



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

OPTIMIZACIÓN DE SUPERFICIES METAMATERIALES PARA SU  
APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS  
SINTONIZABLES REDUCTORAS DE LA SECCIÓN RECTA  
RADAR

Ismael Hernández Gómez

Tutor: Juan Carlos Iriarte Galarregui

Pamplona, 24 de Julio de 2015





ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

OPTIMIZACIÓN DE SUPERFICIES METAMATERIALES PARA SU  
APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS  
SINTONIZABLES REDUCTORAS DE LA SECCIÓN RECTA  
RADAR

Ismael Hernández Gómez

Tutor: Juan Carlos Iriarte Galarregui

Pamplona, 24 de Julio de 2015

## AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar quiero agradecer a Juan Carlos por darme esta oportunidad de hacer el proyecto final de carrera con él. Gracias por todas las cosas que he aprendido “por tu culpa” a los largo de estos once meses. Gracias también por estar disponible casi las 24 horas del día, 7 días a la semana, no todos los profesores hacen esto. También agradecerte la paciencia que has tenido conmigo y por ser una fuente de esperanza cuando los resultados no acompañaban y tú me animabas a seguir adelante y buscar otras alternativas, aunque pensara que no iba a obtener ningún resultado bueno.

También quiero dar las gracias a todos los profesores que durante estos 6 años me han formado y me han enseñado un poquito de su conocimiento para convertirme en lo que en pocas horas seré, Ingeniero de Telecomunicación. Mención especial a mi tutor de carrera, Javier Navallas por tener que aguantarme estos 6 largos años, por estar disponible para cualquier consulta en cualquier momento. También nombrar a Ramón Gonzalo por hacer que el mundo de las antenas me haya interesado tanto hasta tal punto de hacer este proyecto.

Agradecer a mi compañera y amiga Cristina todo lo que me ha aportado durante estos años. Aunque no lo creas, has sido una fuente de inspiración, me has enseñado a valorar las cosas que tengo y has estado siempre que te he necesitado para hablar, soltar mis frustraciones y darme tu punto de vista de los problemas. Gracias también por tener que aguantarme todos los días y aguantar mis gracias, aunque también te has reído de mí bastantes veces. Espero y deseo que te vaya genial en tu nueva etapa porque realmente te lo mereces.

Tampoco puedo olvidarme de mis compañeros de clase, que tantas cosas hemos vivido, tantas frustraciones pero también muchas alegrías. Nuestro cinéfilo Rubén, nuestro cerebritito Aritz, David y sus paranoias y “la chica” de clase Leyre, han sido 6 años con vosotros y al final se os coge cariño. Que os vaya bien en vuestras vidas.

Gracias Mike por ser el mejor amigo que tengo. Nunca podré olvidar la infinidad de tardes los dos llorando de la risa por cualquier tontería, ni tampoco las charlas psicológicas que tenemos día sí y día también. Aunque seamos tan diferentes parece mentira que seamos tan buenos amigos.

También quiero agradecer a mis padres todo lo que llevan haciendo por mí durante estos 24 años. Muchas veces no valoro todo lo que me dais, pero me doy cuenta que sin vosotros y vuestro apoyo incondicional no sería lo que soy ahora. Tampoco puedo olvidarme de mi hermano Raúl, el chiquitín de la casa, que ya es todo un hombre y que más que un hermano es un amigo, con el que siempre poder contar pase lo que pase.

---

## RESUMEN

---

Una estructura *chessboard* es una superficie metamaterial compuesta por dos tipos de celdas con la que se busca reducir la reducción de la sección recta radar. Esta reducción se consigue generando una interferencia destructiva entre las reflexiones de ambas celdas. Para lograr este objetivo, se puede utilizar celdas PEC (“Perfect Electric Conductor”), que introducen un desfase de  $180^\circ$  a la onda reflejada, y celdas AMC (“Artificial Magnetic Conductor”) las cuales introducen un desfase de  $0^\circ$  para una frecuencia, denominada frecuencia de resonancia. Al combinar estos dos tipos de celdas en una estructura tipo *chessboard* se obtiene interferencia destructiva en una frecuencia. Si se cambia las celdas PEC por otro tipo de celdas AMC, se obtiene una estructura que funciona en dos frecuencias, coincidiendo con las frecuencias de resonancia de los AMC, debido a que los AMC lejos de la frecuencia de resonancia tienen el comportamiento de un PEC. Se puede conseguir que una estructura *chessboard* funcione en un ancho de banda si se conforma esta con dos tipos de AMC que mantengan  $180^\circ$  de diferencia entre sus curvas de fase en un ancho de banda amplio.

En este Proyecto Final de Carrera se propone una mejora de la estructura *chessboard*. Se ha estudiado la viabilidad de hacer sintonizable una estructura variando el valor de la permitividad del sustrato, para poder aumentar el ancho de banda en el que el *chessboard* reduce la sección recta radar. Se ha estudiado también que posibles tecnologías de sintonización se podían implementar, como cristales líquidos o BST.

El proyecto comienza con un estudio de diferentes tipos de AMC para comprobar si existe una relación directa entre cómo de resonantes son las estructuras y cómo afecta el cambio del valor de la permitividad del sustrato a estas celdas, para encontrar la que presente una mayor variación. Una vez escogida la estructura AMC, se ha hecho un estudio para encontrar dos tipos de celdas variando sus parámetros de diseño, con las que obtener interferencia destructiva en un ancho de banda. Una vez obtenidos estos dos AMC, se ha estudiado cuál es el comportamiento de una estructura *chessboard* conformada por estos dos tipos de celdas unitarias, ante un cambio del valor de la permitividad del sustrato.

Una vez que se ha demostrado que al cambiar el valor de la permitividad el rango de frecuencias en el que la estructura reduce la sección recta radar varía, se ha realizado un estudio para poder fabricar, con otro tipo de estructuras AMC, un *chessboard* para dos valores de permitividad, utilizando dos tipos de materiales de distinto valor de permitividad. Se ha comprobado que existe dicho desplazamiento frecuencial, siendo este un paso intermedio a la implementación de la tecnología de cristales líquidos.

Para finalizar, una vez comprobado que la misma estructura con dos sustratos diferentes funciona en distintos rangos de frecuencia, se ha adaptado este *chessboard* a

la tecnología de cristales líquidos. Al ser necesario alimentar las estructuras AMC para aplicar un voltaje y así polarizar los cristales para que cambie su valor de permitividad, se ha tenido que ajustar el tamaños de los AMC e incluir líneas de alimentación. Se ha simulado este chessboard para los valores de permitividad que tiene el cristal líquidos GT3-23001.

Al final de la memoria se encuentran las conclusiones que derivan de este Proyecto Final de Carrera, junto con las posibles líneas futuras.

---

## ABSTRACT

---

*A chessboard structure is a metamaterial surface composed by two types of cells which reduce the radar cross-section, by creating a destructive interference in between reflected fields in both cells. The phase difference that must exist between the two types of cells is  $180^\circ$ . Using PEC cells ("Perfect Electric Conductor"), which introduce a phase shift of  $180^\circ$  to the reflected wave, and AMC cells ("Artificial Magnetic Conductor") which introduce a phase shift of  $0^\circ$  in one frequency, called resonant frequency, the destructive interference can be generated. If the PEC cells is changed by another AMC cell, a structure that works in two frequencies, one for each resonance frequency of the AMC, since the AMC away from the resonance frequency having behavior of a PEC is obtained. A broadband chessboard structure can be designed by keeping the  $180^\circ$  difference between phase reflection curves in a large bandwidth.*

*In this Final Degree Project an improved chessboard structure is proposed. The feasibility of designing a tunable structure by varying the value of the permittivity of the substrate to increase the bandwidth in which the chessboard reduces the radar cross section has been studied. Also, tuning technologies that could be implemented, such as liquid crystals or BST, have been studied.*

*The project begins with a study of different types of AMC to check if there is a direct relationship between how resonant structures are and how the change of the permittivity value of the substrate to these cells affects, to find which one has a greater variation. After selecting the AMC structure, a study to find two types of cells which present a broadband destructive interference has been done. Once these two AMC have been obtained, the behavior of a chessboard structure formed by these two types of unit cells, before a change in the value of the permittivity of the substrate has been studied.*

*Once it has been shown that by changing the value of the permittivity the frequency range in which the structure reduces the radar cross section varies, a study to manufacture, a chessboard for two permittivity values has been done, using two types of materials with different permittivity value. It has been probed that there is a frequency shift by changing the permittivity value. This design is a preliminary step before implementing the structure in liquid crystals technology. The final liquid crystal design has been the permittivity variation given by the commercial liquid crystal GT3-23001.*

*Finally, after checking that the same structure with two different substrates operates in different frequency ranges, it has been adapted to liquid crystals technologies. It has been necessary to feed the AMC structures to allow applying a voltage and polarizing the crystals to change the value of permittivity. Therefore, the sizes of the AMC need to be readapted and power lanes had to be included.*

*The memory finishes with the conclusions derived from the Final Degree Project together with the future lines.*

---



---

 ÍNDICE
 

---

<b>RESUMEN</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>INDICE FIGURAS</b>	<b>VI</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Estado del Arte</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos del Proyecto</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Estructura del Proyecto</b>	<b>2</b>
<b>CAPITULO 2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES</b>	<b>5</b>
<b>2.1. RCS</b>	<b>5</b>
2.1.1. Técnicas de Reducción de la RCS	6
2.1.2. Desventajas de la RCSR	9
<b>2.2. Metamateriales</b>	<b>9</b>
<b>2.3. Estructuras Metamateriales</b>	<b>11</b>
2.3.1. Estructuras EBG	12
2.3.2. Estructuras AMC	12
<b>2.4. Chessboard</b>	<b>14</b>
2.4.1. Grating Lobes	16
<b>2.5. Tecnologías de Sintonización</b>	<b>18</b>
2.5.1. Cristales Líquidos	18
2.5.2. BST	19
<b>CAPITULO 3. ESTUDIO DE ESTRUCTURAS AMC</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Introducción</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Estructuras Simuladas</b>	<b>21</b>
3.2.1. Cruces de Jerusalén	21
3.2.2. Parches metálicos	25
3.2.3. Esvástica	27
3.2.4. Parche Interdigital	29

<b>3.3. Comparativa de las estructuras</b>	<b>33</b>
<b>CAPITULO 4. ESTUDIO DEL AMC ESVÁSTICA Y SIMULACIÓN DE LA ESTRUCTURA CHESSBOARD</b>	<b>36</b>
<b>4.1. Introducción</b>	<b>36</b>
<b>4.2. Esvástica</b>	<b>36</b>
4.2.1. Estudio Estructura AMC	36
4.2.2. Simulación estructura chessboard	45
<b>CAPITULO 5. SIMULACIÓN, FABRICACIÓN Y MEDIDA DE UNA ESTRUCTURA CHESSBOARD Y SU ADAPTACIÓN PARA EL USO DE CRISTALES LÍQUIDOS</b>	<b>51</b>
<b>5.1. Introducción</b>	<b>51</b>
<b>5.2. Estructura AMC con parches</b>	<b>51</b>
5.2.1. Estudio estructura AMC	52
5.2.2. Simulación estructura chessboard	55
5.2.3. Fabricación de la estructura chessboard	60
5.2.4. Medidas y comparación de datos teóricos y experimentales	62
<b>5.3. Diseño estructura con parches para LC</b>	<b>65</b>
5.3.1. Estudio estructuras AMC	65
5.3.2. Simulación estructura chessboard	67
5.3.3. Implementación de cristales líquidos	70
<b>CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO I. OTROS TIPOS DE ESTRUCTURAS AMC ESTUDIADAS</b>	<b>75</b>
<b>1. Parrilla</b>	<b>75</b>
<b>2. Parche invertido</b>	<b>75</b>
<b>3. Parche circular</b>	<b>75</b>
<b>4. Parche circular con brazos</b>	<b>76</b>
<b>5. Esvástica modificada</b>	<b>76</b>
<b>PUBLICACIONES</b>	<b>77</b>
<b>Conferencias Nacionales</b>	<b>77</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>82</b>

## INDICE FIGURAS

Figura 2.1. Diferentes modos de medir la RCS, modo monoestático y modo biestático.	6
Figura 2.2. Método “Shaping” [Iri08].	6
Figura 2.3. a) Material de carbono absorbente y b) recubrimiento interior de una cámara anecoica utilizando estos materiales (foto de la cámara anecoica de prueba Maxwell de la ESA).	8
Figura 2.4. Estructura 3D metamaterial [REME, Red Española de Metamateriales].	10
Figura 2.5. Clasificación de los materiales [Eng06].	11
Figura 2.6. Estructura EBG en 3D, Universidad Macquarie (Sydney, Australia).	12
Figura 2.7. Comportamiento de los campos en un a) PEC y un b) PMC y sus imágenes correspondientes.	13
Figura 2.8. a) La capacidad en superficies de alta impedancia es debida a la proximidad de las placas y la inductancia es debida a la corriente entre las placas. b) La impedancia la superficie puede modelarse como un circuito paralelo resonante LC [Eng06].	14
Figura 2.9. Fase de reflexión de una estructura AMC y su frecuencia de resonancia [Sie99b].	14
Figura 2.10. Estructura chessboard. Celdas negras representan elementos PCE y las celdas blancas elementos AMC. El zoom muestra la celda unidad (2x2) [Paq07].	15
Figura 2.11. Modelo esquemático usado para el análisis teórico de la estructura chessboard [Iri08].	16
Figura 2.12. Características de radiación de la configuración presentada en la Fig. 2.11. En rojo los planos YZ y XZ y en verde el plano $\phi=45^\circ$ [Iri08].	17
Figura 2.13. Permitividad perpendicular y paralela con respecto a la dirección N [Jak04].	18
Figura 2.14. Curva característica C-V del BST [Cur14].	19
Figura 2.15. Representación esquemática de las aplicaciones del BST en circuitos integrados [Jul15].	20
Figura 3.1. Par de estructura AMC Cruz de Jerusalén y sus dimensiones (en mm) [Iri13].	22
Figura 3.2. Curvas de fase para los valores de permitividad 7 (rojo), 10.2 (violeta) y 15 (azul) para la cruz de la figura 3.1 a).	22
Figura 3.3. Curvas de fase para los valores de permitividad 7 (rojo), 10.2 (violeta) y 15 (azul) para la cruz de la figura 3.1 b).	23

Figura 3.4. Curvas de los desfases de ambas estructuras para los valores de permitividad 7 (rojo), 10.2 (violeta) y 15 (azul) para las cruces de la figura 3.1. ....	24
Figura 3.5. Curvas de fase para el paramétrico de la longitud de los brazos de la cruz de la figura 3.1 a).....	25
Figura 3.6. Estructura AMC estudiada, parches metálicos. ....	25
Figura 3.7. Estudio paramétrico para obtener el tamaño del parche para que la frecuencia de resonancia fuese similar a la de la cruz de Jerusalén. ....	26
Figura 3.8. Curvas de fase para el parche metálico de la figura 3.6 con permitividad 7 (rojo), 10.2 (violeta) y 15 (azul).....	26
Figura 3.9. Estructura AMC esvástica simulada y sus dimensiones.....	27
Figura 3.10. Curvas de fase para el estudio paramétrico de la variable $g_1$ de la esvástica. ....	28
Figura 3.11. Curvas de fase del estudio del comportamiento de la esvástica al cambiar la anchura de los brazos. ....	28
Figura 3.12. Curvas de fase para la esvástica con valores de permitividad 7 (rojo), 10.2 (violeta) y 15 (azul).....	29
Figura 3.13. Estructura parche interdigital de 8 fingers a) estructura 2x2 celdas y b) zoom de celda unidad y sus dimensiones.....	30
Figura 3.14. Curvas de fase para los diferentes valores de $l_{fin}$ .....	31
Figura 3.15. Curvas de fase para el barrido de valores de $w_{fin}$ . ....	32
Figura 3.16. Curvas de fase para el barrido de valores del factor escala aplicado a la celda.....	32
Figura 3.17. Curvas de fase para la estructura parche interdigital, con un factor de escala aplicado de 0.02, para los valores de permitividad 7 (rojo), 10.2 (violeta) y 15 (azul).....	33
Figura 3.18. Comparación de las curvas de fase para las distintas estructuras estudiadas para el valor de permitividad del substrato 10.2. ....	34
Figura 3.19. Comparación entre cruz de Jerusalén y esvástica para los valores de permitividad 7 10 y 15.....	35
Figura 4.1. Estructura AMC esvástica con sus dimensiones vistas en el capítulo 3. ....	36
Figura 4.2. Curvas de fase de la esvástica para un barrido en el valor del factor de escala aplicada al AMC a) para valores del factor de escala menores que uno y b) para valores mayores que uno.....	38
Figura 4.3. a) Curvas de la estructura esvástica con un factor de escala aplicado de 0.45 (roja) y 0.6 (azul) y b) diferencia de ambas curvas.....	40
Figura 4.4. Segundo barrido del valor del factor de escala. ....	41

Figura 4.5. a) Curvas de fase para los valores del factor de escala 0.45 y 0.57, y b) la resta de estas curvas. ....	42
Figura 4.6. Curvas de fase para las estructuras con diferente escalado para el a) valor de permitividad 6.5 y b) la resta de ambas, y para el valor de c) permitividad 11 y la d) diferencia entre estas. ....	44
Figura 4.7. Estructuras con sus respectivas dimensiones, con las que se va a construir la estructura completa, a) estructura esvástica con un factor de escala de 0.43 y b) estructura esvástica con un factor de escala de 0.57. ....	46
Figura 4.8. Celda de la estructura chessboard completa simulada. ....	47
Figura 4.9. Campo reflejado normalizado respecto a un plano metálico por la estructura chessboard para los diferentes valores de permitividad. ....	48
Figura 4.10. Campo reflejado normalizado de la estructura chessboard a la frecuencia central para los valores de permitividad del sustrato a) perm=6.5, f=22.5 GHz, b) perm=8, f=21 GHz, c) perm=9.5, f=20.5 GHz, d) perm=11, f=17 GHz.....	49
Figura 5.1. Estructuras AMC tipo parche y sus dimensiones .....	53
Figura 5.2. Curvas de fase para las celdas unidad de la figura para los sustratos a) FR4 y b) la diferencia de fase, y c) 5880 y d) la diferencia de fase. ....	55
Figura 5.3. Celda de la estructura completa simulada conformada por los AMC de la figura 5.1. ....	56
Figura 5.4. Campo reflejado normalizado por la estructura de la figura 5.3 para los materiales a) RO5880 y b) FR4. ....	57
Figura 5.5. Campos reflejados por la estructura y el plano de masa para los materiales a) RO5880 y b) FR4, para los dos valores de la altura del sustrato.....	59
Figura 5.6. Campo reflejado normalizado para a) RO5880 f=50 GHz y b) FR4 f= 40 GHz.....	60
Figura 5.7. Las líneas verdes corresponden a la fresa de diámetro 200um y las azules a la de 1mm. ....	61
Figura 5.8. Foto real de la estructura chessboard fabricada con el material RO5880. ....	61
Figura 5.9. Foto del montaje realizado para la toma de medidas de ambas estructuras (estructura chessboard fabricada con el material FR4). ....	62
Figura 5.10. Medidas del campo reflejado normalizado obtenidas para las estructuras con los materiales a) RO5880 y b) FR4.....	64
Figura 5.11. Diferentes tipos de alimentación simulados. ....	66
Figura 5.12. Alimentación en forma de zig-zag simulada.....	66
Figura 5.13. Par de estructuras que conforman la estructura chessboard completa que se va a simular.....	67

---

Figura 5.14. Celda de la estructura completa simulada.....	68
Figura 5.15. Campo reflejado por la estructura y el plano de masa para los valores de permitividad 2, 3 y 4 para los modos de propagación a) TE y b) TM.....	69
Figura 5.16. Campo reflejado por la estructura chessboard y el plano de masa para los valores del cristal líquido GT3-23001 2.5 y 3.3, para los modos de propagación a) TE y b) TM.....	71

---

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

---

### 1.1. Estado del Arte

---

En este proyecto se ha realizado un estudio de la viabilidad de realizar reconfigurable una estructura reductora de la sección recta radar. Para entender las bases de este Proyecto Final de Carrera se muestra a continuación un breve repaso de los aspectos más importantes a tener en cuenta para su comprensión.

La reducción de la sección recta radar en banda ancha en una configuración de perfil bajo es un desafío para los diseñadores. Al mismo tiempo es deseable que las estructuras diseñadas se puedan integrar fácilmente en cualquier objeto que se desee esconder o cuya reflexión se quiera minimizar. Existen diferentes técnicas para reducción la sección recta radar (RCS, "Radar Cross Section"), como se puede ver en profundidad en el capítulo 2, shaping, materiales absorbentes y cancelación tanto de forma activa como pasiva. [Paq07] Se han implementado múltiples soluciones para cada una de las técnicas anteriormente mencionadas, pero el comportamiento en banda estrecha es similar a las características en diseños de perfil bajo.

El objetivo principal de la técnica de reducción de la sección recta radar conocida como shaping consiste en modificar la forma de la superficie del objeto del que se desea reducir su RCS, con el objetivo de redirigir la energía en otras direcciones del espacio donde no esté presente la fuente. Una manera de conseguir esta dispersión de la energía es utilizando una configuración plana [Paq07]. La estructura plana usada se basa en la combinación de conductores eléctricos perfectos (PEC, "Perfect Electric Conductors") y conductores eléctricos artificiales (AMC, "Artificial Magnetic Conductors") colocados en forma de tablero de ajedrez, con la que se puede obtener una reducción de la sección recta radar en banda estrecha. Las principales ventajas de esta estructura son que tiene un perfil bajo, y que se puede acoplar a cualquier tipo de forma del objeto sin que se pierdan sus propiedades de dispersión de la energía. Además, la estructura se puede fabricar fácilmente con una fresadora mecánica o láser.

El principio de funcionamiento de la configuración en forma de tablero de ajedrez está basado en la interferencia destructiva entre las ondas reflejadas por las celdas PEC y AMC que conforman el tablero. Las celdas metálicas reflejan las ondas incidentes con un cambio de fase de  $180^\circ$  mientras que las celdas AMC introducen un cambio de fase de  $0^\circ$  a la frecuencia de funcionamiento, o frecuencia de resonancia. Combinando estos dos efectos, es posible crear una diferencia de fase de  $180^\circ$  gracias a la contribución de ambas estructuras, obteniendo la interferencia destructiva y consiguiendo que en la dirección especular se reduzca considerablemente la potencia reflejada.

La mayor limitación de esta configuración reside en las estructuras AMC solo funcionan en un ancho de banda estrecho. Fuera de este rango de frecuencias los AMC se comportan como un PEC, y la condición necesaria de tener interferencia destructiva no se satisface más. Esta limitación puede ser superada sustituyendo las celdas PEC por otras celdas AMC cuya frecuencia de resonancia sea diferente a los AMC anteriores. Este cambio permite que la interferencia destructiva se consiga al menos a la frecuencia de resonancia de ambos AMC. Por lo tanto, se puede diseñar un sistema que funciona a doble banda [Iri09] [Iri11].

Con este Proyecto Final de Carrera se pretende avanzar en la tecnología de la reducción de la RCS mediante el uso de la estructura chessboard. Se intentará buscar la forma de hacer que esta estructura sea sintonizable cambiando el valor de la permitividad del sustrato. Esto puede suponer que la estructura pueda trabajar en doble frecuencia o que el ancho de banda de funcionamiento sea mayor que el que se había obtenido hasta el momento.

---

## 1.2. Objetivos del Proyecto

---

El objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera ha sido el estudio del arte de estructuras metamateriales con viabilidad para reducir la sección recta radar (RCS, "Radar Cross Section" en inglés), así como la selección de aquellas estructuras que resulten más prometedoras de entre las del estado del arte y sus respectivas simulaciones para la obtención de sus parámetros característicos. Una vez escogidas las estructuras AMC más prometedoras, se realizará un estudio para determinar cuál es la que varía más al modificar el valor de la permitividad del sustrato. Elegida esta estructura, se hará un estudio para obtener dos celdas unitarias con las que se pueda simular una estructura completa, que nos sirva para poder ver cómo le afecta el cambio del valor de la permitividad del sustrato.

Como otros objetivos se tienen el poder fabricar esta estructura completa para poder hacer una comparación entre los datos que se han simulado y los datos obtenidos midiendo dicha estructura. Además, se probará a implementar alguna tecnología de sintonización como puede ser los cristales líquidos o el BST ("Barium Strontium Titanate") para que la estructura sea sintonizable y así que la estructura final pudiese operar a doble frecuencia o que el ancho de banda de la estructura sea mayor. De esta forma tendríamos una estructura final fabricada sintonizable.

---

## 1.3. Estructura del Proyecto

---

Este proyecto está dividido en tres grandes secciones; el estudio del arte de las estructuras AMC, simulaciones de la estructura completa, y por último fabricación y medida de la estructura fabricada junto con el diseño de una estructura aplicable en tecnología de cristales líquidos. Antes de exponer todas las simulaciones, todos los resultados de estas, primero se verá una introducción a las bases teóricas.

Por lo tanto, en el capítulo 2 se muestra un resumen de los fundamentos teóricos de las tecnologías que vas a ser usadas a lo largo de la realización del proyecto. Se hablará de los metamateriales como concepto global, debido a que se va estar simulando estructuras AMC las cuales son estructuras metamateriales. Una vez hecha la introducción a los metamateriales, se explicará de una de las aplicaciones que tienen los metamateriales, la reducción de la sección recta radar, de su definición, formas de medir la RCS y los diferentes métodos que se utilizan para alcanzar este objetivo. Después de hablar de la reducción de la sección recta radar se explicará de los diferentes tipos de estructuras metamateriales, en concreto de los EBG y AMC, con sus respectivas características. Después de comentar estas estructuras, se hará mención de la configuración de los AMC en forma de tablero de ajedrez o chessboard. Se expondrá cuáles son los fundamentos teóricos por los que esta disposición de los AMC funciona correctamente y en qué condiciones se debe dar. Se mencionará también qué son los grating lobes y por qué aparecen. Y para finalizar este capítulo, se hablará de dos tecnologías de sintonización, el BST y los cristales líquidos.

Una vez explicadas todas las bases teóricas, en el capítulo 3 se muestran los primeros pasos dados en este proyecto. En este capítulo se ha realizado un estudio de diferentes estructuras AMC, barriendo parámetros de sus dimensiones de alguna de las variables de la forma del AMC, intentando ajustar todas las frecuencias de resonancia de estos a la misma frecuencia para poder comparar todas las estructuras y poder ver cómo afecta que sean más resonantes al cambio de permitividad del substrato.

En el capítulo 4 se realiza un estudio con la estructura AMC escogida en el capítulo 3. En el capítulo anterior solo se ha estudiado una celda unidad para hacer la comparación entre las diferentes estructuras. Sin embargo en este capítulo se busca una pareja de celdas para que al restar las curvas de fase entre ambas, se consiga interferencia destructiva. Una vez obtenidas ese par de celdas que cumplan con esta condición, se simula una estructura completa para comprobar que funciona de forma correcta, y viendo cómo se comporta la estructura al cambiar el valor de la permitividad del substrato.

En el capítulo 5 se muestra la estructura final seleccionada, con sus respectivas simulaciones para ajustar al máximo el rango de funcionamiento de la estructura. Además se ha realizado un estudio del valor de la permitividad del substrato teniendo en cuenta los materiales disponibles en la Universidad Pública de Navarra, debido a que uno de nuestros objetivos era poder fabricar la estructura. Una vez que se obtuvieron resultados aceptables, esta estructura fue fabricada en el centro de I+D de la Universidad Pública de Navarra. Se fabricaron dos estructuras idénticas con dos tipos de materiales con diferente valor de permitividad, y así poder comprobar que realmente el rango en el que funciona la estructura es diferente, y que corresponde con los datos simulados. Por último, se ha hecho un estudio de esa misma estructura en el caso de poder implementar cristales líquidos.

Para finalizar, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones de este Proyecto Final de Carrera a raíz de los datos obtenidos. También se comentan las posibles líneas futuras de investigación que pueden surgir a partir de este trabajo.

Tras las conclusiones, se incluye un anexo con el resto de celdas unitarias que se han simulado a lo largo del proyecto pero no han tenido los resultados esperados.

Detrás del anexo, para finalizar, se expondrá el texto que se ha publicado durante la realización de este Proyecto Final de Carrera en el XXX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, cuya presentación del mismo se realizará en septiembre de 2015 en Pamplona.

## CAPITULO 2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

### 2.1. RCS

Cualquier objeto expuesto a una onda electromagnética incidente redirige la energía de la onda en todas las direcciones. A este fenómeno se le conoce como dispersión o “scattering”. La energía rebotada hacia la fuente de la onda constituye el eco del radar del objeto. La intensidad del eco es descrito por la sección recta radar (RCS, “Radar Cross Section” en inglés).

La sección recta radar es, además, la comparación entre la densidad de potencia dispersada por el receptor y la densidad de potencia incidente al objeto. Esto suele ser necesario para medir o hallar la potencia dispersada en otras direcciones que no sea la misma que la dirección de la onda incidente.

Las aplicaciones de la sección recta radar generalmente están asociadas con temas militares, sobre todo porque se hizo famoso en técnicas de sigilo. Desde la década de 1970 diseños sigilosos han sido incorporados en muchos sistemas de ataque, incluidos satélites, misiles, armamento aéreo, vehículos teledirigidos, helicópteros, barcos, tanques, vehículos terrestres, e incluso edificios.

