones

Se ha conseguido realizar un estudio de las distintas configuraciones de array propuestas inicialmente, pudiendo analizar qué factores influyen en el diseño de antenas de parche y arrays de las mismas. Uno de los factores más importantes a tener en cuenta en el diseño de antenas de parche es el espesor del parche y la posición de la sonda de alimentación. La técnica que se ha utilizado es optimizar la posición de la misma para conseguir un coeficiente de reflexión S_{11} mínimo, aumentando la eficiencia de la antena disminuyendo las pérdidas.

Desde el punto de vista de la agrupación de antenas se ha trabajado optimizando la distancia de separación entre los distintos parches. La distancia óptima es la que mayor directividad de la agrupación ofrece y, además, menor efecto de lóbulos de difracción. La distancia de separación entre parches óptima obtenida ha sido 100 mm.

No se ha logrado el diseño de arrays 8×1 por limitaciones del software, es algo que queda pendiente para la continuación del trabajo. Habría sido muy interesante para ver cómo seguía mejorando la directividad al seguir aumentando elementos en la agrupación.

En un futuro se podría seguir modificando el código para modificar la amplitud y fase de excitación de cada uno de los parches, consiguiendo orientar el lóbulo principal en la dirección deseada.

7. Bibliografía

A continuación, se incluyen todas las referencias que se han utilizado durante el trabajo y el desarrollo de la memoria.

1. Sergey N. Makarov, *Antenna and EM Modeling with MATLAB*, John Wiley & Sons, inc., New York, 2002.
2. <http://ece.wpi.edu/mom/index.html>, 08/10/2017.
3. Constantine A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd ed., New York, Wiley, 1997.
4. A. Natarjan, A. Komijani, and A. Hajimiri, A fully integrated 24-GHz phased array transmitter in CMOS, *IEEE*, Dec. 2005.
5. R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, *Microstrip Antenna Design Handbook*. Norwood, MA: Artech House, 2001.
6. J. Anguera, C. Puente, and C. Borja, "A Procedure to Design Wide-Band Electromagnetically-Coupled Stacked Microstrip Antennas Based on a Simple Network Model". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. II, pp.944-947, Orlando, USA July 1999.
7. J. Anguera, C. Puente, and C. Borja, "Dual Frequency Broadband Microstrip Antenna With a Reactive Loading and Stacked Elements", *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 10, 1-10, 2009.
8. Asha E. Daniel and Girish Kumar "Tuneable Dual and Triple Stub Loaded", *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol.AP-48, no. 7, pp.1026-1039, July 2000.
9. J. M. J. W. Jayasinghe, J. Anguera, and D.N. Uduwawala, "A simple design of multi band microstrip patch antennas robust to fabrication tolerances for GSM, UMTS, LTE, and Bluetooth applications by using genetic algorithm optimization" *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 27, 255-269, 2012.
10. J. M. J. W. Jayasinghe, Jaume Anguera, and D.N. Uduwawala, "Genetic Algorithm Optimization of a High-Directivity Microstrip Patch Antenna Having a Rectangular Profile", *Radioengineering*, Vol. 22, No. 3, September 2013, pp.700-707.
11. S.Maci and G.Biffi Gentili. "Dual Frequency Patch Antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol.39, no.6, December 1997.

12. C. Puente, J. Anguera, C. Borja, "Dual-band dual-polarized antenna array", US Pat. 6,937,206.
13. C. Puente, E. Rozan, J. Anguera, "Space-filling miniature antennas", US Pat. 7,202,822.
14. Jaume Anguera, Carles Puente, Carmen Borja, Raquel Montero, and Jordi Soler, "Small and High Directivity Bowtie Patch Antenna based on the Sierpinski Fractal", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.31, no. 3, pp.239-241, Nov 2001.
15. Jaume Anguera, Jean-Pierre Daniel, Carmen Borja, Josep Mumbrú, Carles Puente, Tiphaine Leduc, Nancy Laeveren, and Peter Van Roy, "Metallized Foams for Fractal-Shaped Microstrip Antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol.50, no. 6, Dec. 2008, pp.20-38.
16. Choon Sae Lee, Vahakn Nalbandian, and Felix Schwering, "Planar Dual-Band Microstrip Antenna". *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. 43, n^o. 8, pp.892-894, Aug. 1995.
17. B.F.Wang and Y.T.Lo, "Microstrip antennas for dual-frequency operation", *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol.AP-32, pp.938-943, Sept. 1984.