Sin embargo, la RCS también tiene aplicación a la hora de la medición de antenas y RCS. Es obvio que para las mediciones de RCS, se recomienda que la RCS de la estructura de soporte sea menor que el de la RCS del objeto bajo prueba. Pero también para mediciones de antenas, la interferencia del posicionador puede ser una fuente de error, ya que puede causar una onda estacionaria. Esto es conocido como el rango de acoplo. La RCS también se puede expresar mediante una ecuación matemática, donde la sección recta radar,  $\sigma$ , queda definida como:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_{\text{scat}}|^2}{|E_{\text{inc}}|^2} \quad (2.1)$$

donde  $E_{\text{scat}}$  es el campo eléctrico dispersado y  $E_{\text{inc}}$  es el campo incidente al objeto. Se distinguen dos casos a la hora de obtener la RCS: monoestático y biestático (ver figura 2.1.). La RCS biestática se obtiene cuando el transmisor y el receptor están en diferente posición. La RCS monoestática es el caso más habitual para la mayoría de los sistemas radar, donde el transmisor y receptor están en la misma posición, incluso algunas veces se usa la misma antena como transmisor y receptor. La mayoría de medidas experimentales se hacen utilizando la RCS monoestática.

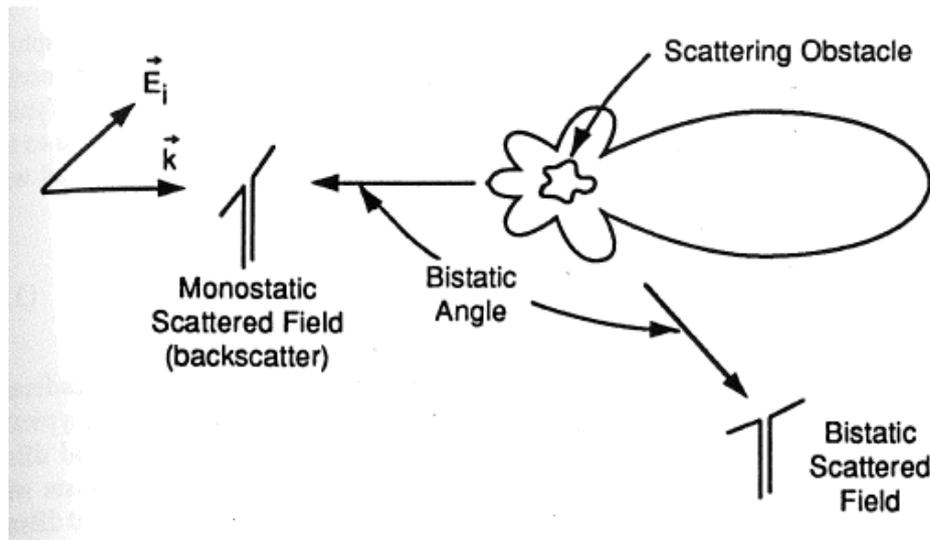


Figura 2.1. Diferentes modos de medir la RCS, modo monoestático y modo biestático.

Existe una técnica que se utiliza para conseguir la invisibilidad de los materiales llamada "cloaking". Esta técnica consiste en minimizar totalmente la RCS de forma monoestática para una iluminación arbitraria de los objetos.

### 2.1.1. Técnicas de Reducción de la RCS

La reducción de la RCS puede, generalmente, ser obtenida mediante cuatro diferentes formas: el método de "Shaping", el uso de materiales absorbentes (RAM, "Radar Absorbing Materials" en inglés), cancelación pasiva y la cancelación activa. Cada método tiene sus ventajas y sus desventajas. Los dos métodos más prácticos y más utilizados a la hora de reducir la sección radar son el método de "Shaping" y el uso de materiales absorbentes.

#### 2.1.1.1. Método de "Shaping"

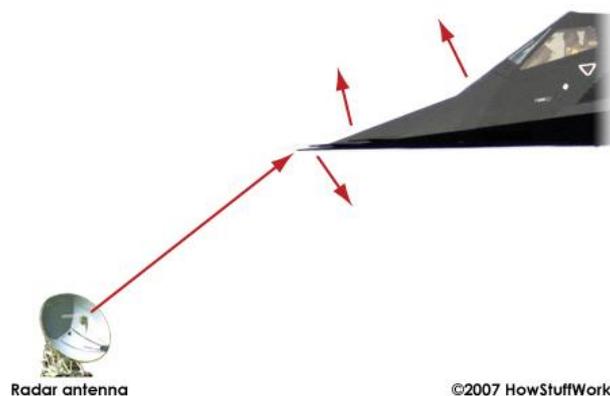


Figura 2.2. Método "Shaping" [Iri08].

El objetivo de esta técnica es la de redirigir la mayor parte de la energía de la onda incidente en otra dirección diferente a la dirección de incidencia. La mayoría de

los sistemas radar actuales son monoestáticos, por lo que esta técnica de reducción de la RCS minimiza la reflexión en la misma dirección que la onda incidente. Otro punto de vista de esta técnica es que maximiza la dispersión o “scattering” en las direcciones en las que no está presente el transmisor.

Esto no es posible de hacer para todos los ángulos de incidencia a la superficie debido a que siempre habrá ángulos de visión en la que las superficies se ven en incidencia normal y por lo tanto el eco producido será muy alto, con lo que no habrá reducción de la sección recta radar. Para que esta técnica sea efectiva hay que tener en cuenta la orientación mutua de todas las partes de la superficie, no solo para las reflexiones dobles (diedros), sino también para múltiples reflexiones y para todos los ángulos de incidencia.

El método de “Shaping” supone un problema a la hora de medir la RCS debido a los soportes que sujetan las estructuras. Este problema podría evitarse mediante la supresión de la reflexión normal y la especular. La razón de que esta técnica sea tan importante de alcanzar es debido a la reducción de rango de detección. Esta técnica de reducción de la RCS se aplica solo a cuerpos mucho más grandes que la longitud de onda de trabajo.

En la tabla 2.1 se refleja como el rango de detección es menor conforme se reduce la RCS. Tomando como referencia que con una RCS de 0 dB el rango de detección es de 100 metros, vemos cómo cambia el rango de detección conforme vamos reduciendo la sección recta radar. Con una reducción del 90% (10 dB) el rango de detección se reduce a 56 metros, 99% (20 dB) 32 metros, y 99.9% (30 dB) 18 metros.

Reducción de la RCS	Rango de detección
0%, 0 dB	100 (arbitrario)
90%, 10 dB	56
99%, 20 dB	32
99.9%, 30 dB	18
99.99%, 40 dB	10

Tabla 2.1. Rango de detección con respecto a la reducción de la RCS [Eug04].

### 2.1.1.2. Materiales Absorbentes (RAM)

A la hora de usar esta tecnología se reduce la energía reflejada en la dirección incidente debido a la absorción de los materiales. La energía electromagnética es transformada por el material en forma de calor y, en general, se utiliza carbono cargado para este propósito. Para que esta tecnología funcione en banda ancha se requiere una transición suave dieléctrica entre el aire y el material absorbente. En la mayoría de estos casos esto se obtiene mediante el uso de material poroso, como por ejemplo los absorbentes de espuma con forma piramidal.

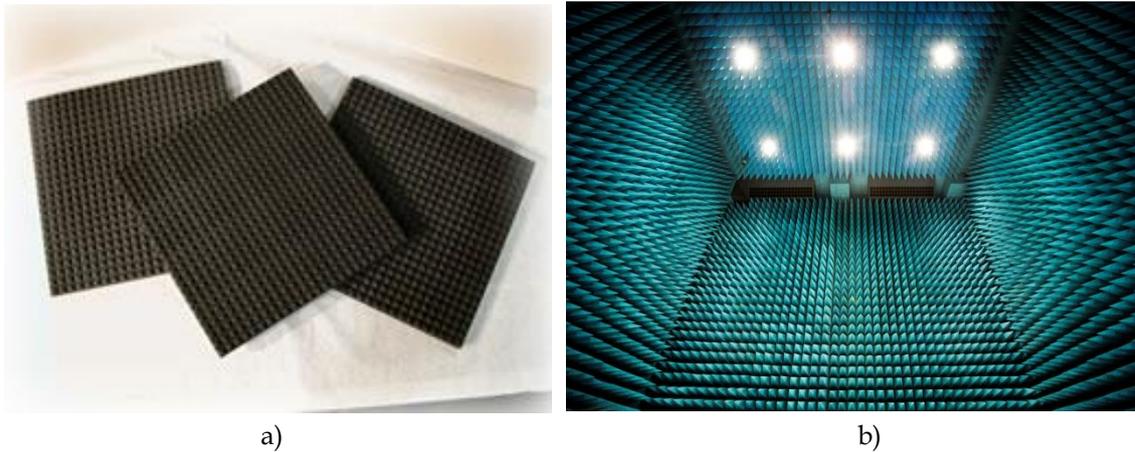


Figura 2.3. a) Material de carbono absorbente y b) recubrimiento interior de una cámara anecoica utilizando estos materiales (foto de la cámara anecoica de prueba Maxwell de la ESA).

El carbono fue el material base en la fabricación de los primeros materiales absorbentes debido a que es conductivamente imperfecto, y a día de hoy sigue siendo un elemento importante en la fabricación de estos materiales. De hecho, muchos materiales comerciales basados en carbono tienen diseños que no han cambiado a lo largo de 20 años. La mayoría de estos materiales son utilizados para experimentos y trabajos de diagnóstico, incluyendo la construcción del interior de las cámaras anecoicas (ver figura 2.3. b)).

Sin embargo las propiedades mecánicas de estos materiales son a menudo conflictivas con otros requisitos. Por ejemplo sus propiedades aerodinámicas no son muy buenas y para frecuencias bajas estos materiales deben de ser muy gruesos.

#### 2.1.1.3. Cancelación Pasiva

La cancelación pasiva recibió mucha atención en la década de 1960, aunque esta técnica tiene bastantes limitaciones. Su funcionamiento se basa en introducir una fuente de eco cuya amplitud y fase puede ser ajustada para cancelar el eco de otra fuente. Este método se puede utilizar para objetos sencillos, con la condición de que se pueda identificar un punto de carga en el cuerpo. Desafortunadamente, incluso para cuerpos sencillos, es muy difícil generar la dependencia frecuencial requerida para esta impedancia, y la reducción de la RCS obtenida para una frecuencia rápidamente desaparece al cambiar la frecuencia.

Además, los vehículos militares tienen el tamaño de 100 longitudes de onda y tienen docenas, sino centenas, de ecos. Por esto no es práctico diseñar un sistema de cancelación pasiva para cada una de las fuentes. Hoy en día esta técnica está prácticamente descartada para su uso en la reducción de la RCS.

#### 2.1.1.4. Cancelación Activa

La cancelación pasiva es un poco más ambiciosa que la cancelación pasiva. Este método consiste principalmente en que el objetivo debe emitir radiación cuando exista

un pulso incidente cuya amplitud y fase cancelen la energía reflejada. Esto implica que el objetivo debe ser suficientemente inteligente para averiguar el ángulo de incidencia, la intensidad, la frecuencia y la forma de onda de la onda incidente. Además debe ser suficientemente inteligente para conocer las características del eco, en particular la longitud de onda y la frecuencia. Dicho sistema debe también ser versátil para ajustar y radiar un pulso de amplitud y fase para cada instante de tiempo.

La cancelación activa parece más adecuado para la reducción de la RCS para frecuencias bajas, donde el uso de materiales absorbentes (RAM) y la técnica de “Shaping” es difícil y los patrones de dispersión muestran lóbulos amplios. La investigación en esta técnica probablemente continuará debido a que otros métodos de reducción de la RCS son también difíciles de aplicar para bajas frecuencias.

---

### 2.1.2. Desventajas de la RCSR

---

La mayoría del tiempo los requisitos para la reducción del eco estaban en conflicto con los requisitos convencionales y tradicionales de las estructuras. Como resultado el diseño final del sistema es un compromiso que inevitablemente incrementa el coste del sistema completo. El coste es solo una de las desventajas de la RCSR; otras son que reduce la carga útil, reduce el rango, añade el peso y aumenta el mantenimiento.

La relativa importancia de cada factor depende de la misión de la plataforma involucrada. La reducción de la RCS no siempre puede ser justificada, al menos en términos de mejora del rango de detección.

---

## 2.2. Metamateriales

---

No existe una definición universalmente aceptada del concepto de metamaterial. En el sentido más amplio se trata de un material artificial que presenta propiedades electromagnéticas inusuales, que no están presentes en la naturaleza, propiedades que proceden de la estructura diseñada y no de los materiales con los que está fabricada. Es difícil llegar a una definición estricta y sin ambigüedades de un metamaterial que no excluiría muchos tipos de estructuras que por derecho deben de ser considerados parte del campo de los metamateriales

Los metamateriales están hechos de la unión de múltiples elementos formados de materiales convencionales, tales como metales o plásticos. Son estructuras, por lo general, periódicas (ver figura 2.4.), pudiendo ser el tamaño de la estructura mayor que la longitud de onda de trabajo o menor. También se da el caso de que la estructura no sea periódica y que sea aleatoria, como en el caso de los cristales fotónicos. Por esta razón, la definición anterior es a propósito un tanto vaga. Lo importante, sin embargo, es que un metamaterial no es una cosa tangible; más bien, un metamaterial es el resultado de un enfoque de diseño que satisface el espíritu de la definición anterior.

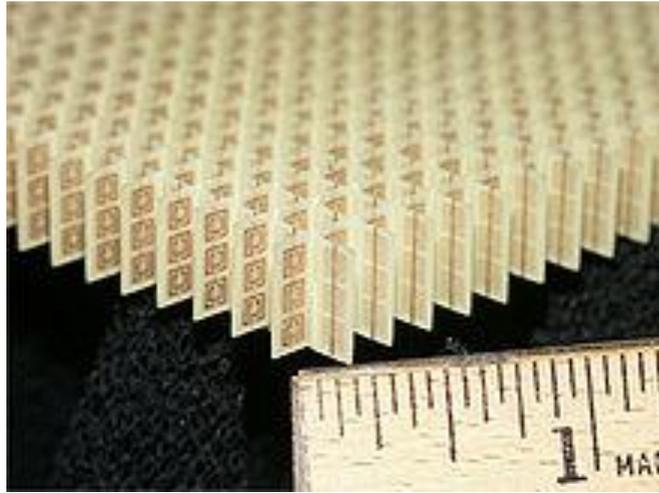


Figura 2.4. Estructura 3D metamaterial [REME, Red Española de Metamateriales].

En 1967, Víctor Veselago analizó matemáticamente la propagación de una onda plana en un material cuya permitividad y permeabilidad fuesen simultáneamente negativas ( $\epsilon < 0$  y  $\mu < 0$ ) [Ves67]. Su estudio teórico mostró que para una onda plana uniforme monocromática en un medio con permitividad y permeabilidad negativas, la dirección del vector de Poynting es antiparalelo a la dirección de la velocidad de fase, al contrario que en el caso de la propagación de una onda plana en un medio convencional ( $\epsilon > 0$  y  $\mu > 0$ ) que son paralelos el vector de Poynting y la dirección de la velocidad de fase. Hace pocos años, Smith, Scultz, y su grupo de trabajo fabricaron tal medio y demostraron experimentalmente la presencia de refracciones anómalas en este medio [Smi00] [She01].

Para los metamateriales con permitividad y permeabilidad negativa se han sugerido muchos nombres y terminologías tales como medios “zurdos” [Ves67] [Smi00] [She01] [Pen00] [Cal01] [Iye02] [Cal02], medios con índice de refracción negativo [Ves67] [Smi00] [She01] [Pen00] [Iye02], materiales DNG (en inglés, “Double NeGative”) [Zio01]. Muchos grupos de investigación en todo el mundo están estudiando varios aspectos sobre esta clase de metamateriales, y muchas ideas y sugerencias han sido propuestas para aplicaciones futuras de estos materiales.

Es bien conocido que la respuesta de un sistema a la presencia de un campo electromagnético se determina, en gran medida, por las propiedades de los materiales involucrados. Describimos esas propiedades mediante la definición de los parámetros macroscópicos permitividad y permeabilidad de estos materiales. Esto permite la clasificación de los medios como se muestra a continuación.

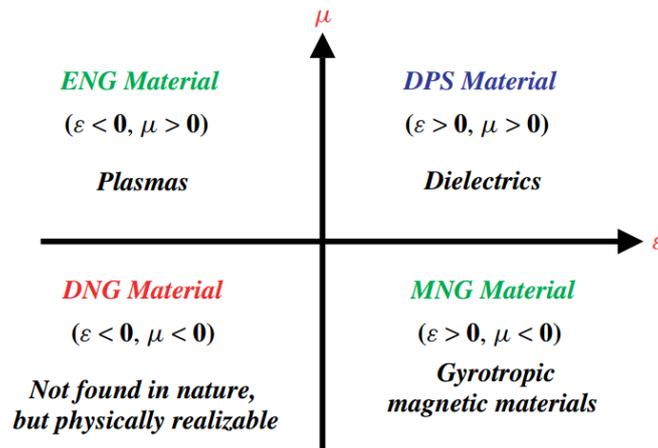


Figura 2.5. Clasificación de los materiales [Eng06].

Un medio con la permitividad y la permeabilidad mayores que cero ( $\epsilon > 0$  y  $\mu > 0$ ) será designado como un medio DPS (en inglés, “Double Positive”)- La mayoría de medios naturales entran en esta denominación, como por ejemplo los dieléctricos. Un medio con permitividad menor que cero y permeabilidad mayor que cero ( $\epsilon < 0$  y  $\mu > 0$ ) será denominado medio ENG (en inglés, “Epsilon-Negative”). En ciertos rangos de frecuencia muchos plasmas muestran estas características. Por ejemplo, los metales nobles (como la plata o el oro) que se comportan de esta manera en el rango de infrarrojos y frecuencias en el rango visible. Un medio con permitividad mayor que cero y permeabilidad menor que cero ( $\epsilon > 0$  y  $\mu < 0$ ) será denominado como un medio MNG (en inglés, “Mu-Negative”). En ciertos rangos frecuenciales algunos materiales girotrópicos muestran estas características. Un medio tanto con permitividad como permeabilidad negativas se denominará medio DNG, como se ha mencionado anteriormente. Esta clasificación de los medios puede ser gráficamente ilustrada como se muestra en la figura 2.5.

### 2.3. Estructuras Metamateriales

Para el desarrollo de este proyecto se han utilizado las propiedades de reflexión de conductores eléctricos y magnéticos de forma conjunta para conseguir la reducción de la RCS. Esta reducción llevada hasta ahora mediante las técnicas previamente vistas, puede conseguirse mediante la combinación de materiales conductores eléctricos y magnéticos perfectos (PEC, “Perfect Electric Conductor” y PMC, “Perfect Magnetic Conductor” en inglés, respectivamente) [Paq07].

Existen aplicaciones ya desarrolladas del uso de materiales conductores eléctricos y magnéticos para mejorar las características de radiación de una antena, como por ejemplo la ganancia y la eficiencia de radiación. Gracias a estas nuevas prácticas surge la idea de una nueva aplicación orientada a la “Stealth Technology” (tecnología de sigilo en inglés).

### 2.3.1. Estructuras EBG

Las estructuras EBG (en inglés, “Electromagnetic Band Gap”), también conocidas como cristales fotónicos, son una nueva clase de estructuras artificialmente fabricadas las cuales tiene la habilidad de controlar y manipular la propagación de las ondas electromagnéticas. Estas estructuras pueden evitar la propagación de la luz, o permitir la propagación solo en ciertas direcciones o concentrar la luz en un punto específico siendo adecuadamente diseñadas. Pueden ser construidas en una, dos y tres dimensiones ya sea material dieléctrico y/o materiales metálicos. Suelen enmarcarse dentro de los metamateriales. Estructuras dieléctricas de dos o tres dimensiones [Yab87] [Ho90] [Cha91] [Fan94] [Ozb94] metálicas [Smi94] [Sig95] [Sie96] [Pen96] o metal dieléctricas [Kuz94] [Bro95] [Fan96] [Gup97] [Sie98] que impiden la propagación de ondas electromagnéticas son conocidas como cristales fotónicos [Kur94] [Joa95] [Sou96].

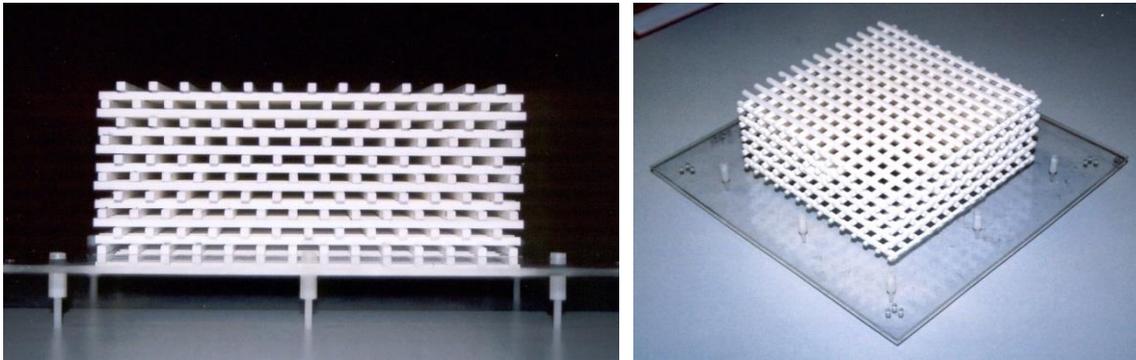


Figura 2.6. Estructura EBG en 3D, Universidad Macquarie (Sydney, Australia).

Las propiedades de estas estructuras son debidas al diseño de la misma y no a los elementos que la componen, lo que quiere decir que el comportamiento que tiene la estructura completa es diferente al que tendrían los elementos de forma individual. Las principales características de estas estructuras es su reducido perfil que tienen, el reducido peso y que el coste de fabricación es bajo.

### 2.3.2. Estructuras AMC

Un tipo de estructura EBG son las estructuras AMC. Las estructuras artificiales magnéticas pueden ser diseñadas para cumplir algunas de las propiedades electromagnéticas sorprendentes dentro de un rango de frecuencias determinado.

Un PEC es un plano conductor eléctrico perfecto. Cuando una onda plana incide sobre este, el campo  $E_{\text{tan}}$  a la superficie es 0, por lo que la onda se refleja completamente. El coeficiente de reflexión para este caso es de  $R = -1$  ( $|\Gamma| = 1$  y  $\arg(\Gamma) = 180^\circ$ ) (ver figura 2.7. a)). Un PMC es un plano conductor magnético perfecto. En este caso el campo  $H_{\text{tan}}$  es 0. La imagen del campo eléctrico tiene el mismo signo, por lo que el coeficiente de reflexión es  $R = 1$  ( $|\Gamma| = 1$  y  $\arg(\Gamma) = 0^\circ$ ) (ver figura 2.7. b)).

Sin embargo, en la naturaleza no se encuentran PMC. Se pueden simular para ciertas frecuencias, cuando la curva de la fase con respecto a la frecuencia pasa por cero (ver figura 2.9.), siendo esta estructura simulada un AMC (“Artificial Magnetic Conductor” en inglés).

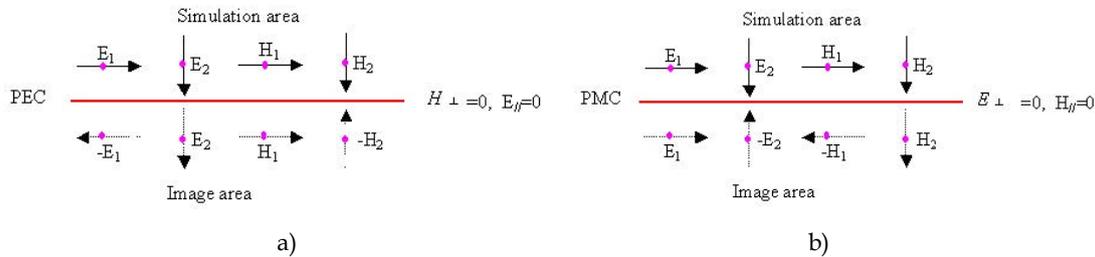


Figura 2.7. Comportamiento de los campos en un a) PEC y un b) PMC y sus imágenes correspondientes.

El comportamiento de un conductor artificial magnético equivale al de un plano de masa basado en estructuras periódicas de dos dimensiones. Es posible implementar un plano de masa con unas características distintas a las de los planos de masa metálicos convencionales, mediante la unión de un número finito de estructuras básicas. Estas estructuras básicas (AMC), las cuales se repiten de forma periódica, se conocen también como superficies de alta impedancia (“High Impedance Surface” en inglés) debido a que presentan una elevada impedancia dentro de un rango de frecuencias concreto, donde la componente tangencial del campo magnético es pequeña. Debido a esto, estas superficies reflejan las ondas incidentes con una fase cercana a cero grados [Jai12].

Las superficies de impedancia se modelan como un circuito resonante paralelo que se puede activar para exhibir alta impedancia en una banda de frecuencia determinada. Las superficies de alta impedancia pueden ser consideradas como un tipo de cristales fotónicos, de dos dimensiones, que impiden la propagación de corrientes superficiales de radiofrecuencia dentro de los “bandgaps” (banda prohibida en inglés).

Como se muestra en la figura 2.8. a), la estructura interactúa con las ondas electromagnéticas, se inducen corrientes en las placas metálicas superiores. Un voltaje aplicado de forma paralela a la superficie superior hace que las cargas se acumulen en el extremo de las placas, lo que se puede describir como una capacidad. Estos forman un circuito resonante paralelo que dicta el comportamiento electromagnético del material. Esta impedancia de la superficie es dada mediante la expresión [Sie99a]

$$Z_s = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (2.2)$$

La superficie es inductiva a bajas frecuencias y capacitiva a altas frecuencias. La impedancia es muy alta cerca de la frecuencia de resonancia  $\omega_0$ , donde  $\omega_0$  viene dada por la siguiente expresión [Sie99a]:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

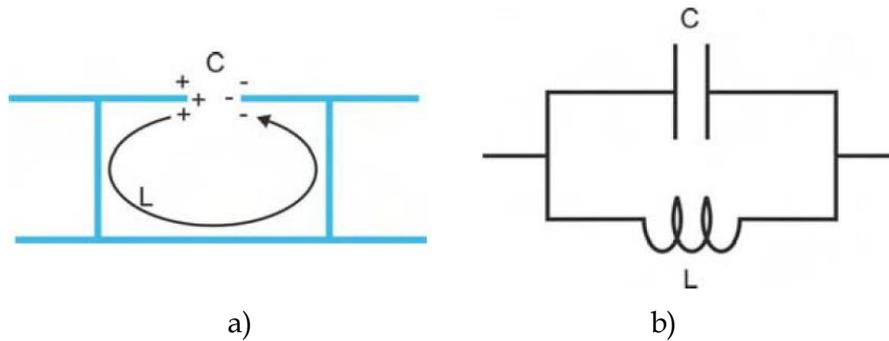


Figura 2.8. a) La capacidad en superficies de alta impedancia es debida a la proximidad de las placas y la inductancia es debida a la corriente entre las placas. b) La impedancia la superficie puede modelarse como un circuito paralelo resonante LC [Eng06].

Con una estructura AMC obtenemos una estructura que se comporta de manera similar a un PMC para la frecuencia de resonancia,  $\omega_0$  (ver figura 2.9.).

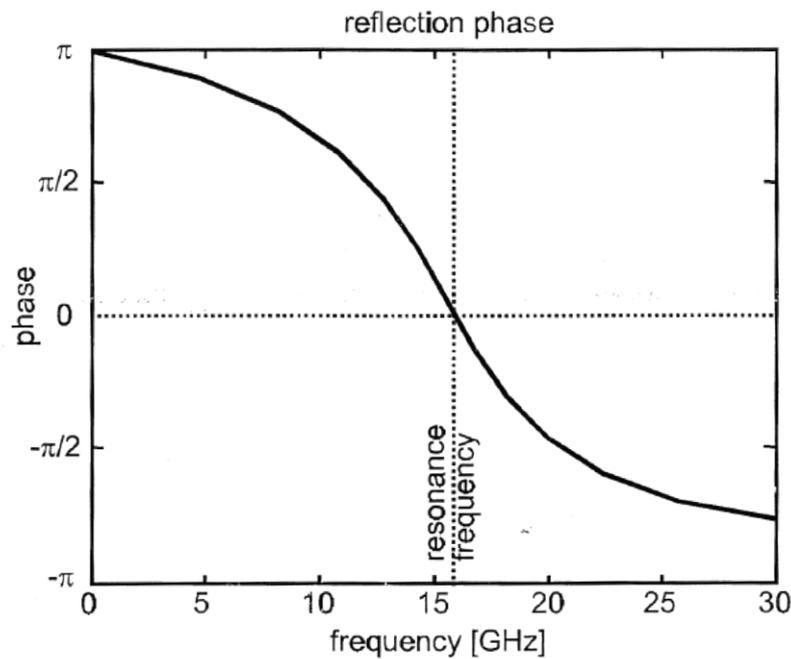


Figura 2.9. Fase de reflexión de una estructura AMC y su frecuencia de resonancia [Sie99b].

## 2.4. Chessboard

Un “chessboard” (tablero de ajedrez en inglés) es una estructura de dos dimensiones, compuesta por celdas PEC y celdas AMC. El principio de operación de esta estructura se basa en el efecto de cancelación de ambas contribuciones.



dos de ellas están en fase con una amplitud positiva ( $A_+$ ) y las otras dos en contra-fase con amplitud negativa ( $A_-$ ). Ambas amplitudes se pueden expresar como:

$$A_+ = A_1 e^{j \cdot \text{phase}_1} \quad \text{with } \text{phase}_1 \approx 0^\circ \quad (2.4)$$

$$A_- = A_2 e^{j \cdot \text{phase}_2} \quad \text{with } \text{phase}_2 \approx 180^\circ \quad (2.5)$$

$A_1$  representa la amplitud de la radiación de las celdas que están en fase y  $A_2$  representa la amplitud de la radiación de las celdas que están en contra-fase.