8. Anexos

8.1 Código de direct0.m

```
%direct0.m - radiations patterns, total radiated power
%
% Syntax:
%   radpattern
%
% Description:
%   RADPATTERN should be run after IMPEDANCE. It uses the MoM
soulution
%   obtained previously in order to compute the far fields.
RADPATTERN
%   finds the far field at a given frequency that needs to be
specified
%   below.Also, the observation sphere(radius) or circle
(radius/plane)
%   need to be specified as well.
%
%   RADPATTERN finds:
%
%   - total radiated power over a large sphere (sphere mesh is
given in subfolder CODES)
%   - antenna gain or absolute directivity in certain planes,
including
%   co-polar field and cross-polar field.
%
% MATLAB Antenna Toolbox Draft 05, Antenna Lab, ECE, WPI,
mat05@ece.wpi.edu
% Authors: S. Kulkarni, A. Marut, S. Makarov

clear all;
s   = pwd; addpath(s);
s   = regexprep(s, '3_mom$', '3_mom/codes'); addpath(s);
load out;

cd ..
load  ('2_basis/basis');
cd    ('3_mom/');

if isempty(geom)
    disp('No metal structure is present. Only eigenmode solution
can be executed');
    return;
end

% Simplest voltage gap feed in the metal (must be present)
Index = FeedIndexes;
if isempty(Index)
    disp('No feed is specified. Only eigenmode solution can be
executed');
    return;
end
```

```

end

% Find the fields
Frequency = 2.40e9;
[dummy, index] = sort(abs(frequency-Frequency));
Frequency = frequency(index(1));
flag = 0; % only scattered field
output = OUTPUT(:, index(1)).';

% Total radiated power (over the sphere of radius r) vs input
(feed) power
R = 1e3; % in m
load sphere;
Points = R*Center;
[E, H, Poynting]= field(geom, GEOM, const, output, Frequency,
Points, flag);
U = R^2*abs(dot(n, Poynting, 1));
RadiatedPower = R^2*sum(abs(dot(n, Poynting)).*Area);
InputPower = FeedPower(index(1));
DirLog = 10*log10(4*pi*U/RadiatedPower);
Efficiency = min(1, RadiatedPower/InputPower)*100;
Difference = abs(RadiatedPower-InputPower)/InputPower
t(4,:) = DirLog;
viewer(p, t);
colorbar; title('Total directivity, dB');

% Define the circle (elevation planes)
theta = linspace(0, 2*pi, 100);
phi = 0; % this is the yz-plane
z = R*cos(theta);
x = R*sin(theta).*cos(phi);
y = R*sin(theta).*sin(phi);
Points = [x; y; z];
[E, H, Poynting]= field(geom, GEOM, const, output, Frequency,
Points, flag);

% Co-polar(Etheta) and cross-polar(Ephi) components
% Right-handed (ER) and left-handed (EL) polarizations
Etheta = E(1,:).*cos(theta).*cos(phi) +
E(2,:).*cos(theta).*sin(phi) - E(3,:).*sin(theta);
Ephi = -E(1,:).*sin(phi) + E(2,:).*cos(phi);
ER = 1/sqrt(2)*(Etheta + j*Ephi);
EL = 1/sqrt(2)*(Etheta - j*Ephi);

b = figure;
Component = ER; % define co-pol/cross-pol
U = R^2*dot(Component, Component, 1)/(2*const.eta);
Direct_1 = 10*log10(4*pi*U/RadiatedPower);
Component = EL; % define co-pol/cross-pol
U = R^2*dot(Component, Component, 1)/(2*const.eta);
Direct_2 = 10*log10(4*pi*U/RadiatedPower);

max1 = round(max(Direct_1)*100)/100 %debugging line
max2 = round(max(Direct_2)*100)/100 %debugging line
max12 = max(max1,max2)

```

```

offset = 17.92; %Modificado
save out_rad theta Direct_1 Direct_2 offset

Direct_1 = Direct_1 + offset;
Direct_2 = Direct_2 + offset;
Direct_1(Direct_1<0) = 0;
Direct_2(Direct_2<0) = 0;

polar(pi/2-theta, Direct_1, 'r');
hold on
polar(pi/2-theta, Direct_2, 'b');
string = 'Directivity (co/cross-polar) or (left/right-handed) in
dB; Offset = ';
string = strcat(string, num2str(offset));
string = strcat(string, ' dB. ');
string = strcat(string, ' Max. Directivity = ');
string = strcat(string, num2str(max12));
string = strcat(string, ' dB. ');
title(string);
grid on

rmpath(s,pwd);