Las características de radiación de cada tipo de celda pueden ser escritas como:

$$\vec{E}_{A_+} = A_1 e^{j \cdot \text{phase}_1} \cdot E_{\text{Element}} \quad (2.6)$$

$$\vec{E}_{A_-} = A_2 e^{j \cdot \text{phase}_2} \cdot E_{\text{Element}} \quad (2.7)$$

Incluyendo el factor array, el campo radiado es dado por:

$$\vec{E} = (\vec{E}_{A_+} \cdot AF_1 + \vec{E}_{A_-} \cdot AF_2) \quad (2.8)$$

donde los factores array son descritos por:

$$AF_1 = e^{j(kx+ky)d/2} + e^{j(-kx-ky)d/2} \quad (2.9)$$

$$AF_2 = e^{j(-kx+ky)d/2} + e^{j(kx-ky)d/2} \quad (2.10)$$

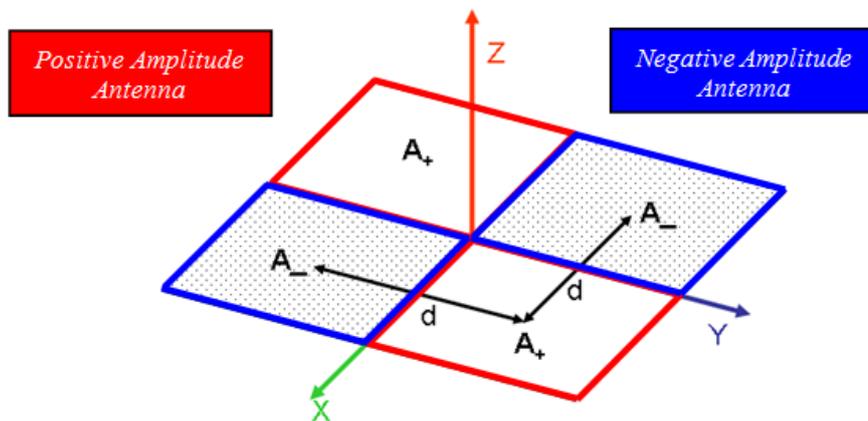


Figura 2.11. Modelo esquemático usado para el análisis teórico de la estructura chessboard [Iri08].

La distancia entre las celdas es un parámetro importante a la hora de diseñar la estructura correctamente. La distancia tiene que ser mayor que la lambda en la dirección diagonal de la estructura para permitir que aparezcan los “grating lobes”.

### 2.4.1. Grating Lobes

Debido a que se pretende que la potencia que refleja la estructura no sea reflejada en la dirección especular, esta potencia debe de ser redirigida a otras

direcciones, como grating lobes. Las características de radiación obtenidas para el modelo de las cuatro celdas se presentan en la Fig. 2.12, para  $A_+ = A_- = 1$  y  $d = \lambda_0$ , y los planos YZ ( $\phi = 90^\circ$ ), XZ ( $\phi = 0^\circ$ ) y  $\phi = 45^\circ$ . Como se puede ver, no hay potencia radiada en los planos YZ ( $\phi = 90^\circ$ ) y XZ ( $\phi = 0^\circ$ ) (línea roja en la figura 2.12.). El factor array es cero para los planos XZ y YZ. Además los cortes XZ y YZ son cero. La potencia será redirigida en los planos de  $45^\circ$  y  $135^\circ$  para  $\theta = 45^\circ$ . Como resultado, el valor de la RCS será mínimo debido que en la dirección especular no se refleja la potencia.

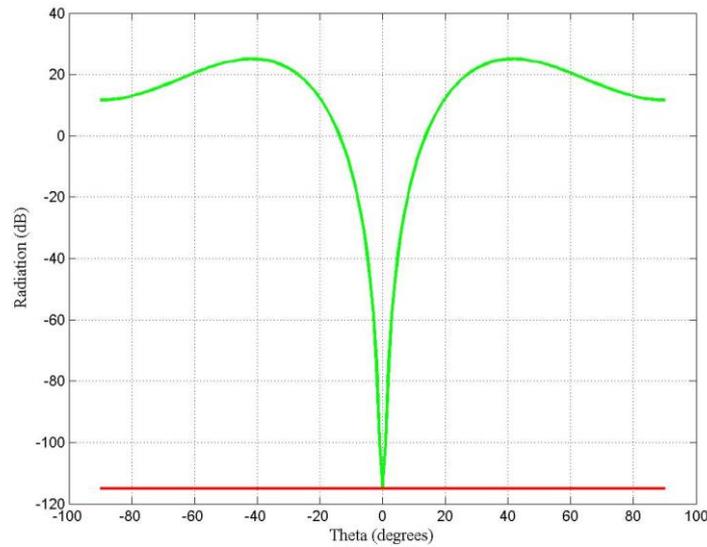


Figura 2.12. Características de radiación de la configuración presentada en la Fig. 2.11. En rojo los planos YZ y XZ y en verde el plano  $\phi = 45^\circ$  [Iri08].

El ángulo theta, a donde se redirige se puede calcular teóricamente usando la teoría de grating lobes. La posición de los grating lobes se obtiene mediante la expresión:

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{\sin \theta_0 - \sin \theta_{GL}}{n} \quad (2.11)$$

donde

$\theta_0$  es la dirección de radiación del lóbulo principal

$\theta_{GL}$  es la dirección del grating lobe

n es el orden del grating lobe, en este caso  $n=1$  representa el primer grating lobe

d es la distancia entre elementos

$\lambda$  es la longitud de onda en el espacio libre a la frecuencia de operación

Aplicando la ecuación 2.11 con  $\theta_0 = 0^\circ$  (el lóbulo principal corresponde con la dirección especular) y con un grating lobe  $\theta_{GL} = 45^\circ$  se obtiene para la distancia d un

valor de  $\sqrt{2}\lambda$ . Este valor concuerda con el patrón de radiación obtenido en el modelo teórico para el corte de  $\phi=45^\circ$ . Además, la radiación, cuando  $\theta=45^\circ$ , corresponde a la radiación de la dirección del grating lobe para una distancia  $\sqrt{2}\lambda$  entre los elementos. Esta distancia corresponde a la separación entre elementos en el plano diagonal ( $\phi=45^\circ$ ).

## 2.5. Tecnologías de Sintonización

Debido al crecimiento de los sistemas de comunicación inalámbricos existe una gran demanda de componentes de radiofrecuencia con la capacidad de poder ser sintonizables. Este factor abre la puerta a nuevas aplicaciones dentro del campo de las microondas.

En este proyecto se ha estudiado la implementación de una de estas tecnologías como se verá más adelante. Son diversas las tecnologías que se pueden utilizar para realizar estructuras sintonizables. Inicialmente se pensó en la utilización de los BST y los cristales líquidos. Finalmente se le ha dado mayor importancia a esta última, la de los cristales líquidos.

### 2.5.1. Cristales Líquidos

El cristal líquido es un tipo especial de estado de agregación de la materia que tiene propiedades de las fases líquidas y sólidas. Dependiendo del tipo de cristal, es posible que las moléculas tengan libertad de movimiento en un plano, pero no entre planos, o que tengan libertad de rotación pero no de traslación. El uso de los cristales líquidos está bastante extendido en el campo de radiofrecuencia y microondas debido a que pueden llegar a producir sintonización.

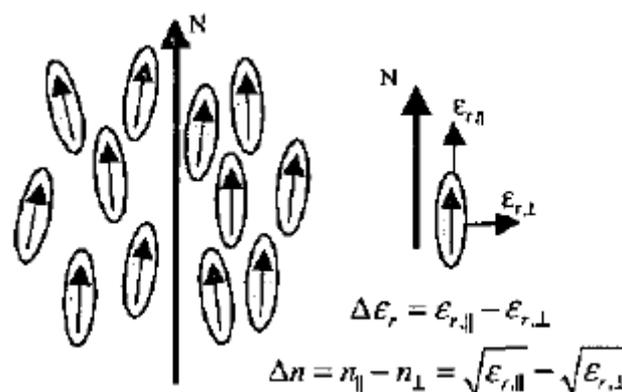


Figura 2.13. Permitividad perpendicular y paralela con respecto a la dirección N [Jak04].

Los cristales líquidos, por lo general, muestran tres fases características al aumentar la temperatura, cristalino (sólido), mesofase (cristal líquido) e isotrópico (líquido). Basándonos en los grados de orientación y/o el orden en el que se disponen los cristales líquidos, la mesofase se puede clasificar como nemática, colestérica y

esmétrica. La estructura de un cristal líquido nemático consiste en una distribución polar de las moléculas a lo largo de una dimensión (ver figura 2.13.). En la fase nemática hay una orientación de largo alcance de las moléculas anisótropicas, causando que la constante dieléctrica tenga diferentes valores ( $\epsilon_{||}$  y  $\epsilon_{\perp}$ ), dependiendo de si la orientación es paralela o perpendicular al eje de referencia N.

La anisotropía dieléctrica de los cristales líquidos nemáticos se basa en la orientación de sus moléculas de forma polar a lo largo del eje N debido al campo eléctrico externo aplicado. La diferencia de permitividad, debido a la orientación de las moléculas paralelamente y perpendicularmente con respecto al campo, se define como anisotropía dieléctrica como:

$$\Delta\epsilon_r = \epsilon_{r,||} - \epsilon_{r,\perp} \quad (2.11)$$

Este cambio del valor de la permitividad se aplicará en los estudios paramétricos durante la realización del proyecto final de carrera. Se simularán las estructuras con diferentes valores de permitividad teniendo en cuenta los valores de cristales líquidos comerciales, como los de la empresa Merck (GT3-23001).

### 2.5.2. BST

BST (“Barium Strontium Titanate” en inglés) es un material ferroeléctrico popular debido a que su permitividad es alta y tiene pocas pérdidas. La naturaleza sintonizable de BST se deriva de su permitividad eléctrica dependiente del campo. Como se puede ver en la figura 2.14., la capacidad de este material varía con el voltaje con el que es alimentado.

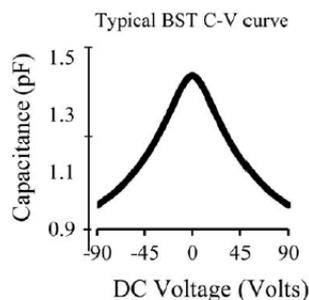


Figura 2.14. Curva característica C-V del BST [Cur14].

En los últimos años la industria de semiconductores ha mostrado un creciente interés en el BST debido a su alta constante dieléctrica. El BST es concebido como un material propicio en varias aplicaciones de circuitos integrados, incluyendo DRAM (“Dynamic Random Access Memory” en inglés), condensadores en un chip y filtros de radiofrecuencia integrados (ver Figura 2.15.).

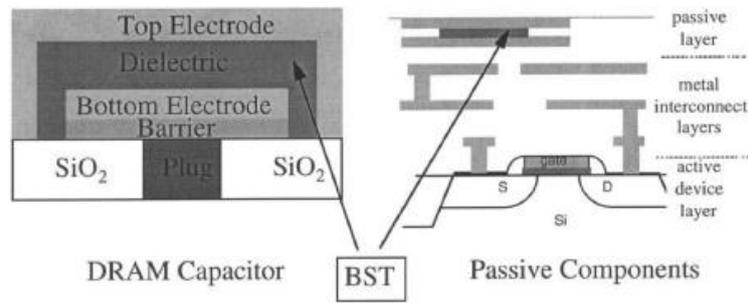


Figura 2.15. Representación esquemática de las aplicaciones del BST en circuitos integrados [Jul15].

---

## CAPITULO 3. ESTUDIO DE ESTRUCTURAS AMC

---

---

### 3.1. Introducción

---

Una vez explicadas las bases teóricas y todo lo necesario para comprender este proyecto se presenta el desarrollo del mismo. En este capítulo se presenta el estudio realizado de diferentes estructuras AMC, con sus ventajas e inconvenientes, con el fin de encontrar la estructura óptima. Debido a que uno de los objetivos de este proyecto conseguir un chessboard reconfigurable, esta primera parte del proyecto se va a centrar en buscar la celda más resonante posible. Como se quiere que las estructuras sean sintonizables se realiza un estudio para ver el comportamiento de la pendiente de la fase cuando esta pasa por cero para obtener la celda que sea más sensible a un cambio de permitividad, siendo a priori la estructura AMC que tenga una mayor caída a la frecuencia de resonancia.

Para realizar los estudios y obtener los resultados, se han simulado las celdas unidad de las diferentes estructuras AMC gracias al software comercial Ansys HFSS, obteniendo parámetros de la estructura como el desfase introducido por la propia estructura a la onda reflejada. A continuación se verán las diferentes estructuras simuladas con sus parámetros y sus resultados.

---

### 3.2. Estructuras Simuladas

---

Se ha realizado el estudio de varias estructuras AMC, pero en este capítulo se van a desarrollar las cuatro estructuras con las que mejores resultados se han obtenido: cruces de Jerusalén, parches metálicos, esvástica y un diseño interdigital de los parches metálicos. Las demás estructuras se pueden ver en el anexo 1.

Cabe destacar que las estructuras que se van a exponer son celdas unitarias. El objetivo es, aparte de ver la pendiente que presentan los AMC a la frecuencia de resonancia, conseguir en la medida de lo posible, la interferencia destructiva. Por ello siempre habrá una pareja de celdas unitarias para restar los desfases que ambas introducen, y ver que la diferencia de fase es cercana a los  $180^\circ$ .

---

#### 3.2.1. Cruces de Jerusalén

---

La primera estructura AMC simulada son las cruces de Jerusalén (ver figura 3.1.). Se escogió esta estructura debido a que esta estructura ha sido previamente utilizada por el Grupo de Antenas de la Universidad Pública de Navarra [Iri13] y se conoce que desfase introduce la estructura. Por tanto se estudiará cómo afecta a estas estructuras el cambio del valor de permitividad. Se partirá de las dimensiones de [Iri13] para realizar el estudio ( $\epsilon_r=10.2$ , material utilizado Rogers RO3010 y la altura del sustrato de 1.27 mm).

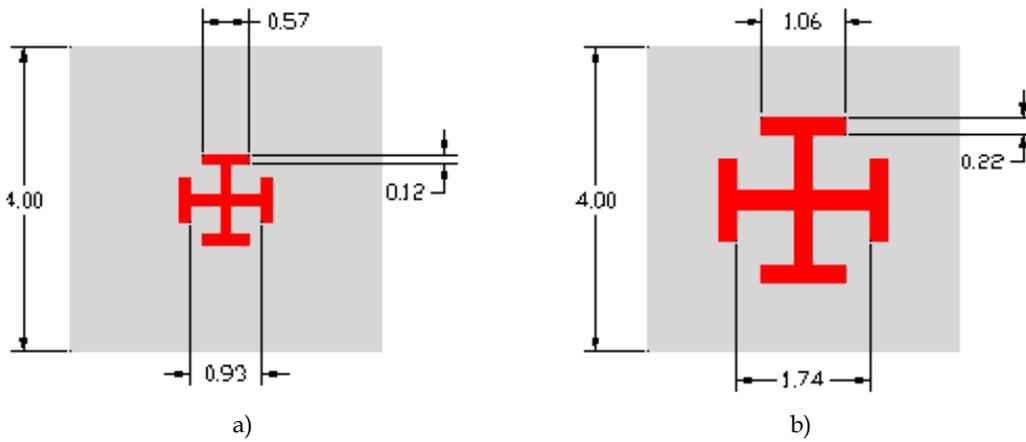


Figura 3.1. Par de estructura AMC Cruz de Jerusalén y sus dimensiones (en mm) [Iri13].

Con las medidas del sustrato y las medidas de la figura 3.1., se ha realizado un estudio paramétrico del valor de la permitividad del sustrato. Se han simulado las celdas unidad para los valores 7, 10.2 y 15 de permitividad. Los resultados de ambas estructuras se pueden ver en las figuras 3.2. y 3.3.

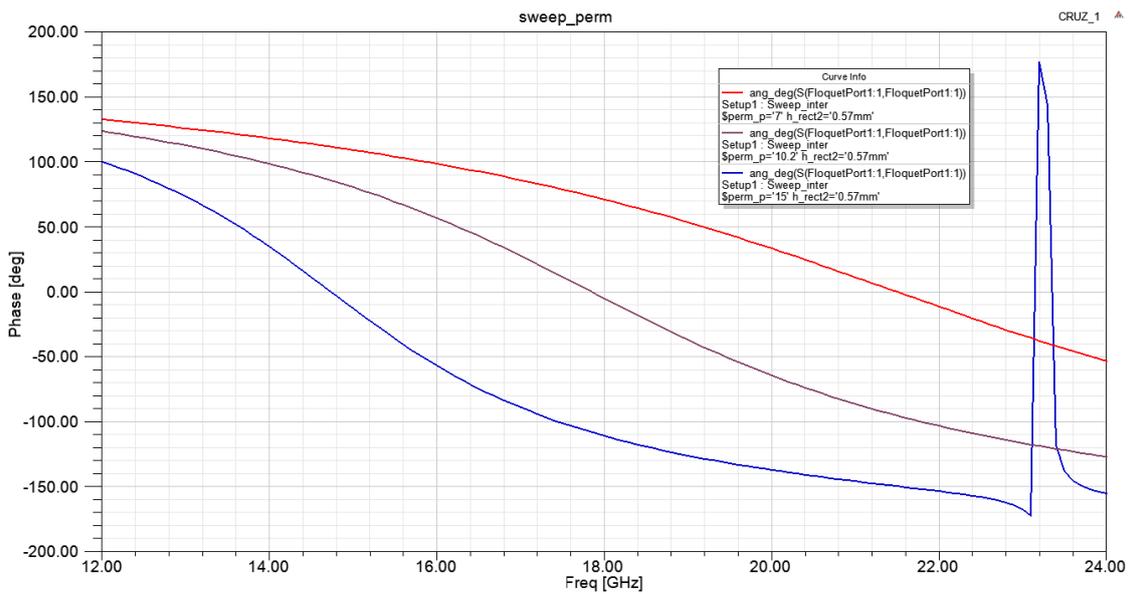


Figura 3.2. Curvas de fase para los valores de permitividad 7 (rojo), 10.2 (violeta) y 15 (azul) para la cruz de la figura 3.1 a).

Se puede comprobar que al cambiar el valor de la permitividad de las celdas, la curva de la fase con respecto a la frecuencia se va desplazando; conforme mayor es el valor de la permitividad más abajo en frecuencia se encuentra la frecuencia de resonancia de los AMC (figura 3.3.).

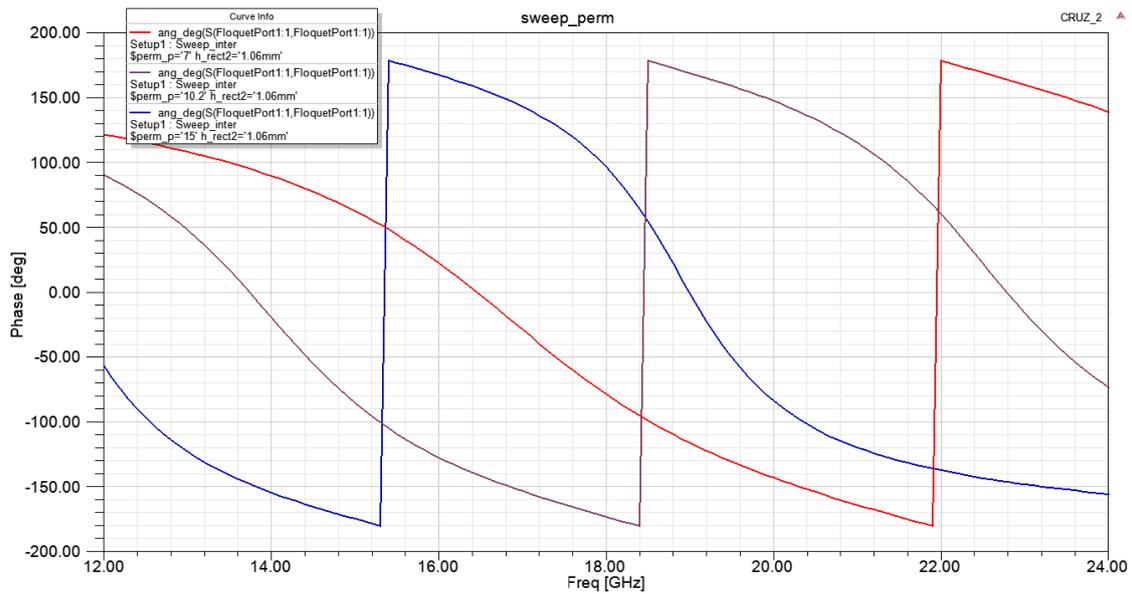


Figura 3.3. Curvas de fase para los valores de permitividad 7 (rojo), 10.2 (violeta) y 15 (azul) para la cruz de la figura 3.1 b).

Para calcular la diferencia de fase entre ambas estructuras se ha utilizado el software comercial Matlab. Se han creado varios script de forma que una vez exportado los datos de las gráficas que hemos obtenido en el software Ansys HFSS, ejecutando los script nos muestre las restas de cada una de las curvas correspondientes a la celda  $AMC_1$  con las de la celda  $AMC_2$ . Esto ha ayudado a reducir considerablemente el tiempo de procesado de la información, acelerando la búsqueda de la combinación óptima y la obtención del ancho de banda de funcionamiento de las estructuras.

En la figura 3.4. se puede ver la diferencia de fase entre las dos celdas unidad. Se ve que conforme el valor de la permitividad aumenta, el rango frecuencial en el que ambas estructuras tienen un desfase en torno a  $180^\circ$ , zona sombreada, se traslada a frecuencias inferiores. Este fenómeno se debe al cambio del valor de la permitividad del sustrato,  $\epsilon$ . La capacidad de la estructura es proporcional al valor de permitividad, como muestra la siguiente expresión [Sie99b]:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (3.1)$$

Al aumentar el valor de permitividad del sustrato, aumenta el valor de la capacidad de la celda unidad. La ecuación 2.3 relaciona la frecuencia de resonancia con los valores de la capacidad y la inductancia. La frecuencia de resonancia es inversamente proporcional a ambos valores, por lo que al aumentar el valor de la permitividad se aumenta el valor de la capacidad, y por lo tanto la frecuencia de resonancia del AMC es inferior. Es por esto que al aumentar el valor de permitividad se ve que el paso por cero de las curvas de fase se produce antes, y que al restar las curvas de fase de ambas estructuras el rango de funcionamiento de estas sea en un rango frecuencial más bajo conforme vamos aumentando el valor de la permitividad.

Cabe destacar que la interferencia destructiva aparece cuando el desfase que existe entre las curvas de dos estructuras diferentes es  $180^\circ$ , pero nosotros tomaremos como referencia el rango frecuencial en el que ese desfase este entre  $180^\circ \pm 20^\circ$  (ver figura 3.4. zona sombreada).

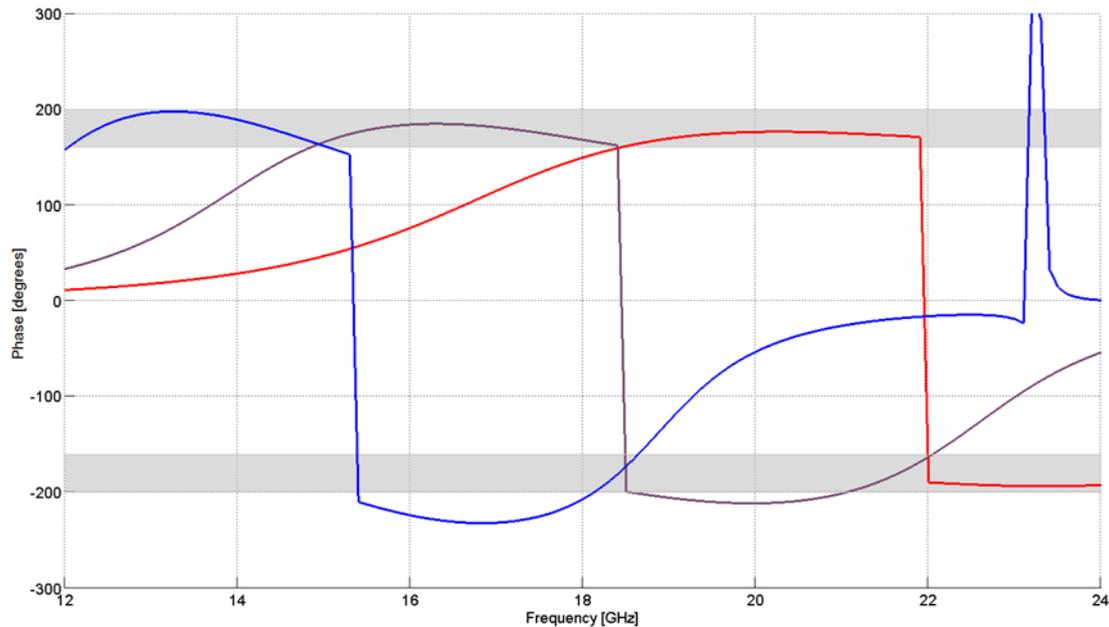


Figura 3.4. Curvas de los desfases de ambas estructuras para los valores de permitividad 7 (rojo), 10.2 (violeta) y 15 (azul) para las cruces de la figura 3.1.

En la tabla 3.1 están resumidos los datos de la figura 3.4.

Permitividad	$f_{\min}$ (GHz)	$f_{\max}$ (GHz)	BW (%)
7	18	25	32,55
10.2	15	22	37,83
15	12	15.5	25,45

Tabla 3.1. Resumen datos figura 3.4.

Aparte del estudio del valor de la permitividad, se ha realizado un estudio para ver cómo cambia el comportamiento de la estructura conforme vamos cambiando la longitud de los brazos de las cruces (ver figura 3.5.). Se puede ver que sí que afecta al comportamiento de la celda este cambio del tamaño de los brazos de la cruz, pero no es un cambio muy significativo, más bien se puede modificar el valor de los brazos para ajustar el ancho de banda de funcionamiento de forma más fina.

Se ha simulado la estructura para el valor de permitividad 10.2 para todas las longitudes de los brazos. Se ha variado la longitud de los brazos desde 0.2 mm hasta 0.9 mm en pasos de 0.1 mm, además del valor nominal de la celda (0.57 mm). La frecuencia de resonancia de los AMC va desde los 18.2 GHz para una longitud de los brazos de 0.2 mm hasta los 17.5 GHz para 0.9 mm de longitud.

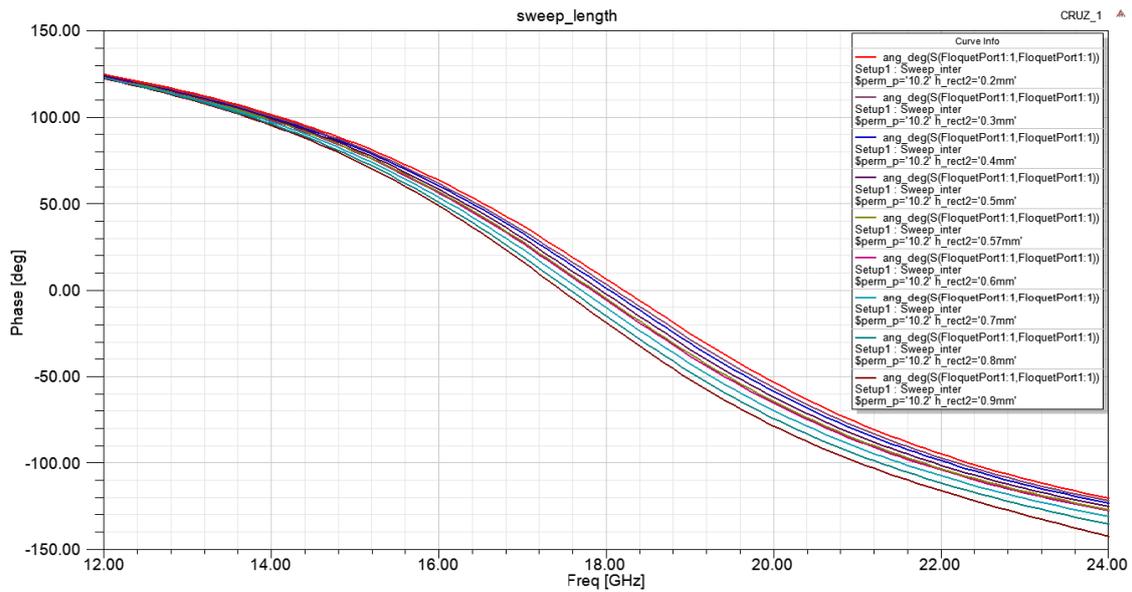


Figura 3.5. Curvas de fase para el paramétrico de la longitud de los brazos de la cruz de la figura 3.1 a).

Por tanto, se va a tomar como referencia la frecuencia de resonancia de la estructura de la cruz más pequeña de las dos, la cual está en torno a los 18 GHz, para poder comparar todos los AMC que se han estudiado. El objetivo en los siguientes apartados será el conseguir un diseño para cada una de las celdas para que la frecuencia de resonancia de cada estructura sea lo más próxima a esta, y así que la comparación sea válida.

### 3.2.2. Parches metálicos

La siguiente estructura a estudio ha sido los parches metálicos, debido a la sencillez que tiene esta estructura AMC. El problema de estos es que solo se puede modificar un parámetro, el de la longitud del lado de estos, ya que los parches estudiados han sido cuadrados, para mantener la simetría con respecto a los ejes x e y (ver figura 3.6.).

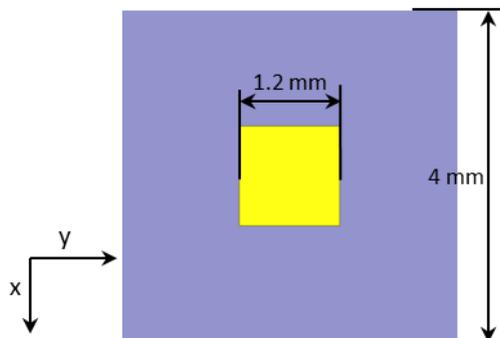


Figura 3.6. Estructura AMC estudiada, parches metálicos.

Debido a que no se disponía de información acerca de este tipo de estructuras, primero se simuló en las mismas condiciones esta celda unidad que la celda unidad de

las cruces de Jerusalén, 1,27 mm de espesor del sustrato, tamaño de la celda de 4x4 mm<sup>2</sup> y el tamaño del parche de 1.2 mm de lado. Este valor del lado del parche se escogió debido a que se realizó un estudio paramétrico de este valor para saber qué tamaño de parche era necesario para que la frecuencia de resonancia de esta estructura AMC fuese similar a la frecuencia de resonancia de la cruz de Jerusalén más pequeña (figura 3.1. a)).

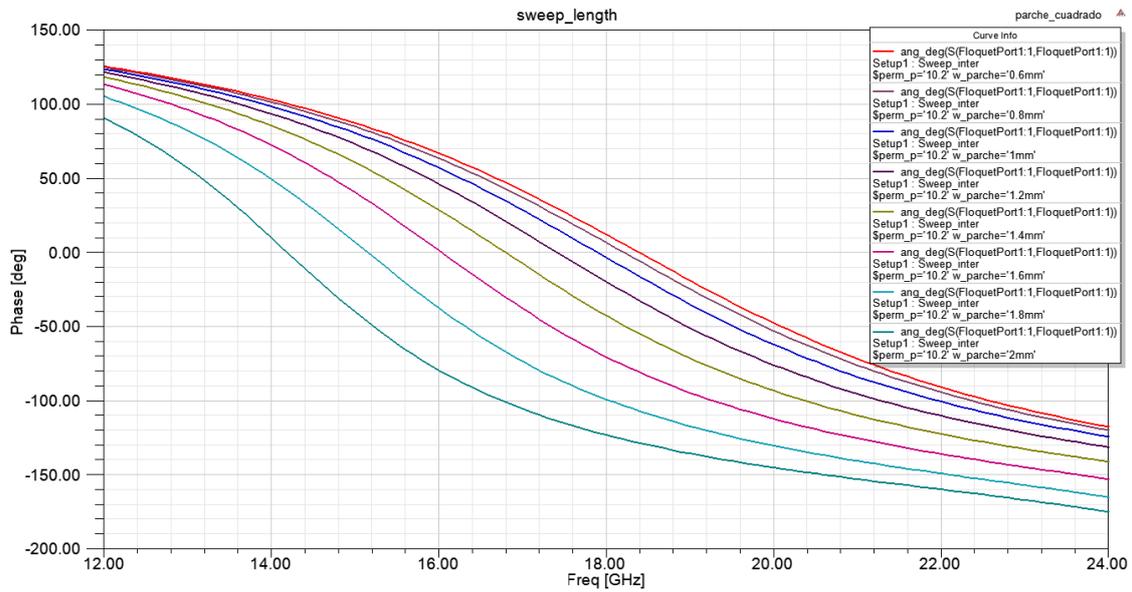


Figura 3.7. Estudio paramétrico para obtener el tamaño del parche para que la frecuencia de resonancia fuese similar a la de la cruz de Jerusalén.

Una vez obtenidas todas las dimensiones de esta estructura, se simuló esta celda para los valores de permitividad del sustrato de 7, 10.2 y 15, al igual que las cruces de Jerusalén (ver figura 3.8.).

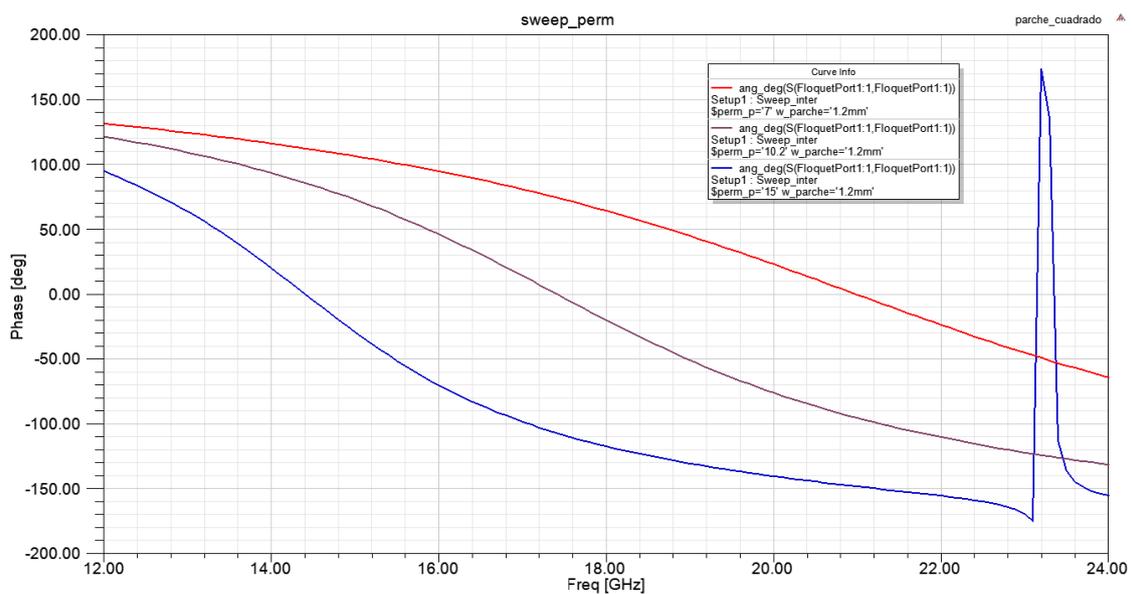


Figura 3.8. Curvas de fase para el parche metálico de la figura 3.6 con permitividad 7 (rojo), 10.2 (violeta) y 15 (azul).

Como se puede ver, el comportamiento de esta estructura es muy similar a la celda unidad de la cruz de Jerusalén más pequeña de las vistas en el apartado anterior (figura 3.2.). Debido a esto, vemos que la pendiente de la fase cuando esta pasa por cero es muy similar a la pendiente de la cruz de Jerusalén más pequeña de las vistas. Este resultado se comentará con mayor profundidad en el apartado 3.3.

### 3.2.3. Esvástica

Otra de las estructuras AMC que se ha estudiado ha sido una variante de las cruces de Jerusalén, la esvástica modificada [Kus13]. Como se quiere obtener una estructura que sea lo más resonante posible, se ha escogido esta estructura, debido a que se puede aumentar la longitud de los brazos, aumentando por lo tanto la inductancia,  $L$ , de la celda, y como los brazos están muy próximos entre sí, el AMC presenta también una alta capacidad (ver figura 3.9.).

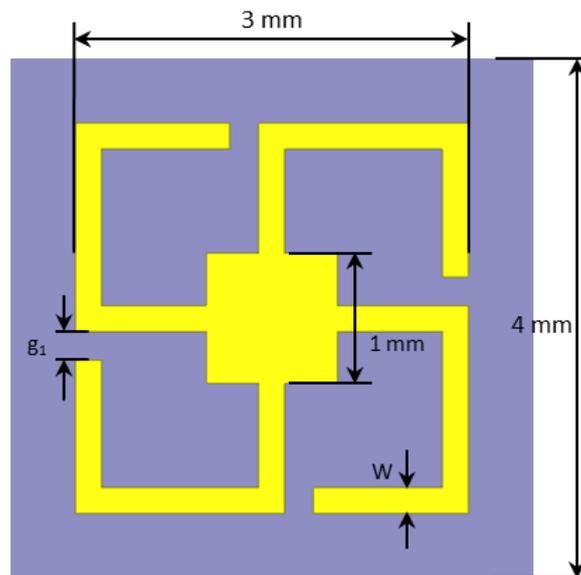


Figura 3.9. Estructura AMC esvástica simulada y sus dimensiones.

Las dimensiones de esta celda unidad son  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  de sustrato, con una altura de  $1.27 \text{ mm}$ , como en los parches metálicos y las cruces de Jerusalén. Las dimensiones del AMC son  $3 \text{ mm}$  de ancho,  $1 \text{ mm}$  de lado para el cuadrado interior (ver figura 3.9. b)). Se ha dejado como variables que podrían modificar su valor tanto el gap que existe entre los brazos ( $g_1$ ), como la anchura de los brazos de la esvástica ( $W$ ).

Debido a que la fresadora que hay en la Universidad Pública de Navarra, con la que se fabricará un diseño, tiene una resolución mínima de  $150 \mu\text{m}$ , se decidió que el valor mínimo para los diseños debería de ser  $200 \mu\text{m}$ . Por ello se ha escogido  $W=0.2 \text{ mm}$ , y se hizo un paramétrico del valor de  $g_1$  para comprobar cómo afecta este parámetro al comportamiento de la estructura. Se simulará esta celda unidad con el valor de permitividad  $10.2$  para poder hacer la comparación de las frecuencias de resonancia de las curvas de fase para el estudio paramétrico del valor  $g_1$ .

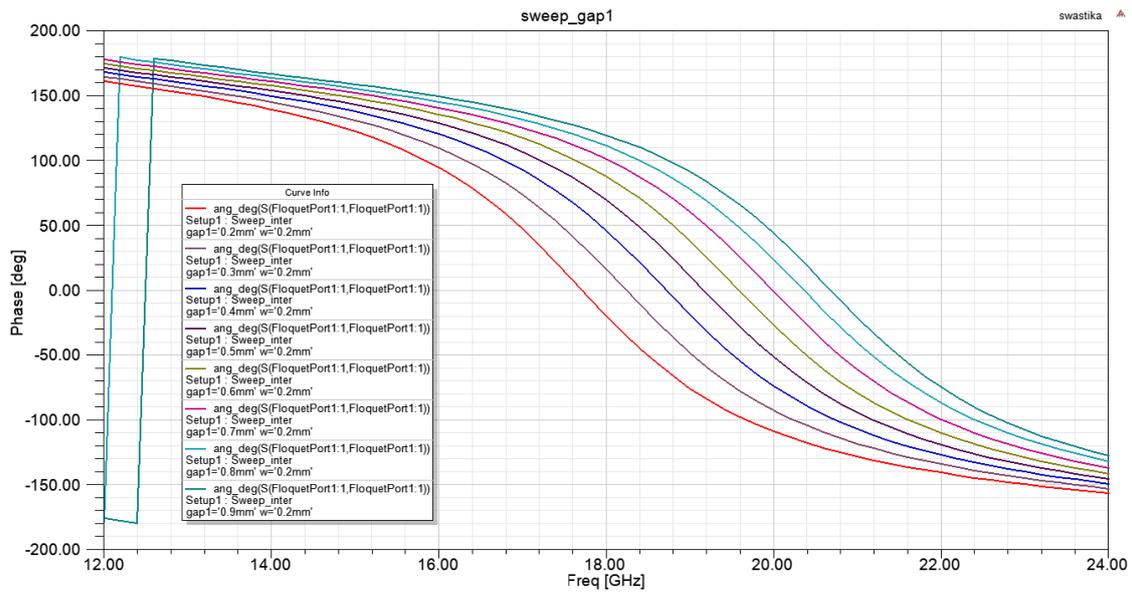


Figura 3.10. Curvas de fase para el estudio paramétrico de la variable  $g_1$  de la esvástica.

Como se puede ver en la figura 3.10. el valor de  $g_1$  que más se acerca a la frecuencia de resonancia de las demás estructuras (cruces de Jerusalén y parches metálicos) es 0.2 mm, ya que la frecuencia de resonancia está en torno a los 18 GHz para  $g_1=0.2$  mm (curva roja). Es por esto que se va a utilizar este tamaño para esta variable. Se puede ver que afecta relativamente bastante el hecho de elegir un tamaño u otro para la variable  $g_1$ . La frecuencia de resonancia varía desde los 18 GHz hasta los 22 GHz para un valor de  $g_1$  de 0.9 mm. Esto tiene sentido debido a que para un tamaño grande, el valor de la capacidad disminuye, y por tanto la frecuencia de resonancia es mayor.

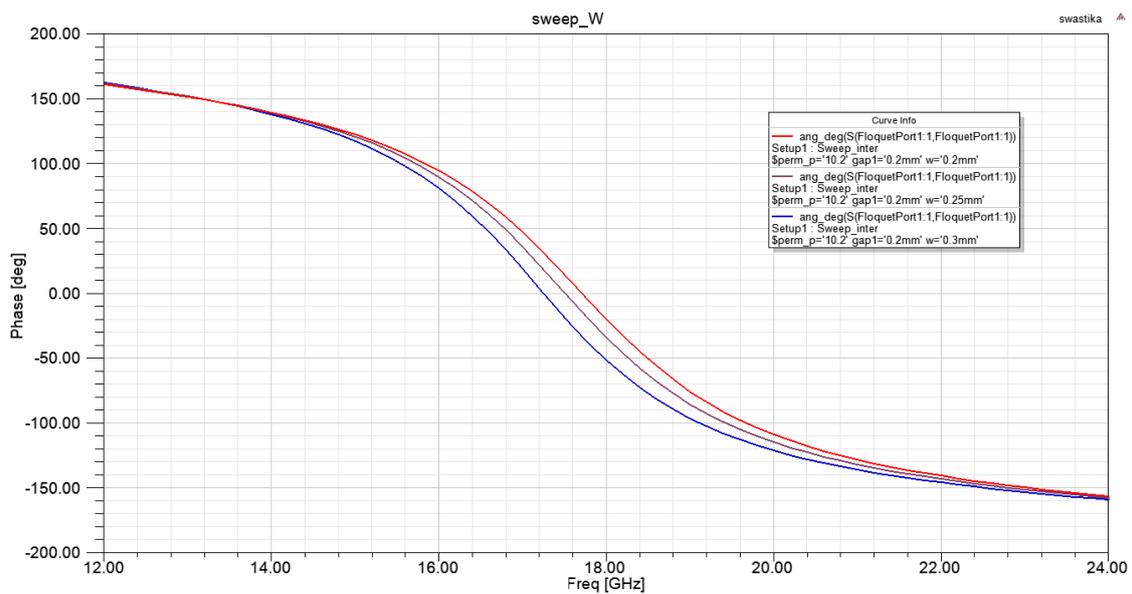


Figura 3.11. Curvas de fase del estudio del comportamiento de la esvástica al cambiar la anchura de los brazos.

Una vez fijado el valor de la variable  $g_1$ , se estudia cómo influye el hecho de cambiar el valor del parámetro de la anchura de los brazos de la esvástica. En la figura 3.11. se ve como al cambiar la anchura de los brazos de la esvástica las curvas son bastante similares. Esto es debido a que no hay una gran diferencia entre los valores de la anchura de los brazos simulados, solo 100  $\mu\text{m}$ .

La curva que más se aproxima su paso por cero al paso de las otras estructuras es  $W = 0.2 \text{ mm}$ . Por tanto, las dimensiones óptimas para hacer que la frecuencia de resonancia de este AMC sea lo más similar a la frecuencia de resonancia de las otras estructuras son  $g_1 = 0.2 \text{ mm}$  y  $W = 0.2 \text{ mm}$ . Una vez obtenidas todas las dimensiones para esta celda unidad, se ha simulado, al igual que en las otras estructuras, el comportamiento que tienen al cambiar el valor de la permitividad, exactamente para los valores 7, 10.2 y 15. En la figura 3.12. se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones. Estos datos serán comentados en el apartado 3.3, cuando se comparen las cuatro estructuras.

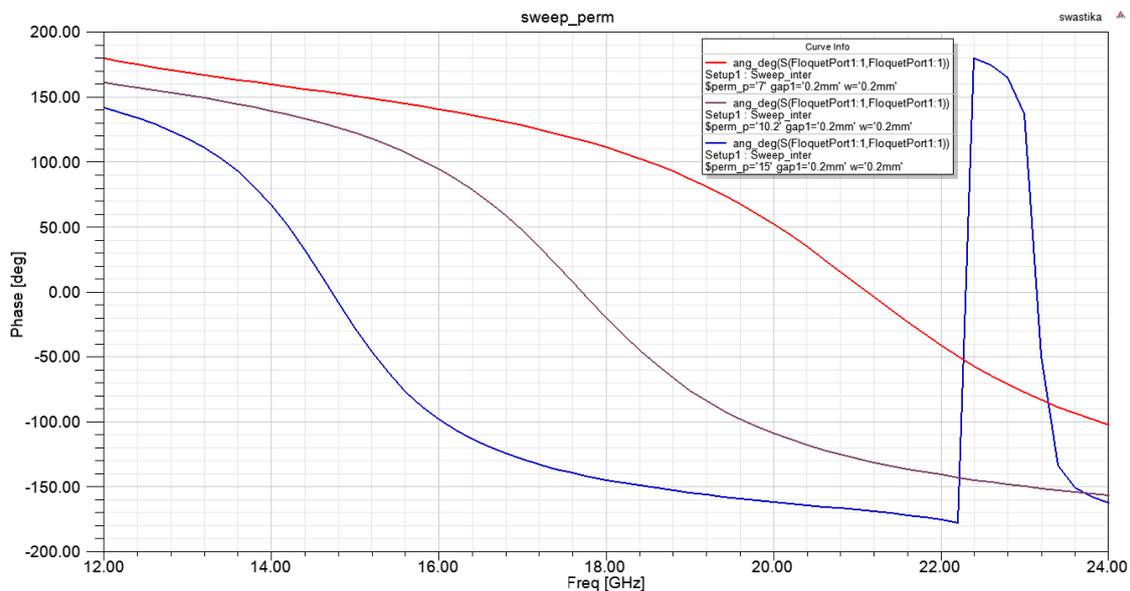


Figura 3.12. Curvas de fase para la esvástica con valores de permitividad 7 (rojo), 10.2 (violeta) y 15 (azul).

### 3.2.4. Parche Interdigital

La última celda unidad a estudio para realizar esta comparativa y de la que se han obtenido resultados aceptables ha sido el parche interdigital. Este AMC es una variación del parche metálico cuadrado visto en el apartado 3.2.2. La diferencia entre esta estructura y el parche convencional es que este AMC tiene fingers (dedos, en inglés) los cuales sobresalen del parche metálico cuadrado convencional (ver figura 3.13.). Se busca aumentar la capacidad de la celda mediante la inclusión de los fingers.

Esta estructura tiene muchos parámetros que se pueden manejar para ajustar su comportamiento. Tenemos en primer lugar el tamaño del parche, el número de dedos que tiene cada parche y por último la altura y la anchura de estos. La celda unidad que

se va a estudiar está conformada por un array 2x2 (ver figura 3.13. a)). Esto es debido a que se necesita una estructura que sea simétrica en los ejes  $x$  e  $y$  para poderla simular en el software comercial Ansys HFSS. Es por ello que la celda que se ha simulado es la celda resultante de cortar la estructura 2x2 por los ejes de los antiguos parches, como se puede ver en la figura 3.13. a), resultando la celda unidad de la figura 3.13. b). Esta celda unidad tiene las mismas dimensiones que las anteriores celdas unitarias,  $4 \times 4$  mm<sup>2</sup> de tamaño para el substrato, y 1.27 mm de espesor.

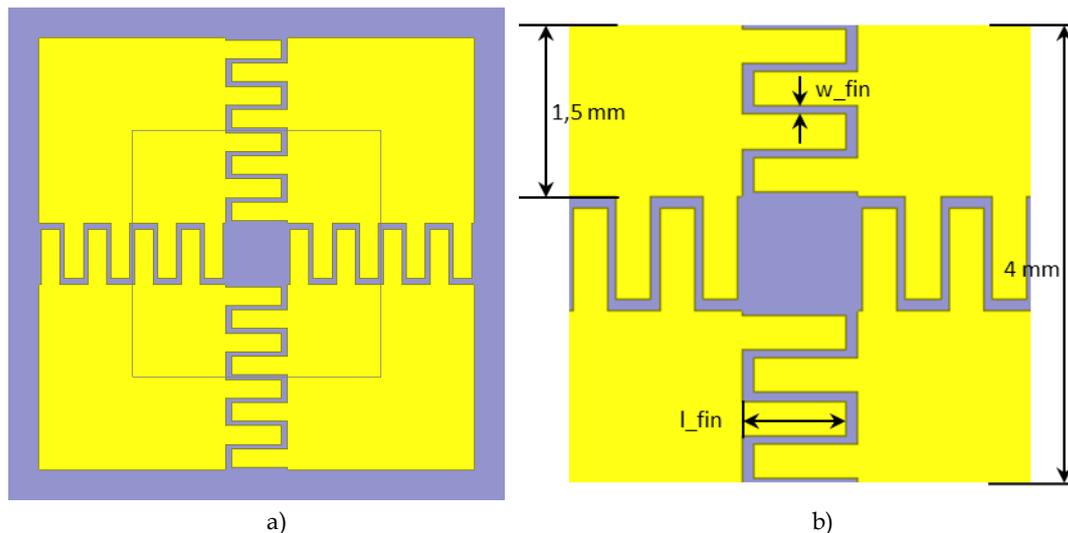


Figura 3.13. Estructura parche interdigital de 8 fingers a) estructura 2x2 celdas y b) zoom de celda unidad y sus dimensiones.

Se ha fijado el número de fingers a cuatro por cada lado de un parche, lo que hace un total de 8 entre los lados de dos parches, pero al convertir la estructura de 2x2 celdas en la celda unitaria a simular, el número de fingers por lado será cuatro. El tamaño de los parches es diferente al caso de los parches metálicos cuadrados, debido a que lo que queremos conseguir con este AMC es aumentar en la medida de lo posible el valor de la capacidad que existe entre los fingers, por ello se necesita que estén lo más cerca posible unos de otros. Además, gracias a los dedos la inductancia que tiene la estructura es más elevada que para el caso del parche simple también. El valor que se ha escogido para el lado de los parches ha sido 3 mm. En la figura 3.13. b) está el resumen de las unidades de este AMC.

Por tanto, quedan dos variables en el diseño de esta estructura, la anchura y la longitud de los fingers. Se ha realizado un barrido tanto de la altura de los dedos como la anchura de los mismos. Cabe destacar que tampoco se ha podido simular un gran rango de valores de estas variables, ya que el espacio entre los parches es de 1 mm y al haber 4 fingers en 1.5 mm no se puede simular valores altos de anchura y altura de los dedos. Primero se ha fijado el valor de la anchura de los dedos y se ha realizado el barrido de la altura de estos para ver cómo afecta este parámetro a la frecuencia de resonancia del AMC (ver figura 3.14.). Para hacer esta simulación se ha tomado para el

substrato un valor de permitividad de 10.2, y la anchura de los dedos para realizar esta simulación ha sido 0.2 mm.

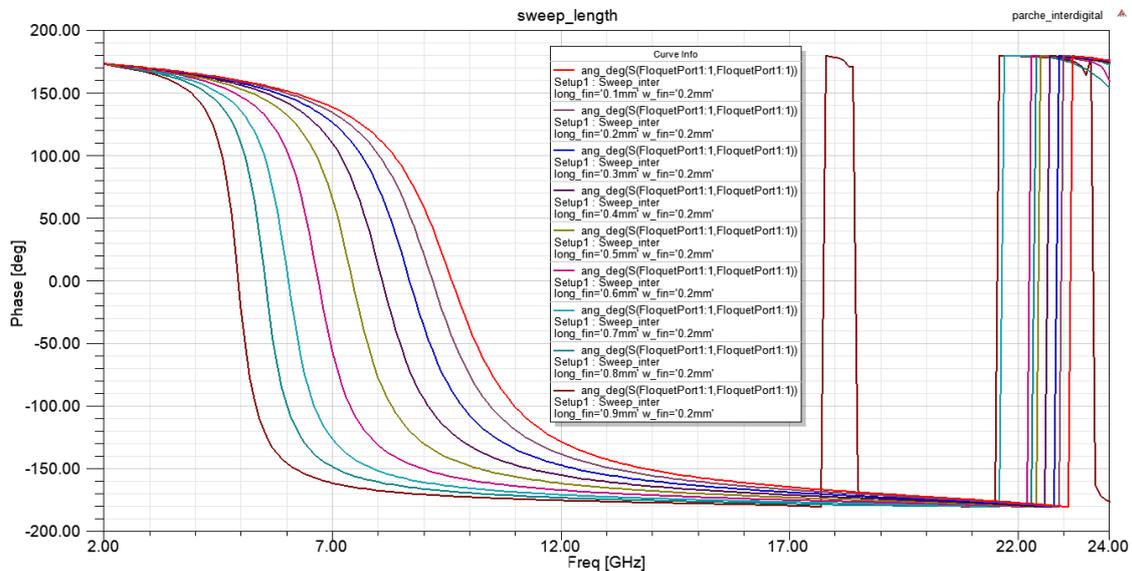


Figura 3.14. Curvas de fase para los diferentes valores de  $l_{fin}$

Como se puede ver en la figura 3.14., al variar el parámetro de la longitud de los dedos cambia bastante el comportamiento del AMC. En concreto lo que más cambia es la frecuencia de resonancia de estos, variando de 9.5 GHz para un valor de la longitud de 0.1 mm hasta los 5 GHz para  $l_{fin}= 0.9$  mm. Se puede ver que las frecuencias de resonancia son más bajas que para los AMC anteriormente estudiados. El AMC cuya frecuencia de resonancia más se acerca a los demás es para  $l_{fin}= 0.1$  mm, pero como se ha explicado anteriormente la medida mínima en nuestros diseños ha de ser de 0.2 mm. Por tanto se ha elegido este valor para la longitud de los fingers.

Con el valor de la longitud de los fingers escogido, se ha simulado el barrido de valores para la anchura de estos. Como se ha mencionado anteriormente, el rango de valores que se va a simular es muy pequeño debido a que solo hay 1.5 mm para meter cuatro dedos. Los resultados de la simulación se pueden ver en la figura 3.15.

Se puede ver que al cambiar la anchura de los fingers no existe apenas variación entre las curvas de fase de este AMC. A priori puede parecer que esta celda tiene mucha pendiente en torno a la frecuencia de resonancia, pero la frecuencia de resonancia está en torno a los 6 GHz por abajo que las frecuencias de resonancia de las otras tres celdas. Para mover esta frecuencia de resonancia se puede cambiar el tamaño del substrato y dejar el AMC como está. Sin embargo, en esta celda no es posible hacer esto debido a que por cuestiones de simetría el AMC tiene que llegar hasta el borde del substrato para no romper esta simetría. La única solución que se puede intentar es la de aplicar un factor de escala a toda la estructura.

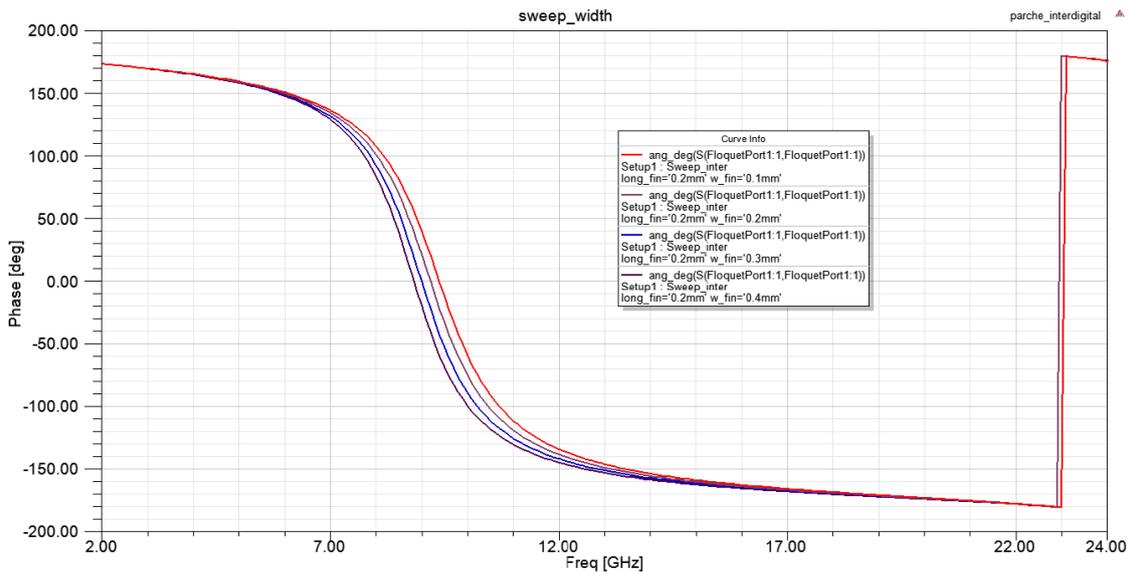


Figura 3.15. Curvas de fase para el barrido de valores de  $w_{fin}$ .

El valor de las variables  $w_{fin}$  y  $l_{fin}$  será 0.2 mm, debido a que la curva cuyo valor de  $w_{fin}$  más próximo a la frecuencia de resonancia es para  $w_{fin} = 0.1$  mm, y debido a la limitación de la fresadora, se ha escogido para hacer las simulaciones 0.2 mm, al igual que el valor para  $l_{fin}$ .

Por tanto, se ha simulado, con las dimensiones anteriormente mencionadas de  $l_{fin}$  y  $w_{fin}$ , como cambiarían las curvas de fase al aplicar un factor de escala a toda la estructura, salvo la altura del sustrato que se ha mantenido debido a que la altura del Rogers RO3010 es de 1,27 mm. En la figura 3.16. se muestran los resultados del barrido para el parámetro escala, cuando es aplicado a toda la estructura, manteniendo la altura del sustrato.