```

8.2 Código de direct90.m

```

%direct90.m - radiations patterns, total radiated power
%
% Syntax:
%   radpattern
%
% Description:
%   RADPATTERN should be run after IMPEDANCE. It uses the MoM
%   solution
%   obtained previously in order to compute the far fields.
RADPATTERN
%   finds the far field at a given frequency that needs to be
%   specified
%   below. Also, the observation sphere(radius) or circle
%   (radius/plane)
%   need to be specified as well.
%
%   RADPATTERN finds:
%
%   - total radiated power over a large sphere (sphere mesh is
%   given in subfolder CODES)
%   - antenna gain or absolute directivity in certain planes,
%   including
%   co-polar field and cross-polar field.
%
% MATLAB Antenna Toolbox Draft 05, Antenna Lab, ECE, WPI,
mat05@ece.wpi.edu
% Authors: S. Kulkarni, A. Marut, S. Makarov

```

```

clear all;
s = pwd; addpath(s);
s = regexprep(s, '3_mom$', '3_mom/codes'); addpath(s);
load out;

cd ..
load ('2_basis/basis');
cd ('3_mom/');

if isempty(geom)
    disp('No metal structure is present. Only eigenmode solution
can be executed');
    return;
end

% Simplest voltage gap feed in the metal (must be present)
Index = FeedIndexes;
if isempty(Index)
    disp('No feed is specified. Only eigenmode solution can be
executed');
    return;
end

% Find the fields
Frequency = 2.40e9;
[dummy, index] = sort(abs(frequency-Frequency));
Frequency = frequency(index(1));
flag = 0; % only scattered field
output = OUTPUT(:, index(1)).';

% Total radiated power (over the sphere of radius r) vs input
(feed) power
R = 1e3; % in m
load sphere;
Points = R*Center;
[E, H, Poynting]= field(geom, GEOM, const, output, Frequency,
Points, flag);
U = R^2*abs(dot(n, Poynting, 1));
RadiatedPower = R^2*sum(abs(dot(n, Poynting)).*Area);
InputPower = FeedPower(index(1));
DirLog = 10*log10(4*pi*U/RadiatedPower);
Efficiency = min(1, RadiatedPower/InputPower)*100;
Difference = abs(RadiatedPower-InputPower)/InputPower
t(4,:) = DirLog;
viewer(p, t);
colorbar; title('Total directivity, dB');

% Define the circle (elevation planes)
theta = linspace(0, 2*pi, 100);
phi = pi/2; % this is the yz-plane
z = R*cos(theta);
x = R*sin(theta).*cos(phi);
y = R*sin(theta).*sin(phi);
Points = [x; y; z];

```

```

[E, H, Poynting]= field(geom, GEOM, const, output, Frequency,
Points, flag);

% Co-polar(Etheta) and cross-polar(Ephi) components
% Right-handed (ER) and left-handed (EL) polarizations
Etheta = E(1,:).*cos(theta).*cos(phi) +
E(2,:).*cos(theta).*sin(phi) - E(3,:).*sin(theta);
Ephi = -E(1,:).*sin(phi) + E(2,:).*cos(phi);
ER = 1/sqrt(2)*(Etheta + j*Ephi);
EL = 1/sqrt(2)*(Etheta - j*Ephi);

b = figure;
Component = ER; % define co-pol/cross-pol
U = R^2*dot(Component, Component, 1)/(2*const.eta);
Direct_1 = 10*log10(4*pi*U/RadiatedPower);
Component = EL; % define co-pol/cross-pol
U = R^2*dot(Component, Component, 1)/(2*const.eta);
Direct_2 = 10*log10(4*pi*U/RadiatedPower);

max1 = round(max(Direct_1)*100)/100 %debugging line
max2 = round(max(Direct_2)*100)/100 %debugging line
max12 = max(max1,max2)

offset = 17.92; %Modificado
save out_rad theta Direct_1 Direct_2 offset

Direct_1 = Direct_1 + offset;
Direct_2 = Direct_2 + offset;
Direct_1(Direct_1<0) = 0;
Direct_2(Direct_2<0) = 0;

polar(pi/2-theta, Direct_1, 'r');
hold on
polar(pi/2-theta, Direct_2, 'b');
string = 'Directivity (co/cross-polar) or (left/right-handed) in
dB; Offset = ';
string = strcat(string, num2str(offset));
string = strcat(string, ' dB. ');
string = strcat(string, ' Max. Direrctivity = ');
string = strcat(string, num2str(max12));
string = strcat(string, ' dB. ');
title(string);
grid on

rmpath(s,pwd);

```