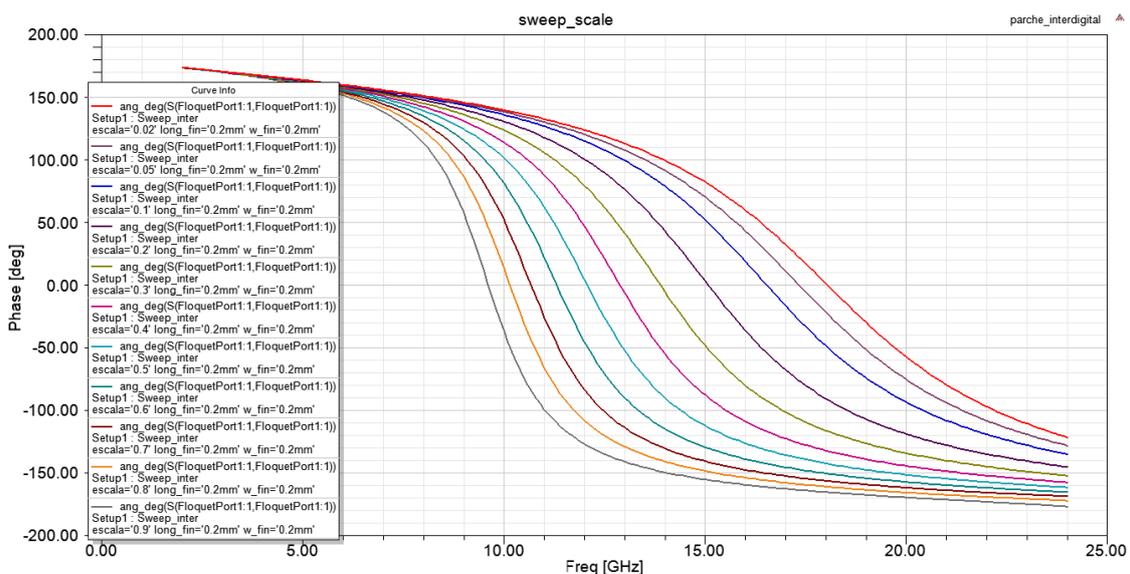


Figura 3.16. Curvas de fase para el barrido de valores del factor escala aplicado a la celda.

Como se puede ver en la figura 3.16., el cambio de escala hace que conforme el factor de escala sea más pequeño, la frecuencia de resonancia de las curvas del AMC resultante esté más próxima a la frecuencia de resonancia buscada, la frecuencia de resonancia de las otras tres celdas estudiadas. Sin embargo, el factor de escala que es necesario para que sean similares es muy pequeño, en torno a 0.02, por lo que en la práctica es imposible realizar este diseño y poder fabricar. De todas formas para hacer la comparativa no se ha tenido en cuenta esta limitación y se ha simulado el barrido del valor de la permitividad con este factor de escala aplicado a la celda ya diseñada.

Por tanto, el último paso es simular el barrido del valor de la permitividad del sustrato, con los valores 7, 10.2 y 15 (ver figura 3.17.).

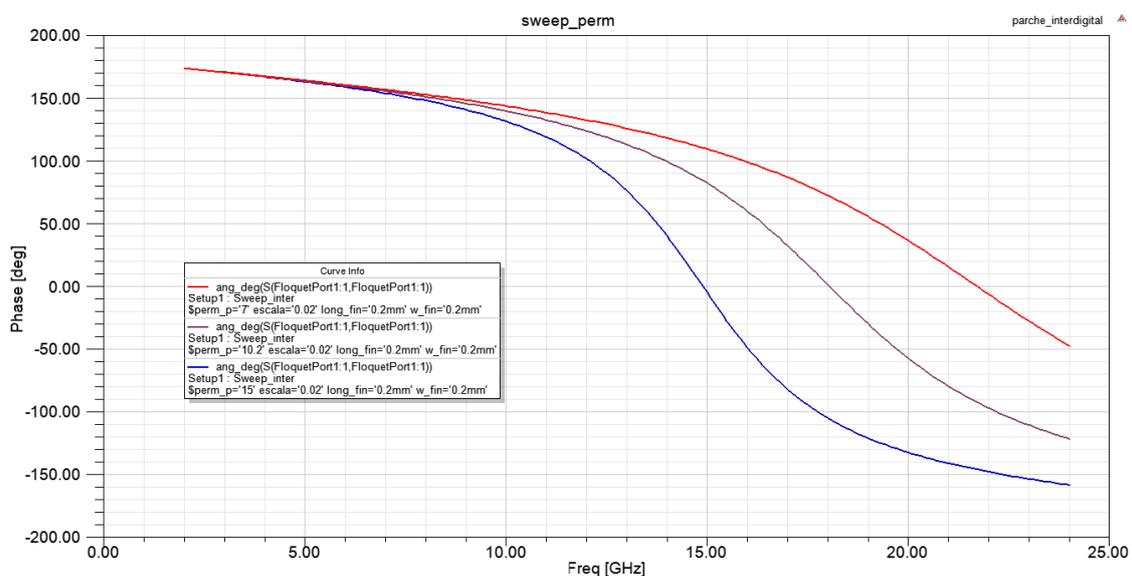


Figura 3.17. Curvas de fase para la estructura parche interdigital, con un factor de escala aplicado de 0.02, para los valores de permitividad 7 (rojo), 10.2 (violeta) y 15 (azul).

### 3.3. Comparativa de las estructuras

Una vez que se han obtenido los diseños de las cuatro estructuras, con sus respectivas gráficas para los valores de permitividad del sustrato 7, 10.2 y 15, se han comparado dichas estructuras para ver cuál de ellas es más resonante y ver si una misma variación del valor de la permitividad se traduce en la misma variación de la frecuencia de resonancia de los AMC. Se escogerá aquella estructura cuya curva de fase tenga mayor pendiente en torno a la frecuencia de resonancia del AMC y que presente una mayor variación frecuencial al cambiar el valor de la permitividad, que en nuestro caso está en torno a los 18 GHz.

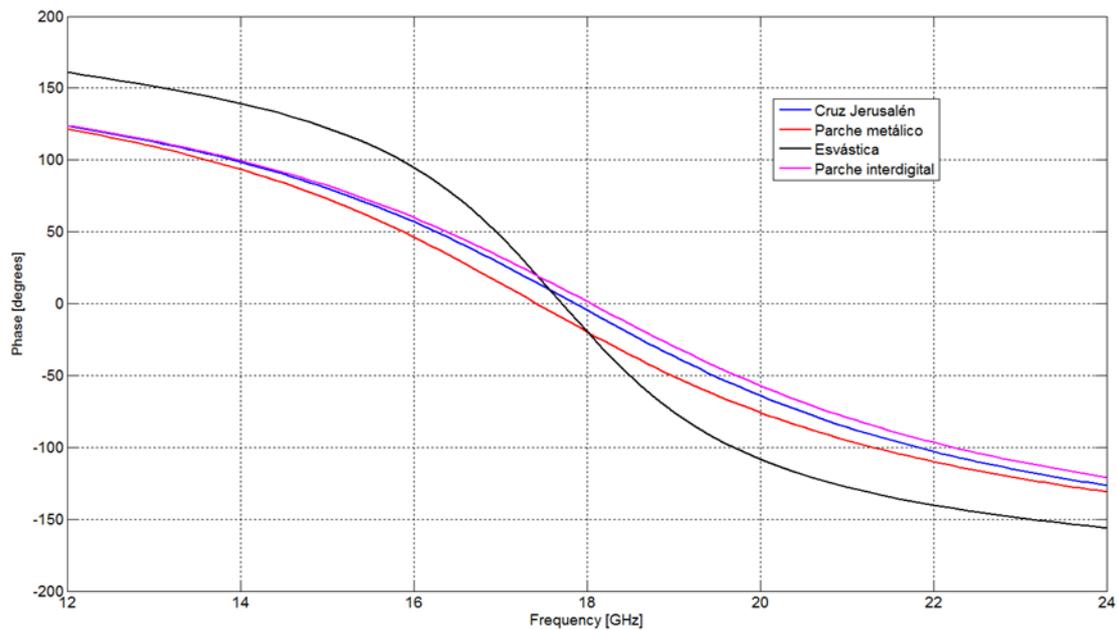


Figura 3.18. Comparación de las curvas de fase para las distintas estructuras estudiadas para el valor de permitividad del sustrato 10.2.

Como se puede ver en la figura 3.18., entre las estructuras de la cruz de Jerusalén, el parche metálico y el parche interdigital no existe gran diferencia. El parche interdigital es de las tres celdas el que mayor frecuencia de resonancia presenta, y el parche metálico cuadrado convencional el que menos, habiendo una diferencia de menos de 1 GHz entre ambas frecuencias de resonancia. A pesar de esta diferencia entre las frecuencias de resonancia, la pendiente en torno a 18 GHz de estas curvas es muy similar. Por tanto se puede decir que el comportamiento de estas estructuras es muy similar entre ellas, lo que quiere decir que frente a un cambio del valor de la permitividad del sustrato, el cambio que tendrán será similar, o que es lo mismo, son igual de resonantes.

Sin embargo, hay una curva que presenta un comportamiento diferente a estas tres estructuras, la esvástica. Se puede ver como a la frecuencia de resonancia de todas las celdas, la pendiente con la que cae la curva de fase es bastante mayor que para el resto de estructuras. Con esta información se puede afirmar, a priori, que esta estructura es más sensible al cambio del valor de permitividad.

Para comprobar que esto sucede realmente, se va a comparar las estructuras cruz de Jerusalén y esvástica para los tres valores de permitividad del sustrato que se han simulado, 7, 10.2 y 15 (ver figura 3.19.).

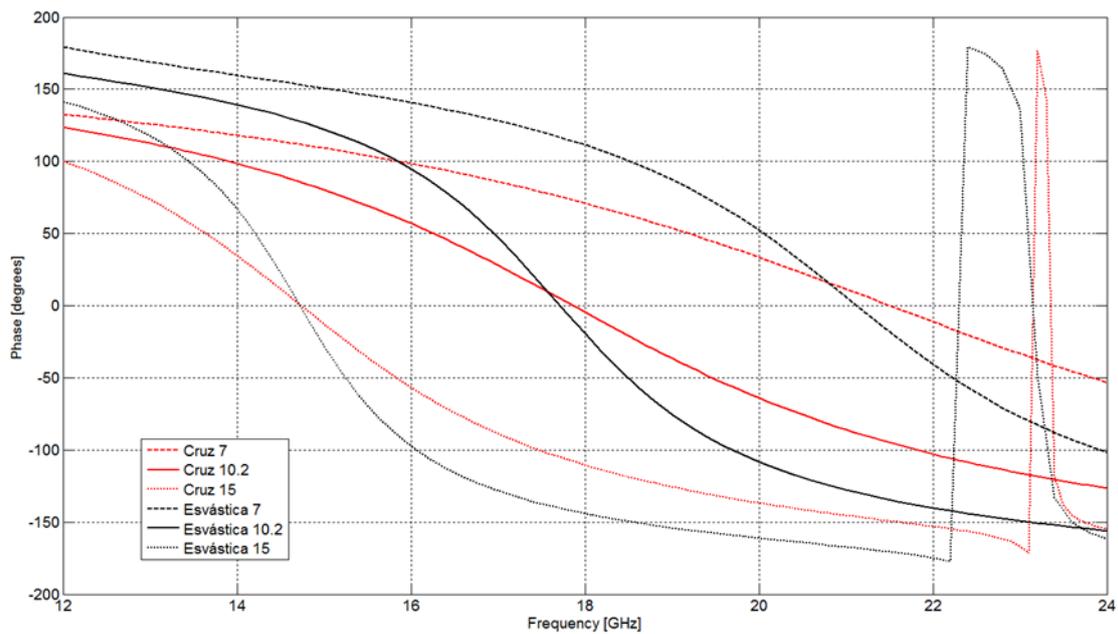


Figura 3.19. Comparación entre cruz de Jerusalén y evástica para los valores de permitividad 7 10 y 15.

Como se puede ver en la figura 3.19., la evástica es más resonante para los tres valores de permitividad, ya que en los tres casos la pendiente que tiene la curva de fase en torno a la frecuencia de resonancia es mayor que para las curvas de fase de la estructura de la cruz de Jerusalén. Sin embargo, las frecuencias de resonancia para ambas estructuras son muy similares, por lo que se puede decir que ambas estructuras son igual de sensibles al cambio de permitividad. Por tanto, aunque la estructura evástica sea más resonante que la cruz de Jerusalén, ambas son igual de sensibles y no existe una relación directa entre que una celda sea más resonante y que sea más sensible al cambio de permitividad.

Para finalizar este capítulo, la celda que se ha elegido para continuar el desarrollo de este proyecto ha sido la evástica, debido a varias razones. Una de las razones ha sido que para este AMC no se tienen datos sobre que dos tipos de celdas se necesitan para crear interferencia destructiva. De esta forma si obtenemos un par de celdas, se puede comparar a las cruces de Jerusalén. El otro motivo por el que se ha escogido esta estructura ha sido debido a que esta estructura tiene más variables a la hora de hacer el diseño, así que tenemos mayor libertad a la hora de diseñar este AMC.

## CAPITULO 4. ESTUDIO DEL AMC ESVÁSTICA Y SIMULACIÓN DE LA ESTRUCTURA CHESSBOARD

### 4.1. Introducción

Una vez escogida la celda unidad que se va a tomar como referencia, se ha hecho un estudio para encontrar una pareja de celdas con las que podamos simular una estructura chessboard completa. La celda que se va a utilizar para este estudio va a ser la estructura esvástica, vista en el apartado 3.2.3. Este capítulo va a estar dividido en dos, en la primera parte se hablará sobre el estudio de la celda unidad esvástica, y en la segunda parte se verá otra celda unidad estudiada a raíz de la esvástica.

### 4.2. Esvástica

Como se ha explicado en el capítulo anterior, de las cuatro celdas unitarias que se ha estudiado el AMC con forma de esvástica es la estructura que mayor resonancia presenta. También se ha visto que aunque sea la celda que mayor resonancia tiene, esto no significa que sea más sensible al cambio del valor de la permitividad del sustrato. Es por esto que se va a centrar en conseguir, con este tipo de AMC, crear interferencia destructiva para una pareja de celdas. En la figura 4.1. se puede ver las dimensiones que se obtuvieron anteriormente y que hacían que esta estructura fuese la más resonante de las cuatro estructuras estudiadas.

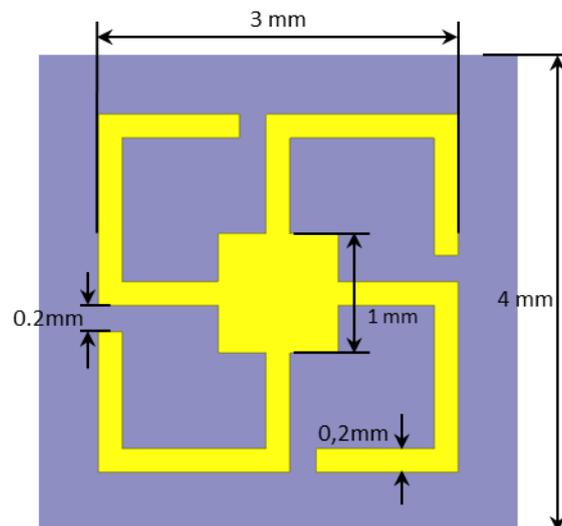


Figura 4.1. Estructura AMC esvástica con sus dimensiones vistas en el capítulo 3.

#### 4.2.1. Estudio Estructura AMC

El objetivo de este apartado ha sido el conseguir que un par de celdas unitarias creen interferencia destructiva. Se intentará que el rango en el que esta condición se cumpla sea el mayor posible.

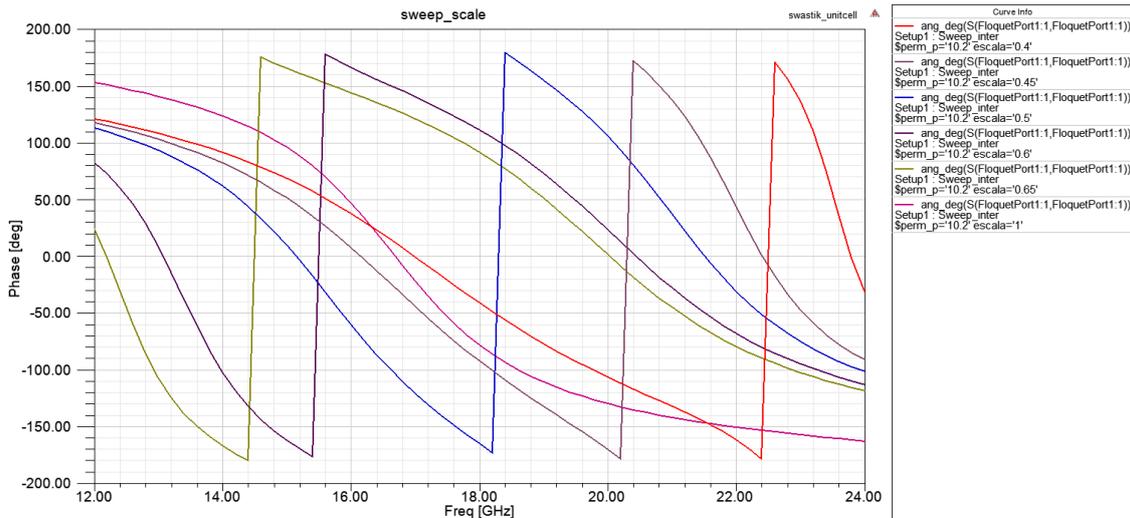
En esta estructura AMC existen varios parámetros que se pueden modificar para realizar un estudio de cómo afectan estos al comportamiento de la fase de la onda reflejada por la estructura. Como se ha visto en el capítulo anterior, el modificar los valores del hueco que existe entre los brazos de la esvástica ( $g_1$ ) y para la anchura estos ( $W$ ) no cambia excesivamente el comportamiento que presenta la estructura. Por este motivo se ha decidido no hacer un estudio paramétrico de estos valores.

Una opción que se puede implementar es la de aplicar un factor de escala a la estructura, y de esta forma conseguir que la frecuencia de resonancia del AMC cambie, pudiendo que esa frecuencia de resonancia modificada sea más baja o más alta en frecuencia dependiendo de si el factor de escala es mayor o menor que 1.

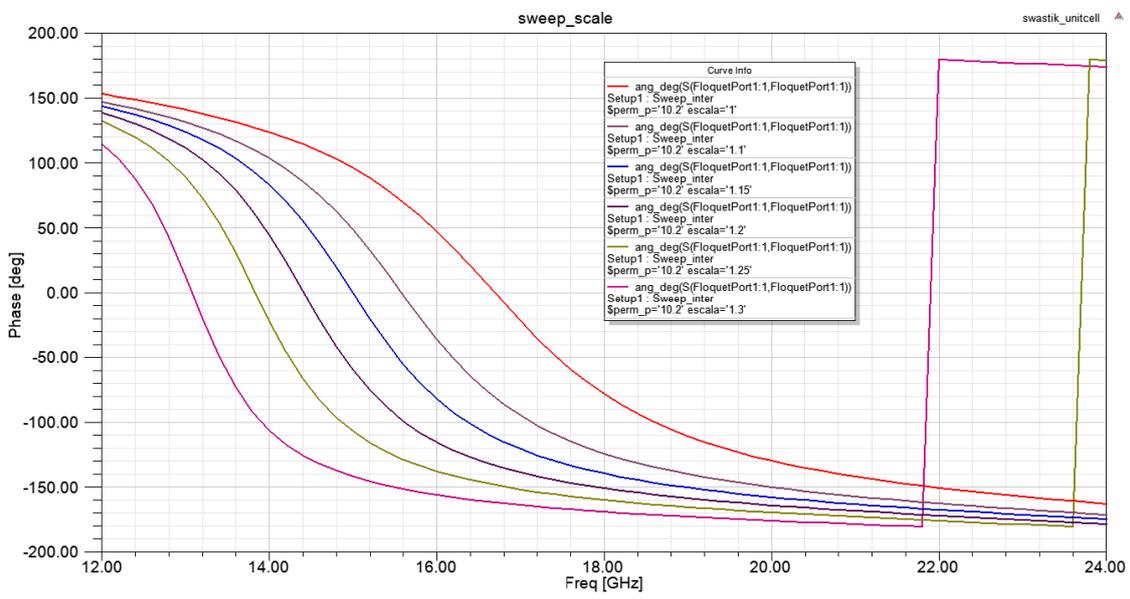
Al contrario de lo mostrado con el parche interdigital, a la hora de aplicar el factor de escala a la estructura esvástica sólo se le ha aplicado al AMC metálico, lo que quiere decir que el sustrato no ha modificado a la hora de realizar este barrido. Las dimensiones del sustrato para todas las simulaciones que se realizaron fueron  $4 \times 4$  mm<sup>2</sup> y 1.27 mm de altura.

En el anterior capítulo se comentó que existía una limitación en cuanto a las dimensiones mínimas que debía de tener el diseño debido a que si en un futuro se querría fabricar la estructura, el tamaño mínimo que la fresadora mecánica puede fabricar es 0.2 mm. A la hora de aplicar este factor de escala se intentará respetar estas dimensiones mínimas, es decir, se intentará aplicar un factor de escala mayor que uno, debido a que tanto el hueco que hay entre los brazos de la esvástica y la anchura de estos tienen 0.2 mm de valor. En caso de no poder cumplir con esta condición pero encontrar un par de celdas cuya diferencia de fase esté en torno a  $180^\circ$  se seguirá con el estudio, a pesar de que esa estructura puede que no pueda ser fabricada.

El barrido del parámetro escala se ha realizado dejando el valor de la permitividad del sustrato fija en 10.2, valor que se ha estado tomando de referencia. Por tanto, con estas medidas del sustrato y el valor del mismo se ha realizado el estudio del factor de escala que es necesario aplicar al AMC para que exista interferencia destructiva entre dos celdas con diferente factor de escala. Como no se sabe qué rango de valores para la variable escala hay que estudiar, se va a hacer un barrido simulando pocos valores. El barrido de valores que se ha simulado comprende los valores del factor de escala en torno a 0.65, para tener una referencia de cómo afecta el reducir el tamaño del AMC, y en torno a 1.2 para ver qué sucede al aumentar el tamaño del AMC. Hay que resaltar que no se puede simular cualquier valor para el factor de escala mayor que la unidad, ya que tenemos el límite del valor del lado del sustrato. El valor máximo de la variable escala que se puede simular será 1.3.



a)



b)

Figura 4.2. Curvas de fase de la esvástica para un barrido en el valor del factor de escala aplicada al AMC a) para valores del factor de escala menores que uno y b) para valores mayores que uno.

El barrido simulado se puede ver en la figura 4.2. Se muestra en dos figuras, una para los valores del factor de escala mayores que la unidad y la otra figura para los valores de la escala menores que uno, debido a que si se hubiese puesto toda la información en una misma gráfica, no se podían ver bien los resultados.

En la figura 4.2. a) se puede ver los resultados del barrido del valor del factor de escala para los valores que están por debajo de la unidad. En concreto se puede ver las curvas de fase para los valores de escala desde 0.4 hasta 0.65, en pasos de 0.05. Además de estas curvas, también se puede ver en la gráfica la curva de fase para la estructura esvástica sin aplicar ningún factor de escala, para poder comparar las curvas.

Se observa que el cambio que se produce al variar el valor del escalado modifica la frecuencia de resonancia de 12 GHz a 16 GHz. Aunque la forma de las curvas de fase es muy similar, se puede ver que puede llegar a ser posible tener en un rango relativamente amplio interferencia destructiva, ya que se puede ver como las curvas de fase tienen la misma pendiente y están algo separadas, por lo que si se consigue que la diferencia entre las curvas esté en torno a  $180^\circ$ , se podría obtener un buen ancho de banda de funcionamiento de nuestra.

En la figura 4.2. b) se puede ver el barrido del valor de la escala para valores mayores que uno. Ya se ha comentado antes que se tiene una limitación a la hora de aplicar el factor de escala, y que esta limitación sólo deja aplicar un factor de escala máximo de 1.3. Es por esto que se ha simulado esta estructura para los valores de escala desde 1.1 hasta 1.3, en pasos de 0.05. Al igual que en la gráfica de la figura 4.2. a), también se puede ver la curva de fase de la estructura sin un factor de escala, para tener esa curva de fase como referencia.

Se puede ver que el aumentar el factor de escala no cambia mucho la forma que tienen las curvas de fase. Las frecuencias de resonancia de estas estructuras son más bajas conforme el factor de escala se aumenta, siendo el rango frecuencial en el que están las frecuencias de resonancia desde los 13 GHz hasta los 15.5 GHz.

Con la ayuda del script programado en Matlab, se han obtenido las restas de todas las curvas de fase para las diferentes escalas, buscando la pareja de estructuras que muestren un ancho de banda de funcionamiento lo más amplio posible. Se ha comprobado que existe más de una pareja de celdas con diferente factor de escala las cuales, al restar sus respectivas curvas de fase, se obtiene un desfase entre ambas en torno a  $180^\circ$ . Sin embargo, se va a escoger el par de celdas las cuales han dado un mejor resultado, es decir, que el rango frecuencial en el que el desfase entre ambas este en torno a  $180^\circ$  curvas sea mayor.

Se pudo comprobar que en los casos para los que el factor de escala era 0.45 y 0.6 existía interferencia destructiva en un rango relativamente amplio. En la figura 4.3. a) se puede ver las curvas de fase correspondientes a la estructura esvástica con un factor de escala de 0.45 (roja) y 0.6 (azul) y en la figura 4.3. b) la curva obtenida al restar ambas curvas. Cabe destacar que la interferencia destructiva aparece cuando el desfase que hay entre las curvas de dos AMC es  $180^\circ$ , pero se toma como referencia el rango frecuencial en el que ese desfase esté entre  $180^\circ \pm 20^\circ$  (zona sombreada figura 4.3. b)).

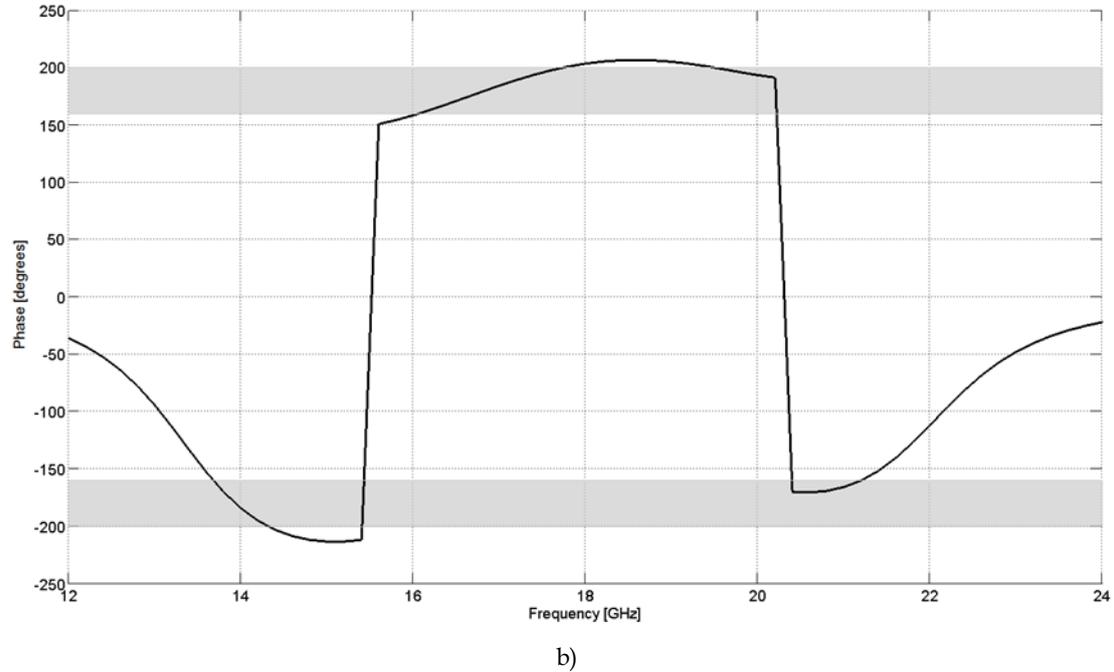
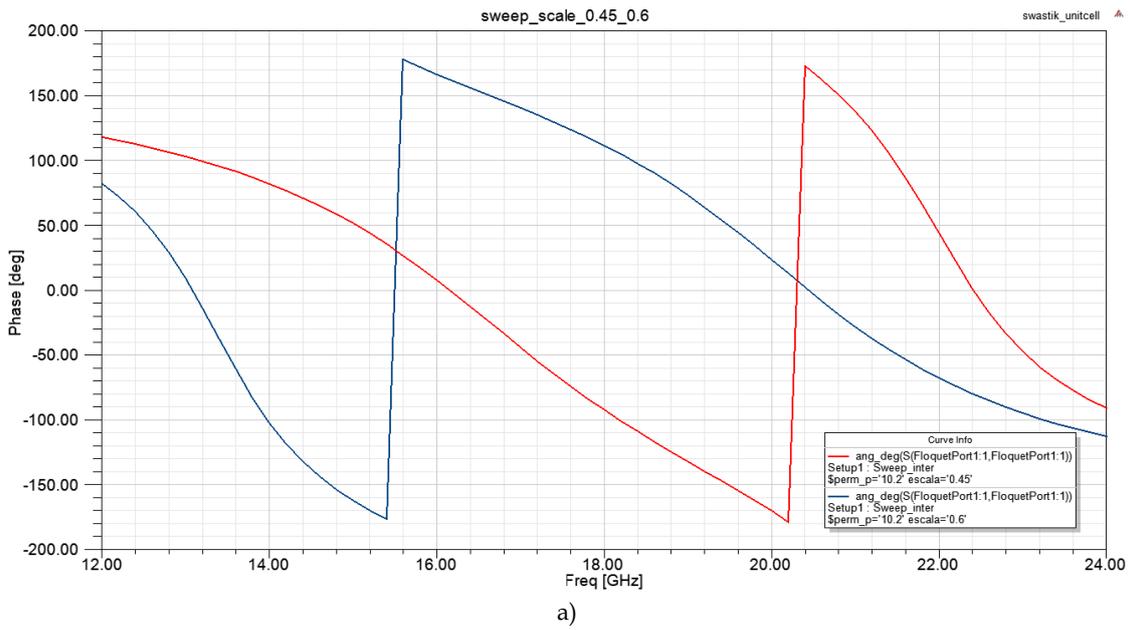


Figura 4.3. a) Curvas de la estructura esvástica con un factor de escala aplicado de 0.45 (roja) y 0.6 (azul) y b) diferencia de ambas curvas.

Se tiene, por tanto, que el rango de frecuencias en las que existe interferencia destructiva, entre las estructuras con el factor de escala 0.45 y 0.6, es desde los 14 GHz hasta los 21 GHz para un valor de permitividad del sustrato de 10.2. Se puede ver que hay zonas en las que la diferencia de fase de ambas curvas se aleja más de  $20^\circ$  de los  $180^\circ$  que interesa mantener. Es por este motivo que se ha realizado un segundo barrido para ajustar de forma más precisa la escala que hace falta aplicar a la estructura original para que el rango en el que el desfase este en torno a  $180^\circ$  sea mayor.

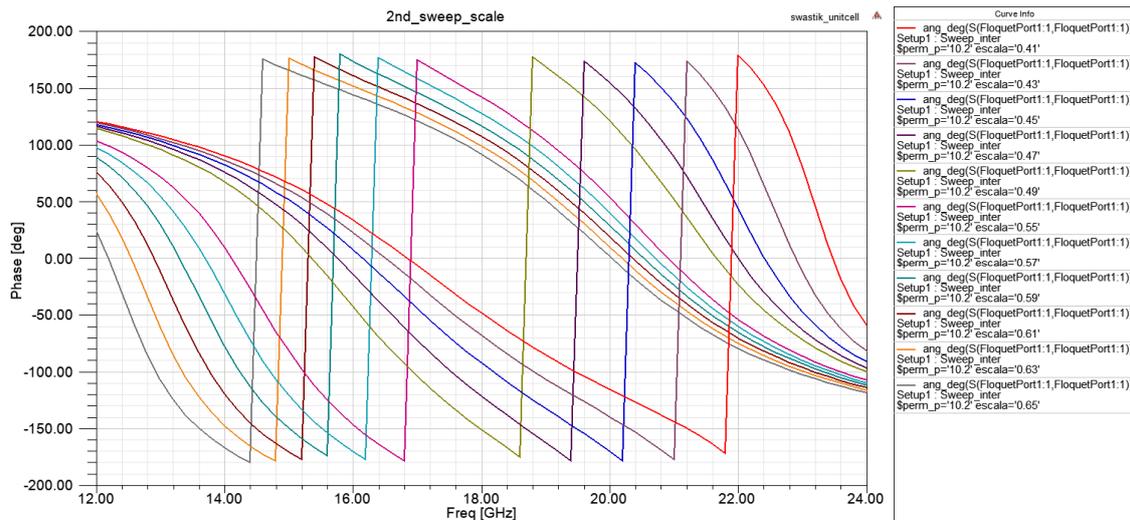
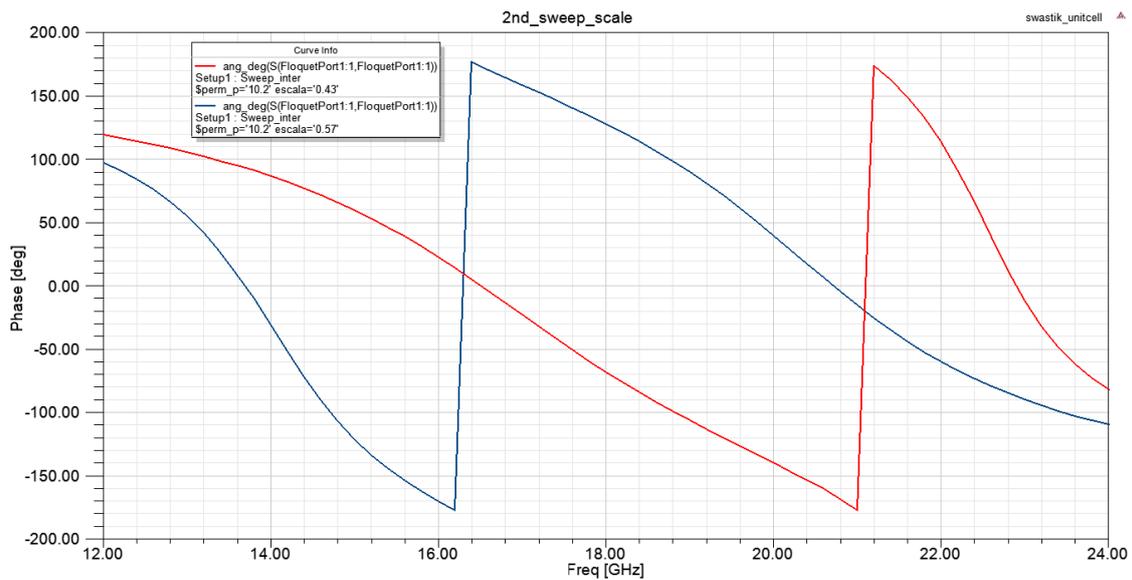


Figura 4.4. Segundo barrido del valor del factor de escala.

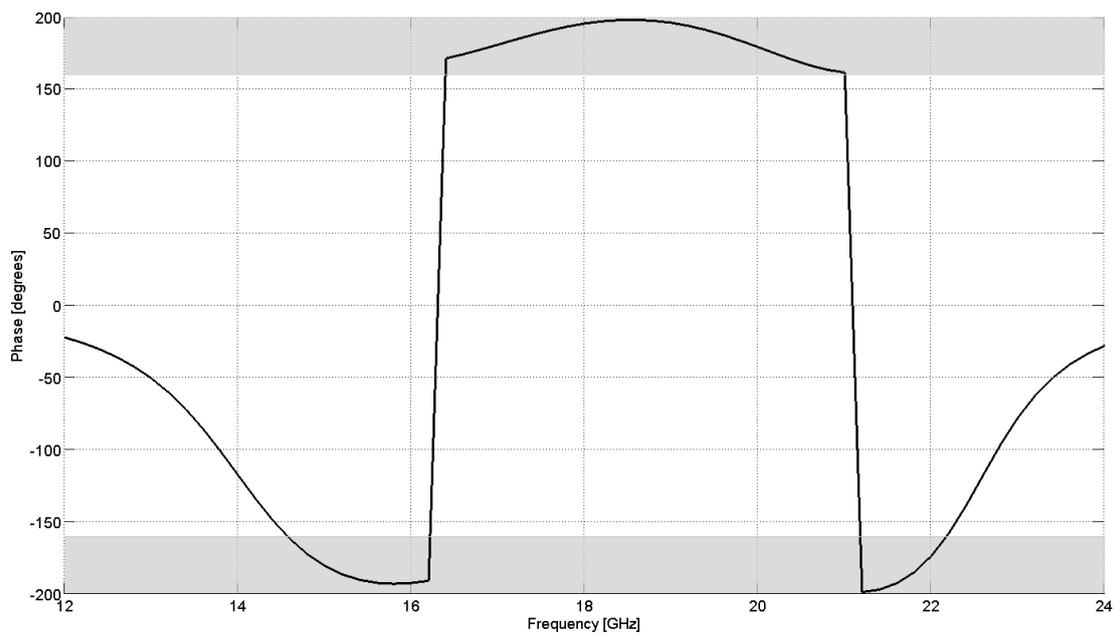
Como se puede ver en la figura 4.4. apenas hay diferencia entre las curvas de fase para los diferentes valores del factor de escala. Esto es debido a que la diferencia del valor de la escala para las diferentes curvas de fase es de tan solo 0.02 entre curvas consecutivas. Con la ayuda del script programado en Matlab anteriormente, se obtiene de una forma rápida la combinación que presenta un mayor rango de funcionamiento. El par de celdas que mayor rango frecuencial presenta con una diferencia de fase en torno a  $180^\circ$  son las celdas cuyo valor del factor de escala es 0.43 y 0.57. En la figura 4.5. a) se muestran ambas curvas de fase para estos valores del valor de escala aplicado a nuestra estructura, y en la figura 4.5. b) la resta de las curvas de fase.

Se puede ver en la figura 4.5. b) que la diferencia de fase en torno a  $180^\circ$  que tienen ambas curvas es relativamente grande. Exactamente, desde los 14.5 GHz hasta los 22 GHz, lo que en ancho de banda porcentual equivale al 41.1%. Por lo tanto, se han obtenido un par de celdas, con los valores 0.43 y 0.57 del factor de escala, para los que se tiene una diferencia de fase entre ambas curvas en torno a  $180^\circ$  en el rango de frecuencia desde los 14.5 GHz hasta los 22 GHz. Todas las simulaciones y los resultados que se han obtenido han sido para el valor de la permitividad del sustrato de 10.2.

Una vez comprobado que la estructura presenta un rango de funcionamiento se ha realizado un barrido del valor de la permitividad para comprobar si se desplaza frecuencialmente la zona de reducción de la sección recta radar por el hecho de variar el valor de la permitividad del sustrato o si por el contrario se pierde el desfase entre las celdas.



a)



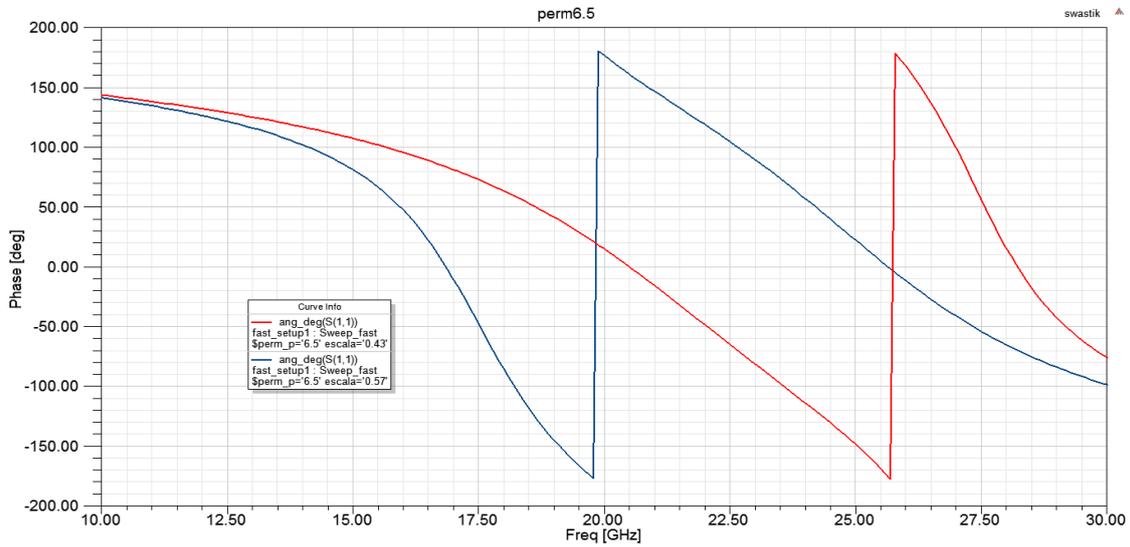
b)

Figura 4.5. a) Curvas de fase para los valores del factor de escala 0.45 y 0.57, y b) la resta de estas curvas.

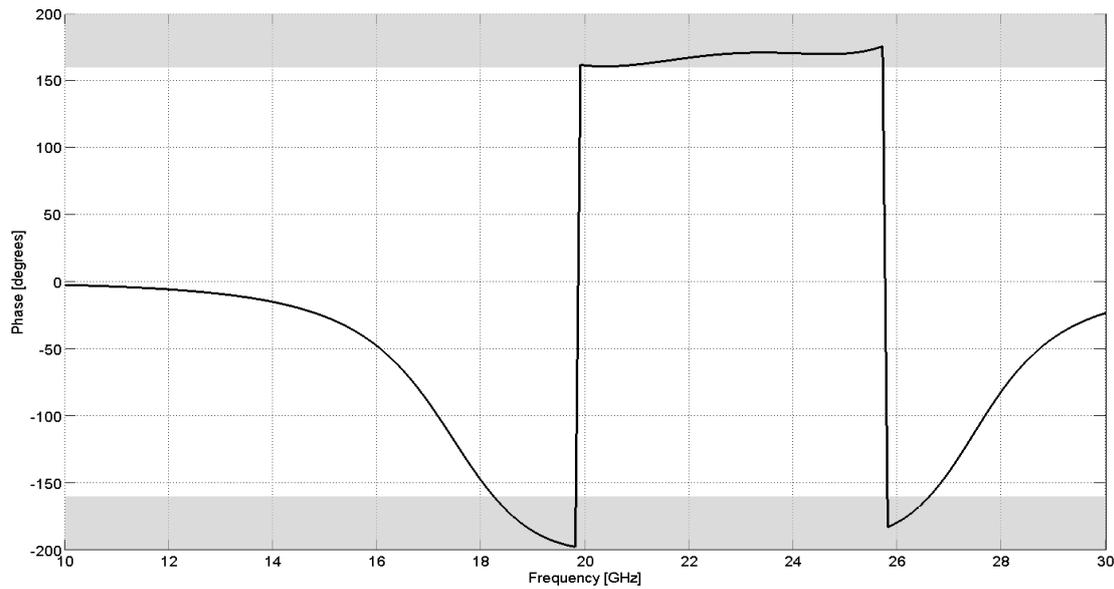
Para realizar este estudio del valor de la permitividad del sustrato, se han simulado ambas celdas con los factores 0.43 y 0.57 para los valores de permitividad desde 1 hasta 15. Se ha podido comprobar que al cambiar el valor de la permitividad de ambas estructuras lo que hace es cambiar la frecuencia de resonancia de las estructuras AMC, como ya se explicó en el capítulo 3. Con la ayuda del script de Matlab que se ha programado, se ha restado las curvas de fase de ambas estructuras para el mismo valor de permitividad del sustrato. Se ha podido comprobar que existe un rango de valores de la permitividad del sustrato en las cuales el desfase que existe entre ambas estructuras está en torno a los  $180^\circ$ , siendo el rango de frecuencias en el

que esto sucede relativamente amplio. Este rango de valores para la permitividad en los que este desfase esta en torno a los  $180^\circ$  es entre 7 y 11. Cuando se varía el valor de la permitividad del sustrato en ese rango, se puede ver cómo el desfase de ambas estructuras va cambiando el rango en el que está en torno a  $180^\circ$ .

Se ha realizado un segundo barrido de los valores de la permitividad del sustrato, pero más preciso, de 6 a 12 en pasos de 0.5 para obtener de forma más exacta cuales son los valores extremos para los que sigue habiendo interferencia destructiva en un rango amplio de frecuencias. Los datos que se han obtenido de este segundo barrido han sido que los valores extremos para los que la diferencia de fase de ambas estructuras está en torno a  $180^\circ$  son 6.5 y 11. Fuera de este rango de valores de la permitividad del sustrato, el rango de frecuencias en las que ambas estructuras presentan interferencia destructiva disminuye considerablemente.



a)



b)

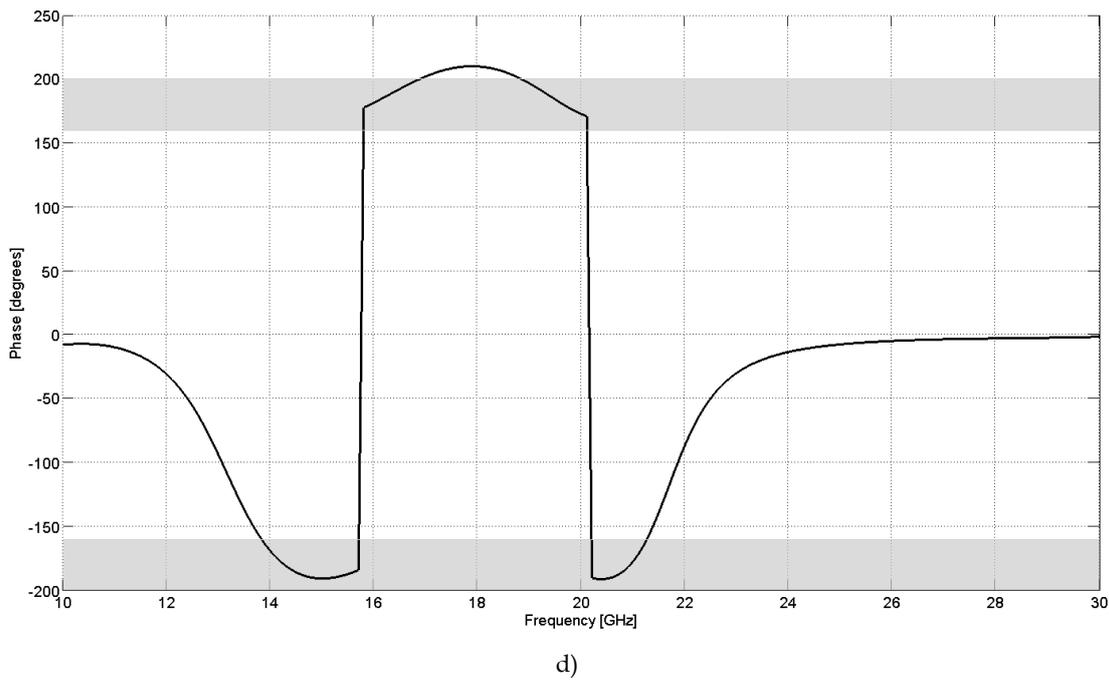
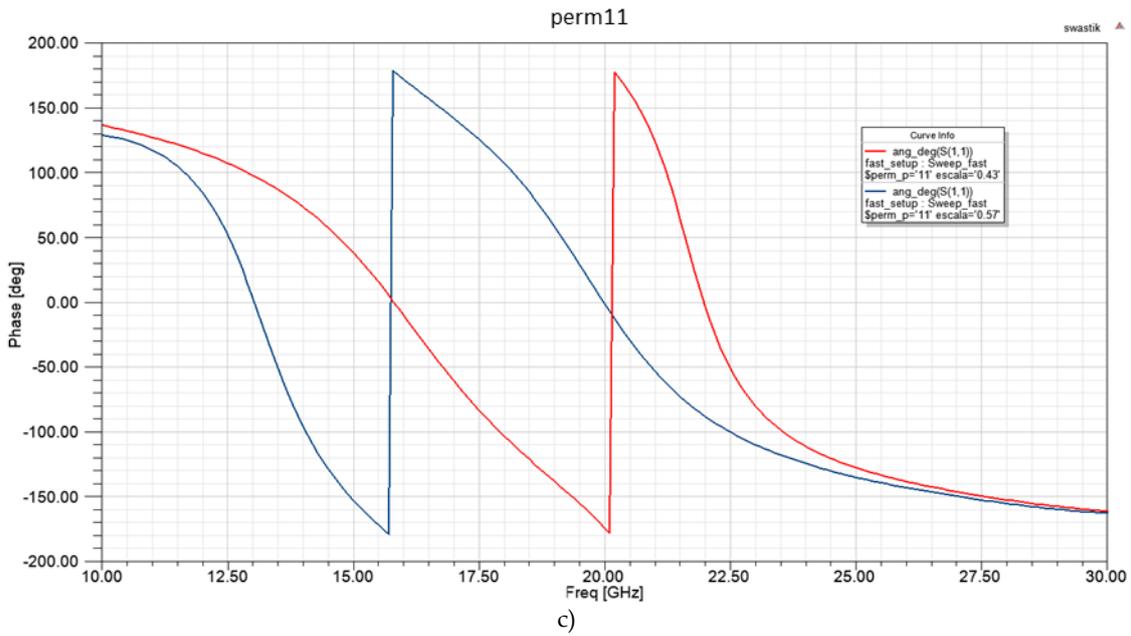


Figura 4.6. Curvas de fase para las estructuras con diferente escalado para el a) valor de permitividad 6.5 y b) la resta de ambas, y para el valor de c) permitividad 11 y la d) diferencia entre estas.

En la figura 4.6. se muestran los resultados para estos dos valores de permitividad extremos para los que existe interferencia destructiva entre las contribuciones de fase para la pareja de estructuras con diferente factor de escalado. Solo se han dibujado las curvas para los valores 6.5 y 11 por simplicidad de la figura. En la figura 4.6. a) se puede ver las curvas de fase para las dos estructuras con diferente escala para el valor de la permitividad del sustrato de 6.5, y en la figura 4.6. b) la diferencia entre estas curvas. Para las figuras 4.6. c) y d) sucede lo mismo, salvo que las curvas corresponden al valor de la permitividad 11.

En la tabla 4.1 se resumen los resultados para los que el ancho de banda en el que ambas estructuras presentan un desfase entre ellas de  $180^\circ$  es relativamente amplio. Se puede ver cómo cambian los anchos de banda conforme vamos aumentando el valor de la permitividad del sustrato. Como ya se mencionó en el capítulo anterior, conforme se aumenta el valor de la permitividad del sustrato la frecuencia de resonancia de los AMC es menor, y por el mismo motivo los anchos de banda en los que existe interferencia destructiva entre las contribuciones de ambas estructuras, cada vez están a menor frecuencia.

$\epsilon$	$f_{\min}$ (GHz)	$f_{\max}$ (GHz)	BW (%)
6.5	18.6	26.6	35.40
7	18	25.7	35.24
7.5	17.44	25	35.63
8	16.92	24.22	35.49
8.5	15.66	23.52	40.12
9	15.5	22.94	38.71
9.5	15	22.5	40.00
10	14.66	21.97	39.91
10.5	14.16	21.66	41.88
11	13.8	21.27	42.60

Tabla 4.1. Resumen de los anchos de banda de la diferencia de fase entre las celdas.

Con los resultados que se han visto, se puede decir que utilizando la estructura de la esvástica para crear una estructura chessboard, usando para ello dos celdas con un factor de escalado de 0.43 y 0.57, se puede llegar a conseguir un ancho de banda de funcionamiento, cambiando el valor de la permitividad del sustrato de 6.5 a 11, desde los 13.8 GHz hasta los 26.6 GHz, lo que en ancho de banda porcentual equivale a un ancho de banda del 63.37%. Para valores de la permitividad fuera del rango de valores que se muestra en la tabla 4.1, el ancho de banda en el que existe interferencia destructiva entre las contribuciones de ambas estructuras se reduce considerablemente.

#### 4.2.2. Simulación estructura chessboard

Una vez que se ha realizado los estudios necesarios para obtener el par de estructuras que son necesarias para que exista un desfase en torno a  $180^\circ$ , y que estas estructuras sigan manteniendo este comportamiento al modificar el valor de la permitividad del sustrato, se simulará la estructura completa para comprobar que esta estructura reduce la sección recta radar en el rango de frecuencias mencionado.

En la figura 4.7. se pueden ver las dos celdas unitarias con las que se va a construir la estructura completa que se va a estudiar con sus respectivas dimensiones, una vez aplicado el factor de escala para cada estructura.

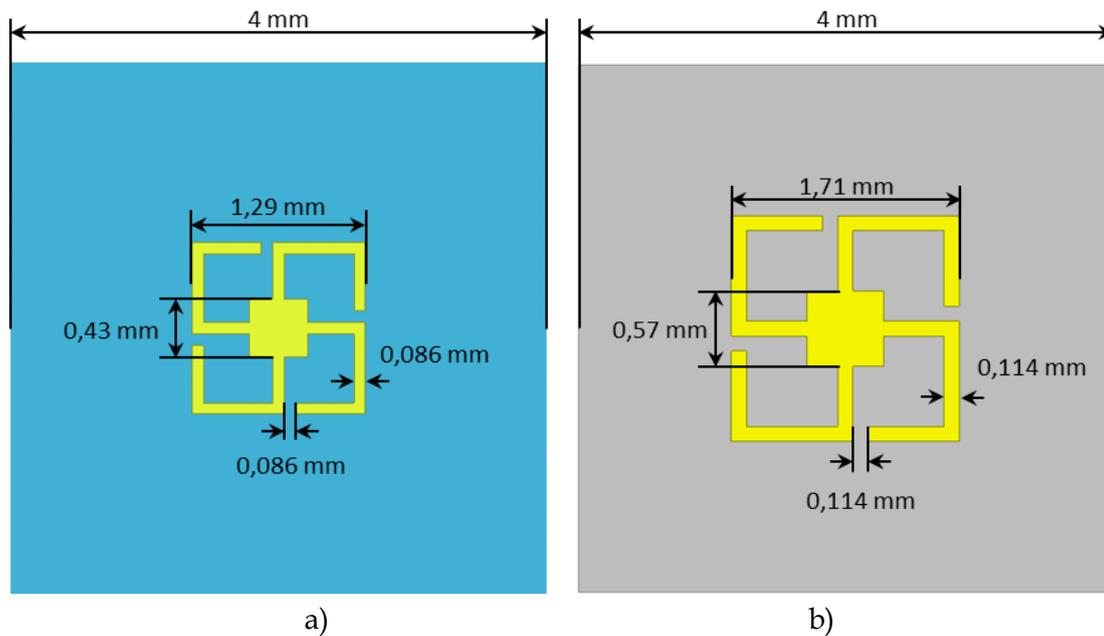


Figura 4.7. Estructuras con sus respectivas dimensiones, con las que se va a construir la estructura completa, a) estructura esvástica con un factor de escala de 0.43 y b) estructura esvástica con un factor de escala de 0.57.

Para conformar la estructura completa primero se ha necesitado cumplir dos condiciones de diseño, una se debe a que la estructura debe de tener grating lobes, como se ha visto en el capítulo 2, y la otra condición es que para que las estructuras AMC se comporten como tales, hacen falta cuatro celdas unitarias, en cada dirección (en el eje x y en el eje y), de cada tipo de AMC para que tengan el comportamiento deseado. Por tanto, el número de celdas unitarias que conformará una celda para la estructura completa será mínimo de 16 celdas unitarias. Se ha comprobado que este número de celdas unitarias también satisface la primera condición para que se produzcan los grating lobes. En la figura 4.8. se puede ver la celda de la estructura completa que se va a simular. Esta celda se ha diseñado de este modo debido a que de esta forma la celda cumple con las simetrías que requiere el software Ansys HFSS para simular una estructura infinita gracias a las condiciones de contorno de la estructura y las simetrías que se le aplican. Gracias a esta característica se ha podido reducir el tamaño de la estructura que se ha simulado, y que el coste computacional sea bastante menor a la hora de obtener los resultados.

Las dimensiones de la celda que se puede ver en la figura 4.8. son de 32x32 mm<sup>2</sup>, con la altura del sustrato de 1.27 mm. Las dimensiones de los AMC que conforman esta estructura son las que se ha visto en la figura 4.7. Una vez que se tiene la celda de la estructura completa, lo primero que se ha simulado ha sido el barrido del valor de la permitividad del sustrato para el rango de valores. Debido a que el coste computacional para esta estructura es mucho mayor en relación con las celdas unitarias que lo conforman, sólo se ha simulado esta estructura con los valores de la permitividad del sustrato de 6.5, 8, 9.5 y 11, para comprobar que el rango en el que

esta estructura reduce la sección recta radar varía, tal y como se ha estimado utilizando las celdas individuales.

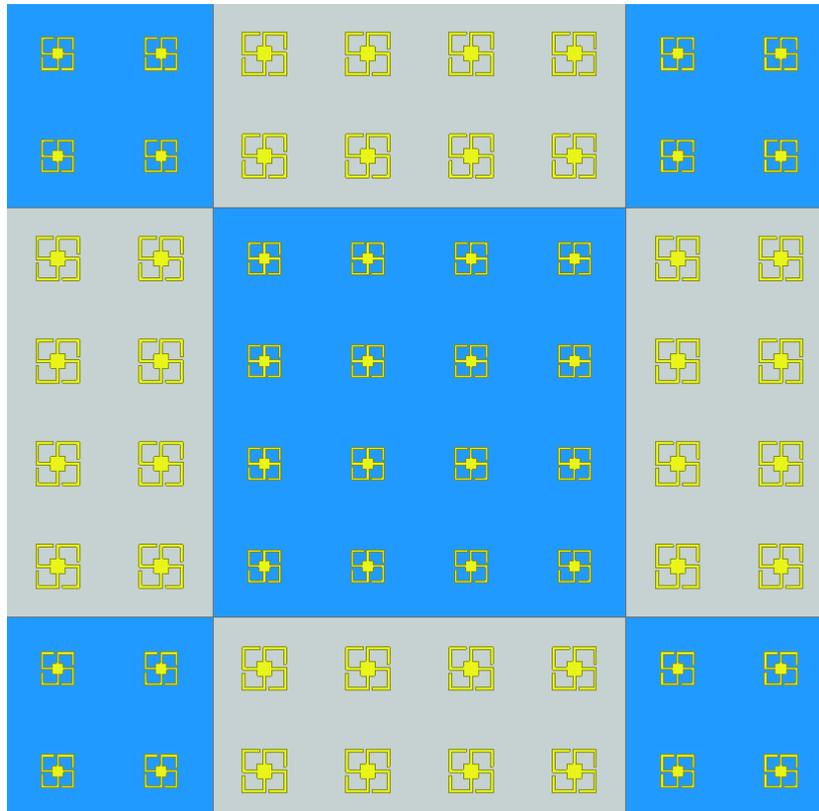


Figura 4.8. Celda de la estructura chessboard completa simulada.

En la figura 4.9. se puede ver el campo reflejado por la estructura en función de la frecuencia para los diferentes valores de la permitividad del sustrato que se han simulado. El campo reflejado por la estructura está normalizado respecto al campo reflejado por una superficie metálica de las mismas dimensiones. Para obtener esta normalización de los campos reflejados se ha simulado una estructura de las mismas dimensiones, pero con una superficie metálica, sin AMC. Se han obtenido las curvas de la directividad que presenta la estructura en relación con la frecuencia, para los cuatro valores de la permitividad del sustrato que se han simulado. Estas curvas no estaban normalizadas, así que se ha simulado la estructura con una superficie metálica, y se ha restado las curvas de la estructura con AMC a la estructura, resultando el campo reflejado normalizado para los valores de la permitividad del sustrato.

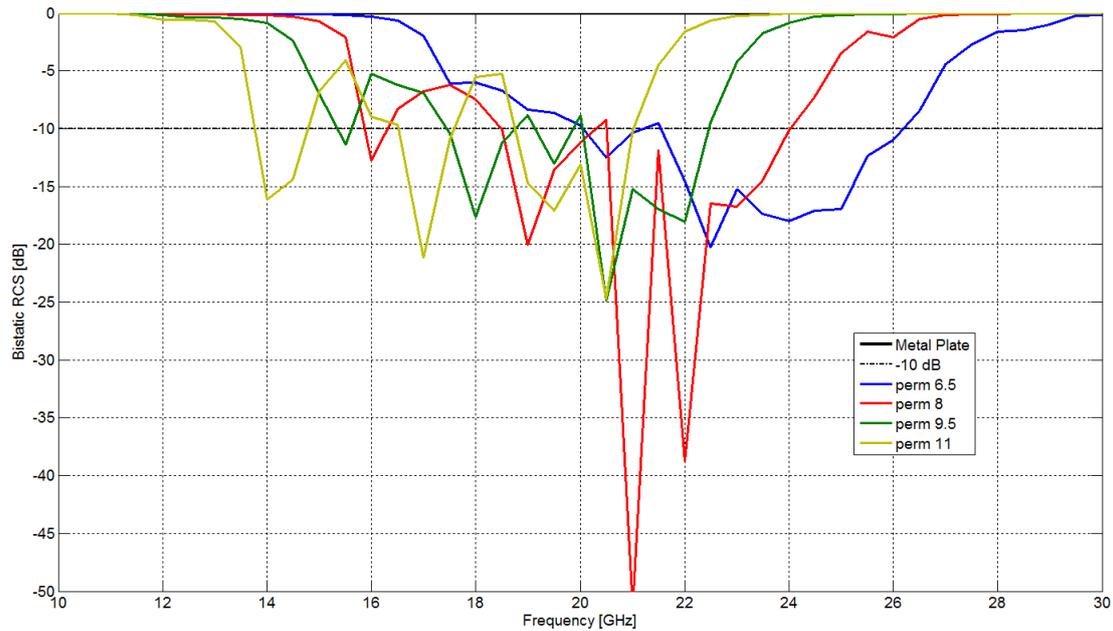


Figura 4.9. Campo reflejado normalizado respecto a un plano metálico por la estructura chessboard para los diferentes valores de permitividad.

Se ha fijado el ancho de banda en el que la estructura reduce la sección recta radar, para el rango de frecuencias para las que el campo reflejado normalizado por esta estructura está por debajo de los -10 dB. Una vez fijada la referencia para saber cuáles son los anchos de banda de funcionamiento de la estructura se puede ver cómo al variar el valor de la permitividad del sustrato, el ancho de banda en el que la estructura reduce la sección recta radar se desplaza. Exactamente, conforme el valor de la permitividad aumenta se observa que el ancho de banda en el que la estructura opera cada vez es menor.

En la tabla 4.2 se recogen los datos que se pueden obtener de la figura 4.9. Se observa que los anchos de banda para la estructura completa son más pequeños que los que se han obtenido mediante la simulación y resta de las fases de curva para las celdas unitarias que conforman la celda de la estructura completa. Esto es debido a que al simular por separado las estructuras AMC el software Ansys HFSS los considera como una superficie infinita, cosa que no sucede al simular la celda de la estructura completa debido a que éstas están conformadas por un array 4x4. Esta diferencia hace que se produzcan diferencias en las curvas de fase entre las celdas unitarias y la celda de la estructura completa, dando lugar a la diferencia entre los anchos de banda de las celdas unitarias y el *chessboard* final.

$\epsilon$	$f_{\min}$ (GHz)	$f_{\max}$ (GHz)	BW <sub>-10dB</sub> (%)
6.5	20	26.2	26.84
8	18.5	24	25.88
9.5	17.4	22.5	25.21
11	18.7	21	11.58

Tabla 4.2. Anchos de banda en los que la estructura reduce la RCS para los diferentes valores de permitividad.

Cabe destacar que para el valor 11 de la permitividad del sustrato la RCS presenta dos picos por encima del valor de -10 dB que teníamos de referencia para determinar el ancho de banda. Esto es debido a que, como se ha mencionado anteriormente, a partir de este valor de la permitividad del sustrato el comportamiento de la estructura chessboard reduciendo la RCS empieza a deteriorarse para ciertas frecuencias del ancho de banda.

Una vez que se ha comprobado que esta estructura tiene las propiedades de reducción de la RCS y que al variar el valor de la permitividad del sustrato el ancho de banda, en la figura 4.10. se muestra el campo reflejado por la estructura en tres dimensiones a la frecuencia central del ancho de banda en el que la estructura reduce la RCS para los cuatro valores de la permitividad del sustrato simulados. Se demuestra con estas figuras que la potencia de la onda incidente se refleja en los planos  $\phi=45^\circ$ , consiguiendo una reducción de la RCS como se esperaba. Las direcciones a las que se redirige el campo se puede explicar utilizando la teoría de grating lobes, la cual se ha explicado en el capítulo 2.

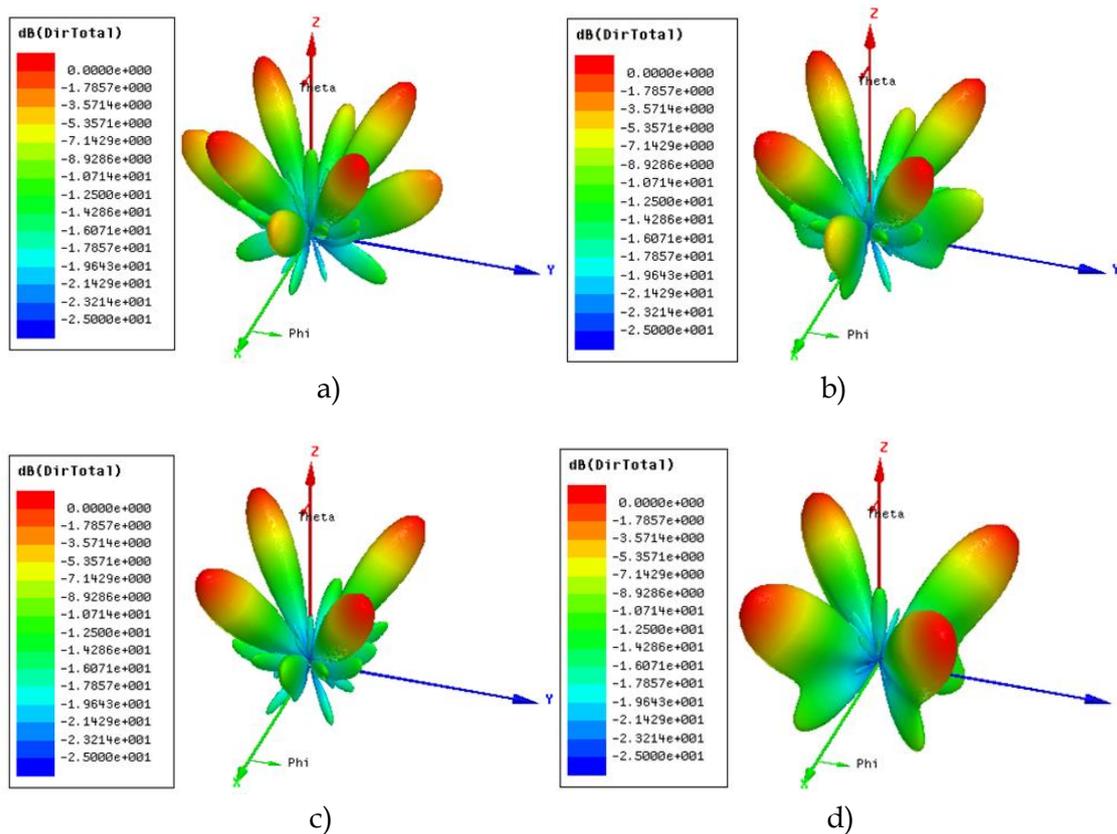


Figura 4.10. Campo reflejado normalizado de la estructura chessboard a la frecuencia central para los valores de permitividad del sustrato a)  $\text{perm}=6.5$ ,  $f=22.5$  GHz, b)  $\text{perm}=8$ ,  $f=21$  GHz, c)  $\text{perm}=9.5$ ,  $f=20.5$  GHz, d)  $\text{perm}=11$ ,  $f=17$  GHz

Por lo tanto, se ha visto que cambiando el valor de la permitividad del sustrato el rango en el que la estructura reduce la RCS va variando. Se puede conseguir que el rango de funcionamiento de esta estructura sea desde los 18.7 GHz hasta los 26.2 GHz

variando el valor de la permitividad de 6.5 a 11, lo que supone un ancho de banda porcentual del 33.4%. Estos valores de los anchos de banda de funcionamiento de la estructura se han obtenido para una incidencia normal a la superficie del chessboard del campo incidente.

El problema de esta estructura es que para poder tener un ancho de banda muy grande gracias a la sintonización, se necesita un cambio del valor de la permitividad del sustrato muy grande, de 6.5 a 11. Esto actualmente no se puede conseguir ya que no existe ningún tipo de tecnología de sintonización el cual nos de tanta variación del valor de la permitividad. Otro inconveniente de esta estructura es que alguno de los tamaños que son necesarios para el diseño de la estructura están por debajo de 0.2 mm, tamaño mínimo que se necesitaba respetar para poder fabricar la estructura. Por estos motivos se va a intentar buscar otro par de celdas unitarias con las que poder obtener una reducción de la RCS.

## CAPITULO 5. SIMULACIÓN, FABRICACIÓN Y MEDIDA DE UNA ESTRUCTURA CHESSBOARD Y SU ADAPTACIÓN PARA EL USO DE CRISTALES LÍQUIDOS

---

### 5.1. Introducción

---

En el capítulo anterior se ha obtenido una estructura para la cual, con diferentes tipos de escalados de las celdas unidad y con diferentes valores de permitividad se podía reducir la sección recta radar y hacer que el rango de funcionamiento variase al cambiar el valor de la permitividad del sustrato. En concreto, se han visto la esvástica con la que se obtenía un ancho de banda desde los 18.7 GHz hasta los 26.2 GHz con un cambio del valor de la permitividad del sustrato de 6.5 a 11, lo que supone un ancho de banda porcentual del 33.4%.

Sin embargo, esta estructura no se pudo fabricar debido a que las celdas unitarias que la componían tenían dimensiones muy pequeñas, menores de 0.2 mm, y esto suponía un problema. Es por ello que se ha diseñado una estructura que aunque no presente una reducción de la sección recta radar en un rango de frecuencias muy grande, que se pueda fabricar y medir. Se quiere fabricar una misma estructura para dos tipos de sustratos con valores de permitividad diferentes para comprobar si en medida se obtiene lo mismo que en las simulaciones. Este es un paso intermedio antes de la implementación de la tecnología de cristales líquidos.

Para realizar esta estructura se ha escogido la estructura tipo parche metálico que se vio en el capítulo 3, debido a su sencillez a la hora de diseñar la estructura, y que al no tener huecos en el AMC se puede llegar a fabricar la estructura, que es el objetivo principal de este capítulo. Para ello se va a tener en cuenta el tipo de materiales con los que se podrá fabricar, no teniendo libertad a la hora de elegir el valor de la permitividad del sustrato a la hora de hacer las simulaciones.

### 5.2. Estructura AMC con parches

---

Una vez escogido el tipo de estructura AMC con la que se va a intentar conformar una estructura que se pueda fabricar, se necesitará un par de celdas para poder tener entre ellas interferencia destructiva y así poder conseguir la reducción de la sección recta radar. Cabe destacar, como se ha mencionado anteriormente, que como el objetivo que se tiene es el poder fabricar una estructura completa existe una limitación a la hora de simular las estructuras para los valores de la permitividad del sustrato. Los materiales de los que dispone el Grupo de Antenas de la Universidad Pública de Navarra con los que se podía llegar a fabricar esta estructura son el Rogers RO3010, Rogers RO5880, y el FR4, cuyos valores de permitividad son 10.2, 2.2 y 4

respectivamente. Hasta ahora se habían simulado todas las celdas con la altura del sustrato igual. Los materiales que se han mencionado, aparte de tener diferentes valores de permitividad, también cuentan con diferentes alturas. Esto es algo que se debe de tener en cuenta posteriormente, a la hora de realizar las simulaciones.

---

### 5.2.1. Estudio estructura AMC

---

Lo primero que se va a realizar, como en el resto de las diferentes estructuras estudiadas anteriormente, va a ser un barrido para el tamaño del lado del parche. El parche tiene forma de cuadrado, por lo que el número de variables que necesitan ser ajustadas solo es una, el lado de este. Sin embargo, también se puede variar el tamaño del lado del sustrato, cosa que anteriormente no se ha hecho. Por lo tanto se tiene dos variables para realizar el diseño.

Para realizar esta búsqueda de un par de celdas, entre las que exista interferencia destructiva, lo que se ha hecho es simular varios valores del tamaño del lado de parche para diferentes valores del lado del sustrato. Además, se ha ido simulando estas variaciones tanto del lado del parche como el lado del sustrato para dos estructuras con diferente tipo de sustrato. Al empezar se probó para los materiales Rogers RO3010, el cual tiene un valor de permitividad de 10.2 y una altura de 1.27 mm o de 0.635 mm, y para el Rogers RO5880, el cual tiene un valor de permitividad de 2.2 y una altura de 0.767 mm o 0.508 mm.

Se han realizado numerosas simulaciones para los parámetros del tamaño tanto del lado del parche como del lado del sustrato, para ambos materiales con diferente altura de sustrato, y no se ha encontrado ninguna combinación de celdas con las que exista interferencia destructiva en un rango de frecuencias amplio. En ocasiones un par de celdas tenía un ancho de banda muy bueno con un material, pero al simular esa misma celda pero con el otro material se estropeaba, y no había un desfase en torno a 180° como sucedía con el otro material. Esto puede ser debido a que el cambio del valor de la permitividad del sustrato entre ambos materiales es muy alto ya que se pasa de tener un valor de la permitividad de 2.2 a un valor de 10.2.

Por ejemplo, las estructuras que se han visto anteriormente no tenían tanto variación en el valor de la permitividad, en el caso de la esvástica los valores extremos en los que la estructura completa funcionaba era de 6.5 a 11, un cambio del valor de la permitividad bastante menor comparado con el que existe entre los materiales Rogers RO3010 y RO5880.

Por este motivo, se dedujo que era imposible encontrar un par de celdas con este tipo de AMC con el que conseguir que una estructura reduzca la sección recta radar para los valores de la permitividad del sustrato 2.2 y 10.2. Se pensó entonces en buscar una combinación que funcione para el RO5880 y el FR4, cuyo valor de la

permitividad del sustrato difiere menos. El valor de la permitividad de este material es de 4.4, con unas alturas disponibles de 0.4 mm y 0.8 mm.

Se han escogido los materiales FR4 y Rogers RO5880 para buscar un par de celdas entre las que exista una diferencia de fase en torno a  $180^\circ$  ya que los valores de permitividad de estos dos materiales están muy próximos, y a priori será más fácil encontrar una combinación de celdas que cumplan con esta condición. Además las alturas de ambos materiales son muy parecidas, 0.8 mm y 0.767 mm, por lo que no debería de cambiar en exceso el comportamiento de las celdas por esta diferencia de altura entre los sustratos.

Para obtener la pareja de estructuras que se necesita para conseguir la interferencia destructiva, se ha partido de los datos que ya se disponían del anterior estudio entre los materiales Rogers RO3010 y RO5880, simular las estructuras con el material FR4 que funcionaban con el material RO5880.

Tomando de referencia los datos que se tenían del anterior estudio, se probaron las celdas que con el material Rogers RO5880 habían dado buenos resultados con el material FR4 como sustrato para ver que combinación de celdas es la que para ambos materiales presenta una interferencia destructiva entre ellas.

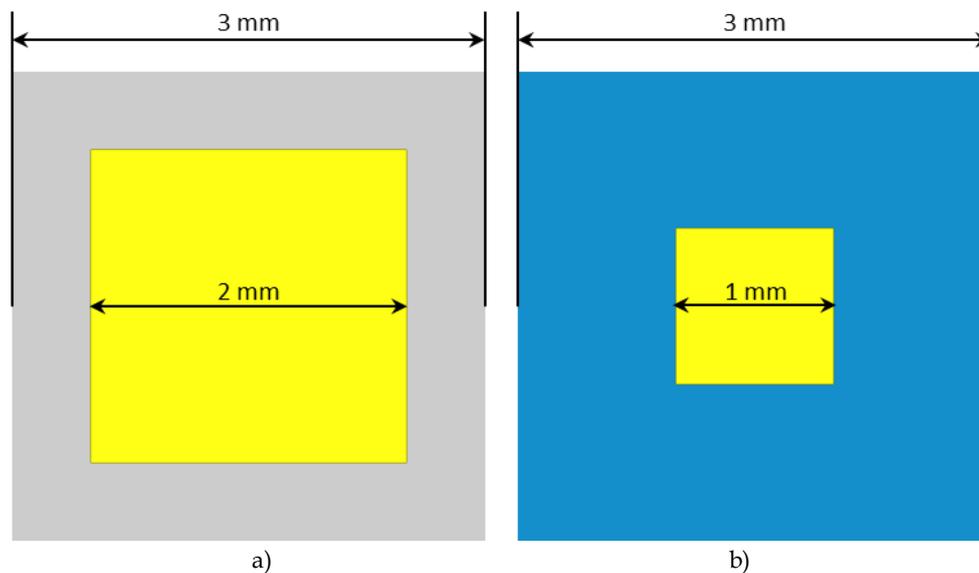
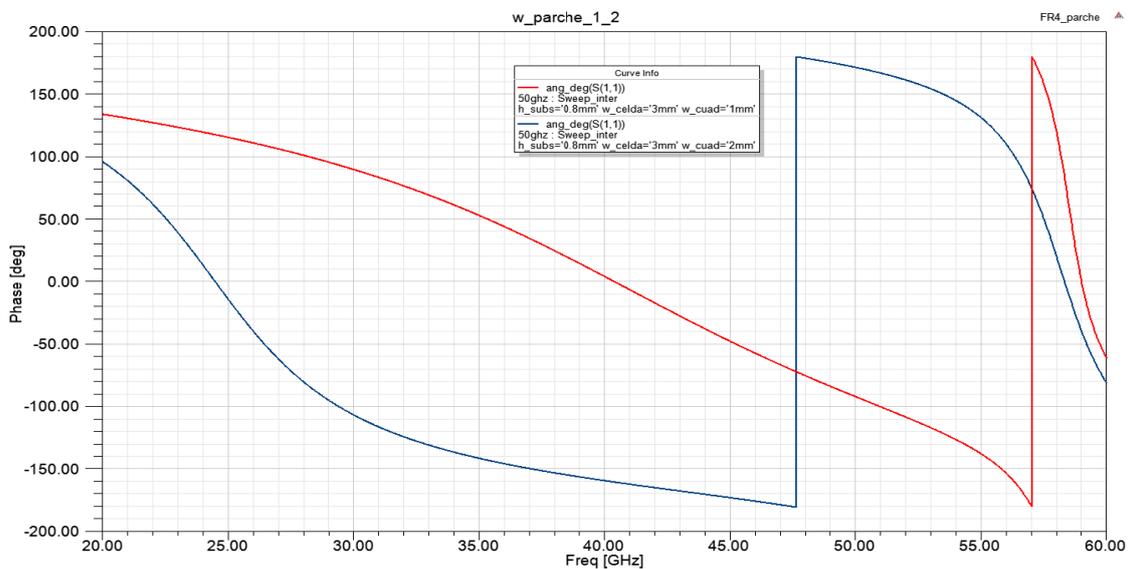


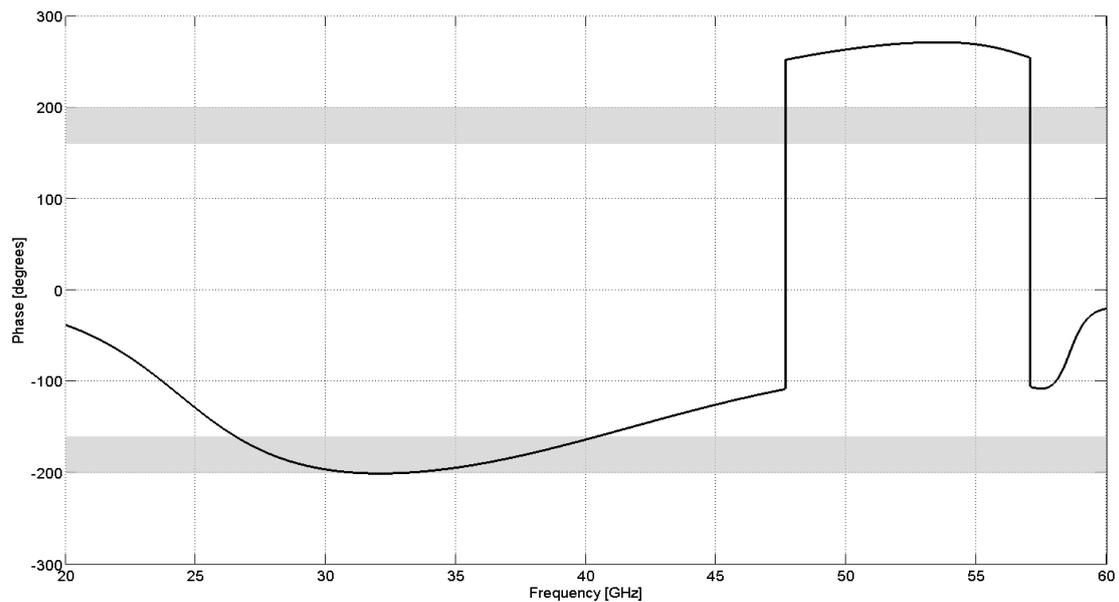
Figura 5.1. Estructuras AMC tipo parche y sus dimensiones

Después de varias comprobaciones, se pudo ver que para el valor del lado del sustrato 3 mm, y para los valores del lado del parche 1 mm y 2 mm (ver figura 5.1.), tanto para el material FR4 como para el Rogers RO5880, hay un rango de frecuencias en el que la diferencia de fase entre ambas estructuras está en torno a  $180^\circ$ . En la figura 5.2. se pueden ver las curvas de fase de ambas estructuras para los dos tipos de materiales para los que se ha simulado.

En la figura 5.2. a) se puede ver las curvas de fase para las estructuras de la figura 5.1. con material FR4. La diferencia entre estas curvas de fase se encuentra en la figura 5.2. b). Se puede comprobar que el rango de frecuencias en el que existe un desfase en torno a  $180^\circ$  entre las celdas unitarias comprende desde los 27 GHz hasta los 40 GHz, lo que corresponde a un ancho de banda porcentual del 38.8%. En la figuras 5.2. c) y d) se tienen los mismos datos pero para el sustrato con el material Rogers RO5880. Se puede ver que el ancho de banda de funcionamiento para este valor de permitividad va desde los 37 GHz hasta los 55 GHz, lo que supone un ancho de banda porcentual del 39.1%. Por lo tanto, se puede obtener un ancho de banda en el que esta estructura reduce la sección radar desde los 27 GHz hasta los 55 GHz (68.3%) variando el valor de la permitividad del sustrato de 2.2 a 4.4.



a)



b)

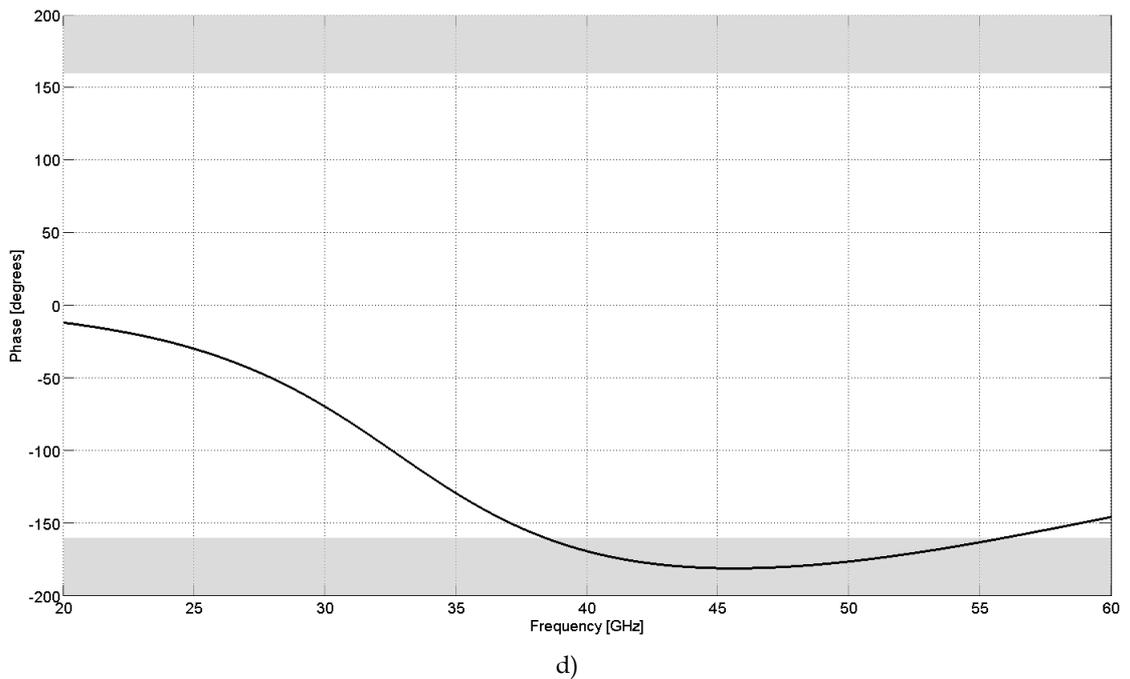
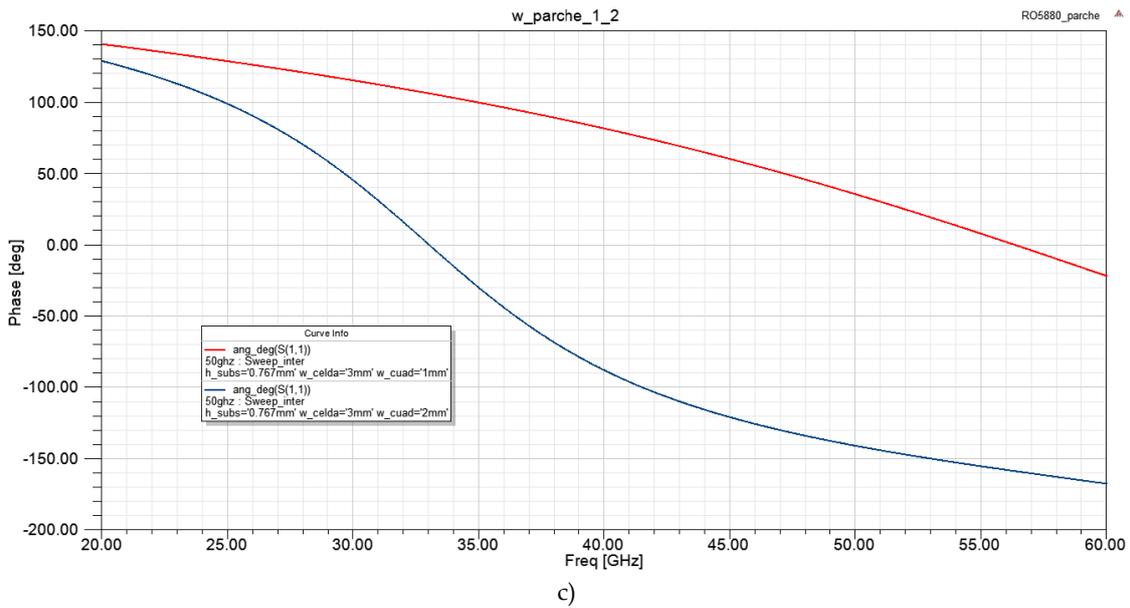


Figura 5.2. Curvas de fase para las celdas unidad de la figura para los substratos a) FR4 y b) la diferencia de fase, y c) 5880 y d) la diferencia de fase.

### 5.2.2. Simulación estructura chessboard

Una vez que se han obtenido este par de celdas unitarias y se ha demostrado que para los materiales Rogers RO5880 y FR4 la combinación de estas celdas hace que exista una interferencia destructiva en un rango de frecuencias amplio, se ha estudiado cuál es el comportamiento de una estructura completa conformada por estas celdas unitarias.

Para conformar esta estructura se deben cumplir las condiciones de longitud de la celda y el número de elementos AMC que la componen, como se explicó en el capítulo 4, para que los AMC se comporten correctamente. Por ello como mínimo se necesita un array de 4x4 de un tipo de AMC para conformar cada tipo de celda. Además, con este número de celdas unitarias que conforman cada celda de la estructura también se cumple la condición para que existan los grating lobes, y que la estructura funcione correctamente.

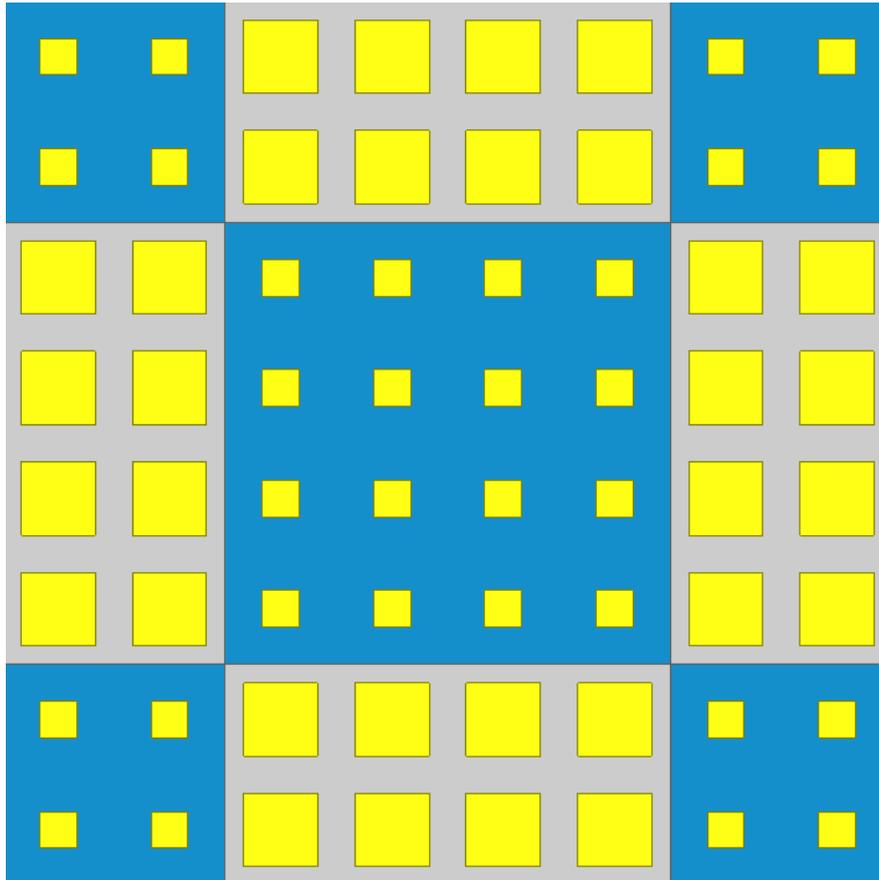


Figura 5.3. Celda de la estructura completa simulada conformada por los AMC de la figura 5.1.

Las dimensiones para esta estructura son 24x24 mm<sup>2</sup>. Se ha simulado esta misma estructura para los dos tipos de material que se han estudiado en el anterior apartado, el Rogers RO5880 y el FR4. Las alturas con las que se ha simulado estas estructuras ha sido 0.767 mm para el RO5880 y de 0.8 mm para el material FR4. Al igual que se hizo a la hora de simular la celda de la estructura esvástica completa, se ha simulado primero la estructura conformada por los dos tipos de AMC y después de ha simulado la estructura con la superficie metálica, con las mismas dimensiones, para obtener el comportamiento de este plano metálico y así poder normalizar los campos reflejados por la estructura con respecto al plano de masa.

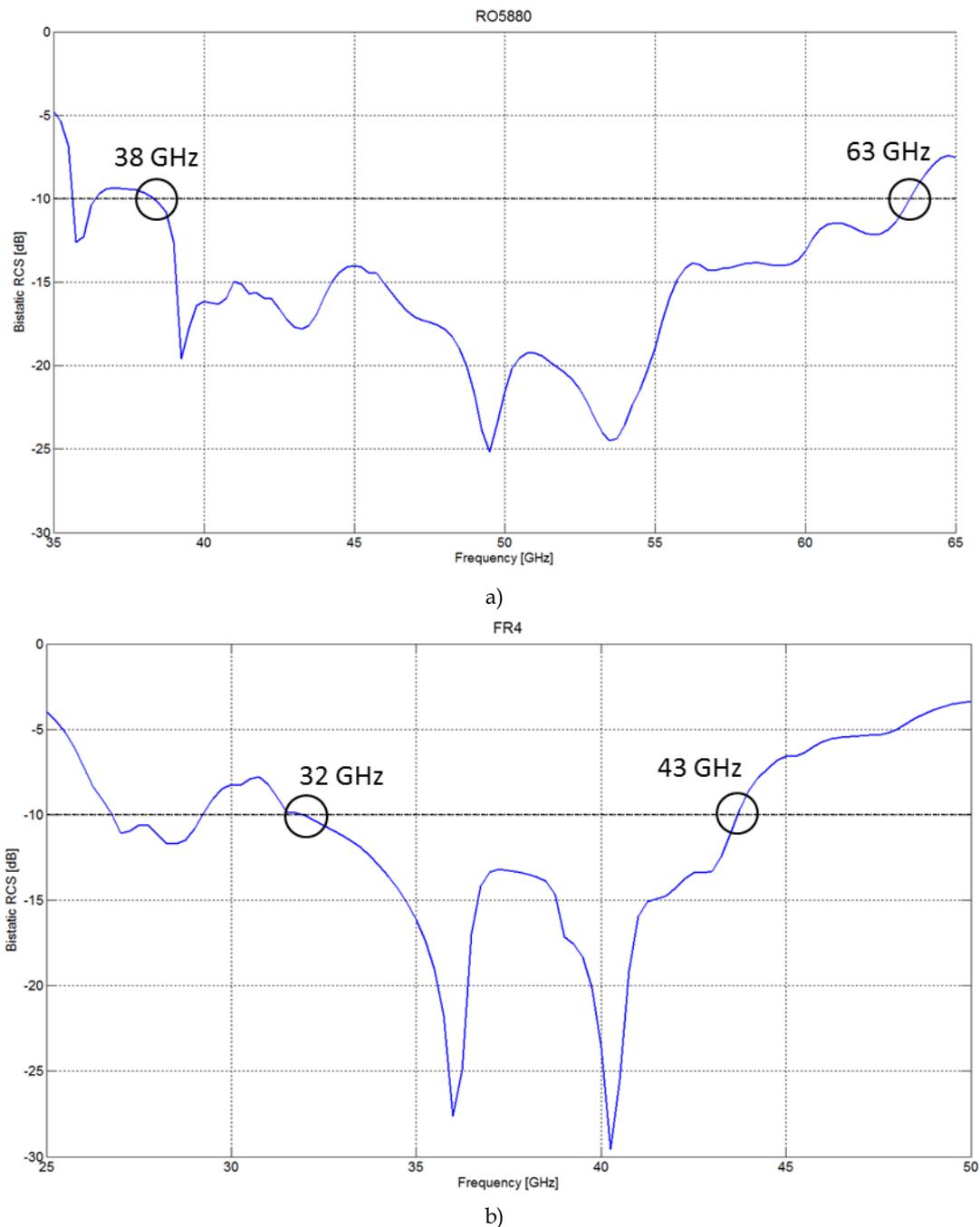


Figura 5.4. Campo reflejado normalizado por la estructura de la figura 5.3 para los materiales a) RO5880 y b) FR4.

En la figura 5.4. se muestran los resultados de las simulaciones que se han realizado para ambos materiales. Por un lado se ha simulado la estructura con el material RO5880 (ver figura 5.4. a)) y con el material FR4 (ver figura 5.4. b)). Al igual que se hizo para la estructura completa de la esvástica, se ha tomado como referencia el rango de frecuencias para los que el campo reflejado normalizado este por debajo de los -10 dB para obtener el ancho de banda en el que la estructura reduce la sección radar.

Se puede ver como el rango de frecuencias en el que la estructura con el material Rogers RO5880 reduce la sección recta radar comprende desde los 38 GHz hasta los 63 GHz, lo que corresponde a un ancho de banda porcentual del 49.5%. En el caso de la estructura con el material FR4, el ancho de banda de funcionamiento comprende desde los 32 GHz hasta los 43 GHz, lo que supone un ancho de banda porcentual del 29.3%.

Estos resultados son bastante parecidos a los resultados que se obtuvieron para el par de celdas unidad y su diferencia de fase. Cabe destacar que en el caso de la estructura con el material FR4 el rango de funcionamiento entre las simulaciones de las celdas unitarias y la estructura completa es bastante similar, aunque se puede ver que el rango de frecuencias en el que la estructura funciona es a mayores frecuencias en el caso de la estructura completa. En el caso del material RO5880, se puede ver cómo el ancho de banda de funcionamiento ha aumentado hasta los 63 GHz, cuando para la diferencia de fase entre las celdas unitarias a partir de 55 GHz no había interferencia destructiva. En la tabla 5.1 quedan los datos de los anchos de banda de funcionamiento para los diferentes materiales y tanto para la estructura completa como para el par de celdas unitarias. Se puede ver que para la estructura con el material RO5880 el ancho de banda ha aumentado con respecto a los datos obtenidos para el par de celdas, y sin embargo para la estructura con el material FR4 el ancho de banda ha empeorado.

Material	Simulación	$f_{\min}$ (GHz)	$f_{\max}$ (GHz)	BW (%)
<b>RO5880</b> ( $\epsilon=2.2$ )	Diferencia fase AMC	37	55	39.1
	Estructura completa	38	63	49.5
<b>FR4</b> ( $\epsilon=4.4$ )	Diferencia fase AMC	27	40	38.8
	Estructura completa	32	43	29.3

Tabla 5.1. Resumen de los rangos de funcionamiento para las estructura completas y la diferencia de las celdas unitarias para los dos tipos de material simulados.

Sin embargo, estos resultados se han obtenido para diferentes alturas del sustrato, debido a que los materiales no tienen la misma altura. Es por este motivo por el cual se ha simulado de nuevo la celda de la estructura completa con los dos posibles alturas de material. En la figura 5.5. se puede comprobar que al ser una diferencia tan pequeña de la altura del sustrato (0.8 mm y 0.767 mm) de los materiales, las curvas del campo reflejado por la estructura apenas cambian. Se puede apreciar que al cambiar esta altura del sustrato, existe un pequeño desplazamiento frecuencial del rango de funcionamiento de la estructura en el que reduce la sección recta radar. Esto es debido a que tanto el valor de la capacidad como el de la inductancia están relacionados con el valor de la distancia entre metales, por lo que al variar la altura del sustrato se varía el valor de la capacidad y de la inductancia- Debido a esto la

frecuencia de resonancia de las estructura AMC cambia, como se ha mencionado anteriormente.

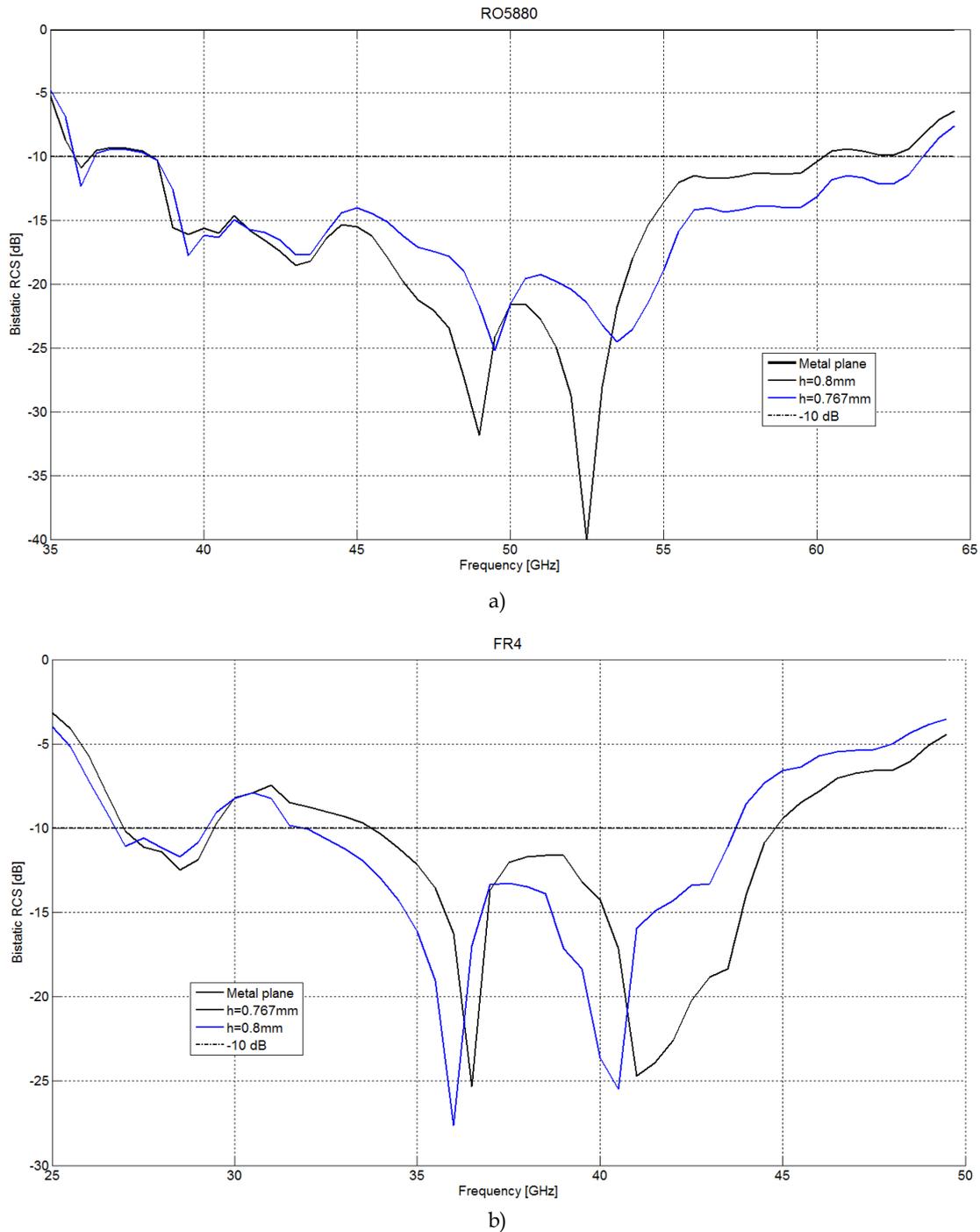


Figura 5.5. Campos reflejados por la estructura y el plano de masa para los materiales a) RO5880 y b) FR4, para los dos valores de la altura del sustrato.

Una vez que se ha comprobado que la diferencia de alturas para los materiales no afecta excesivamente el comportamiento de la estructura, se ha visto si realmente estas estructuras para los dos materiales reducen la sección recta radar. Para ello, en la

figura 5.6. se muestra el campo reflejado por la estructura en las tres dimensiones a la frecuencia central del ancho de banda en el que la estructura reduce la RCS para los dos tipos de material que se ha simulado. De esta forma se puede comprobar que realmente estas estructuras reducen la sección recta radar y que se ven los grating lobes, cosa que si se puede ver.

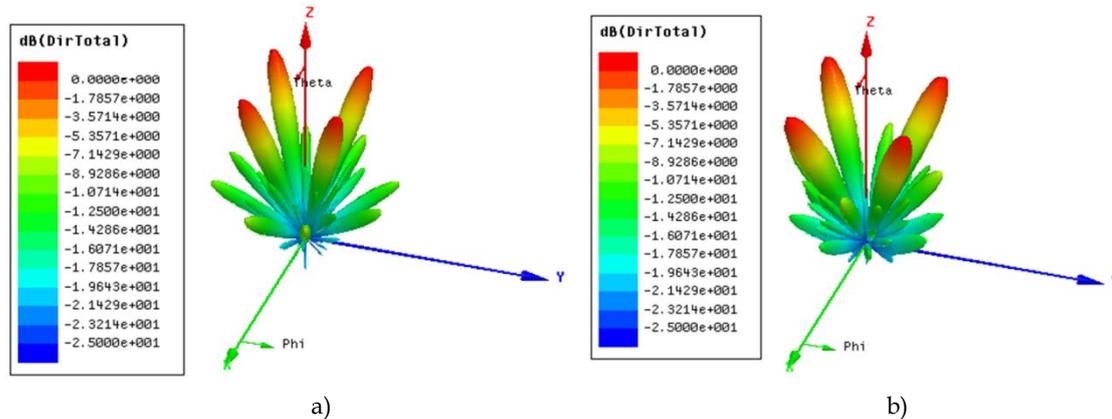


Figura 5.6. Campo reflejado normalizado para a) RO5880  $f=50$  GHz y b) FR4  $f=40$  GHz.

Por lo tanto, se ha obtenido una estructura para la que, al variar el valor de la permitividad de 2.2 a 4.4, mantiene las propiedades de reducción de la sesión recta radar en el rango de frecuencias desde 32 GHz hasta 63 GHz, con lo que se tiene un ancho de banda de funcionamiento porcentual del 65,3%. El siguiente paso ha sido el fabricar dicha estructura y poder contrastar los resultados simulados con los obtenidos en la medición de la estructura.

### 5.2.3. Fabricación de la estructura chessboard

Una vez que se ha diseñado la estructura final, la cual cumple con las dimensiones mínimas para poder fabricar, y que se ha demostrado que al cambiar el valor de la permitividad del sustrato, utilizando dos tipos de materiales, se ha fabricado la estructura. En concreto se van a fabricar dos estructuras diferentes, una estructura utilizando el material Rogers RO5880 y otra estructura con el FR4. El tamaño que se ha fabricado para cada una de las estructura ha sido un tamaño A5 (148x210 mm<sup>2</sup>) debido a que para la frecuencia en la que las estructuras reducen la sección recta radar y con la antena que se va a realizar las medidas es suficiente, ya que la zona que se va a iluminar de la estructura no es más grande que el tamaño de un A5.

Para fabricar las estructuras, se ha empleado la fresadora del Grupo de Antenas de la Universidad Pública de Navarra, LPKF Protomat H100. Es una fresadora mecánica con software de automatización. Gracias a un fichero que se le pasa a la máquina (ver figura 5.7.), esta es capaz de realizar las tareas que sean necesarias para fabricar la estructura, como taladrar, fresar e incluso cortar el contorno de la estructura de forma automática. Para la estructura que se ha simulado, solo ha hecho falta fresar

la superficie del material que se ha empleado para la fabricación. De esta forma, la máquina utiliza fresas de diferentes tamaños que van comiendo el metal de la superficie del material, en este caso para los materiales Rogers RO5880 y FR4. Las fresas que se utilizaron para la fabricación de la estructura fueron fresas con un diámetro de 1 mm y de 0.2 mm. El cabezal de la fresadora se controla en el eje z de forma que se puede controlar con una precisión de 10  $\mu\text{m}$  la profundidad de la fresa y por consiguiente, cuanta cantidad de material se va a eliminar. Por otro lado, la precisión de esta fresadora en los ejes x e y es de 100  $\mu\text{m}$ .

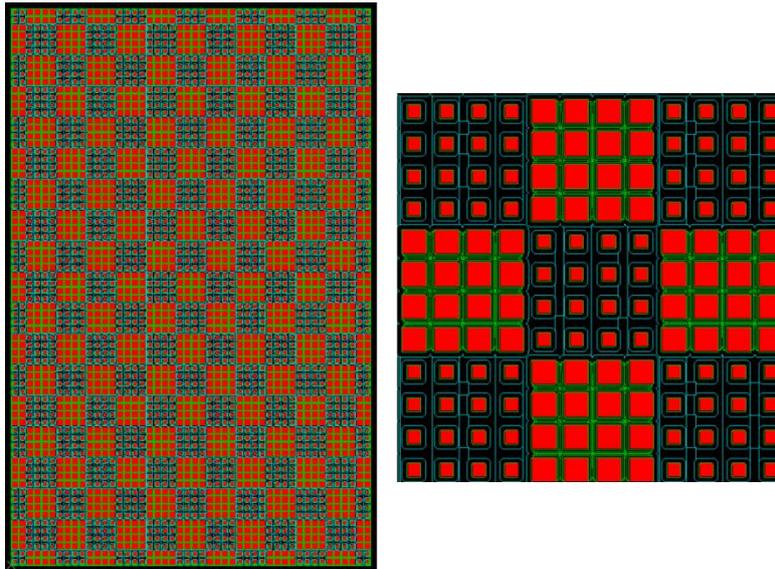


Figura 5.7. Las líneas verdes corresponden a la fresa de diámetro 200 $\mu\text{m}$  y las azules a la de 1mm.

En la figura 5.8. se puede ver una de las estructuras fabricadas, en concreto la estructura fabricada a partir del material Rogers RO5880. El tiempo que empleó la fresadora para fabricar cada una de las estructuras fue en torno a los 30 minutos.

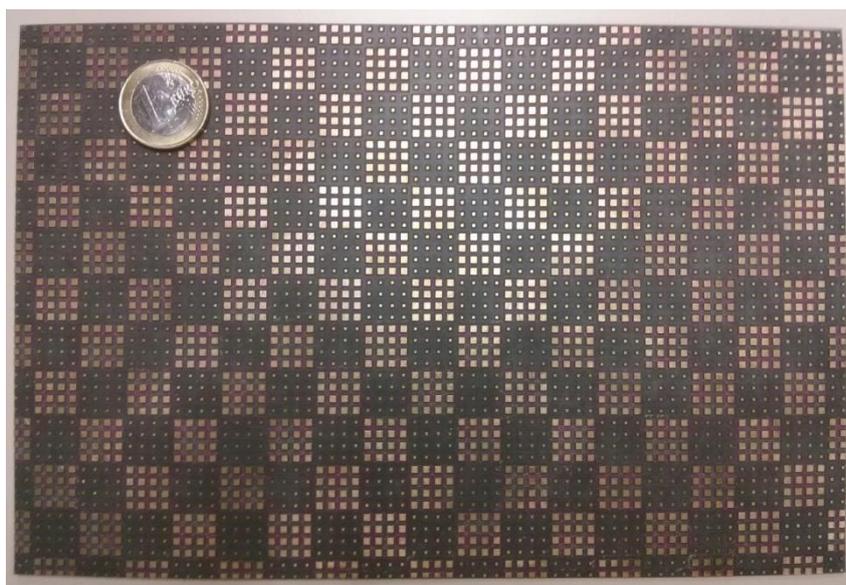


Figura 5.8. Foto real de la estructura chessboard fabricada con el material RO5880.

Una vez fabricadas ambas estructuras con diferente material que compone el substrato, se han medido para comprobar los datos con los de la simulación.

#### 5.2.4. Medidas y comparación de datos teóricos y experimentales

Para realizar las medidas de ambas estructuras se ha realizado un montaje con el que poder fijar la estructura. Para ello, se han utilizado placas ópticas y elementos ópticos de Thorlabs para sujetar la estructura. Además se ha utilizado materiales absorbentes para evitar posibles rebotes y multicaminos de la onda. En la figura 5.9. se puede ver el montaje que se ha realizado para medir la estructura chessboard fabricada. Se realizó una medida monoestática de la superficie, para comprobar el rango de funcionamiento de la estructura para una incidencia normal. La medida biestática no se ha podido realizar ya que se necesitaban cables de mayor longitud para poder desplazar la bocina receptora.

Para obtener los datos se ha utilizado el analizador vectorial de redes Agilent E3861C, el cual tiene un rango de funcionamiento desde 0 GHz hasta 67 GHz. Las medidas se han realizado en la cámara anecoica del Grupo de Antenas de la Universidad Pública de Navarra. El primer paso antes de realizar las medidas es la calibración del analizador. Primero hay que ajustar el rango en el que se van a tomar las medidas y después calibrarlo mediante un kit de calibración, con diferentes cargas, cortos y abiertos. Una vez realizada la calibración, ya se puede empezar a realizar las medidas.

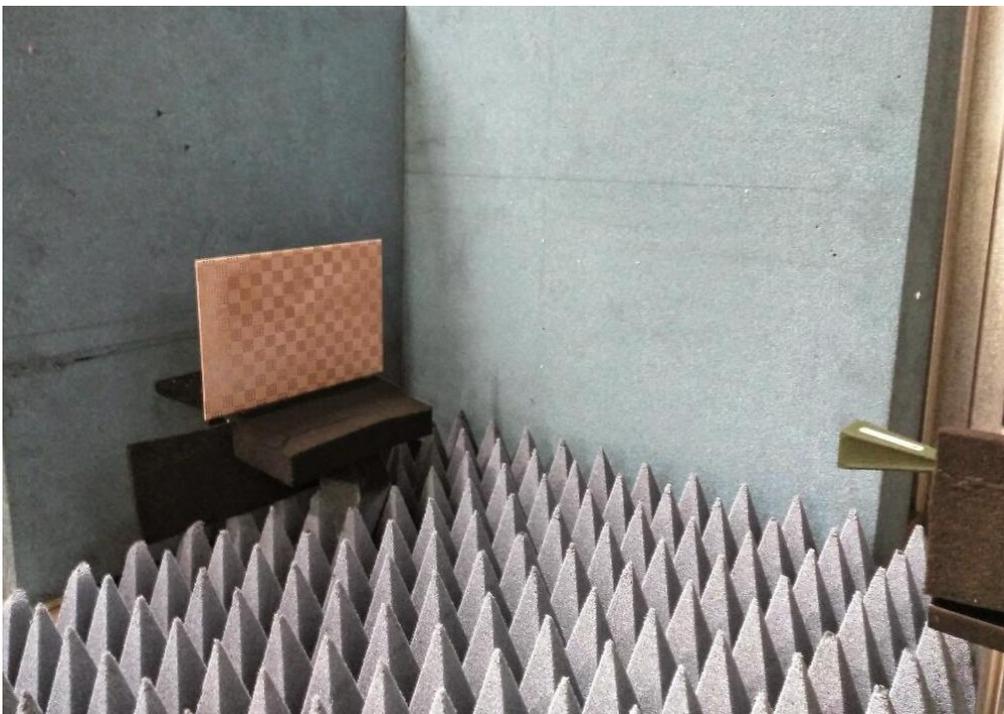
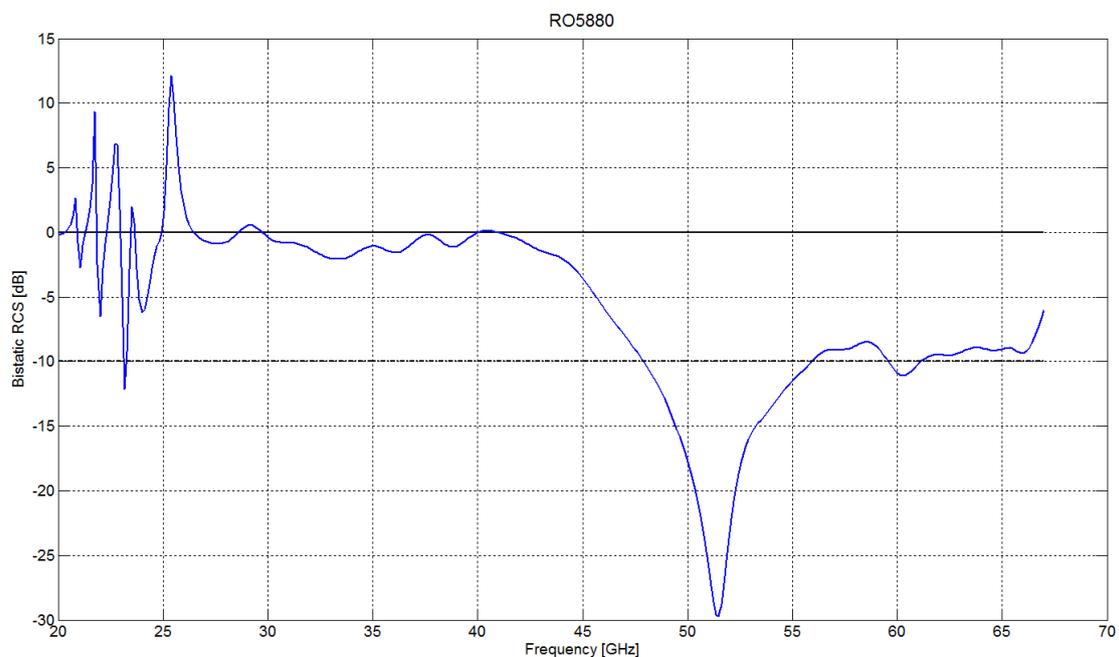


Figura 5.9. Foto del montaje realizado para la toma de medidas de ambas estructuras (estructura chessboard fabricada con el material FR4).

Se ha medido la reflexión de la estructura para incidencia normal, midiendo el parámetro S11 de la configuración y aplicando un gating temporal, de tal forma que solo se refleje en el S11 la influencia de la superficie a medir.

Se pueden ver los datos obtenidos para ambas estructuras. Como se puede comprobar, el hecho de que el material con el que se ha realizado las estructuras sea diferente y que el valor de la permitividad de ambos sea distinta hace que el rango de frecuencias en el que las estructuras reducen la sección radar hace que este rango se mueva, consiguiendo uno de los objetivos principales de este proyecto, diseñar una estructura sintonizable para su aplicación en la reducción de la sección radar.

Cabe destacar que hay un rango de frecuencias para los que la antena no está adaptada y por lo tanto los datos que reflejan las gráficas no son los reales. Sin embargo este rango de frecuencias está fuera del rango en el que las ambas estructuras reducen la sección radar, por lo que no nos afecta este comportamiento. Los datos que se pueden extraer de la figura 5.10. son que la estructura con el tipo de material Rogers RO5880 reduce la sección radar para las frecuencias comprendidas entre los 47 GHz y los 56 GHz. Sin embargo se ve que desde los 56 GHz el valor del campo reflejado normalizado está en torno a los -10 dB, lo que se asemeja a los resultados teóricos obtenidos y que se puede decir que la reducción de la RCS es hasta los 65 GHz, donde el rango del analizador de redes hace que la medida no sea fiable. Para la estructura fabricada con el material FR4 se tiene que el rango de frecuencias para los que la estructura reduce la RCS es desde los 31 hasta los 55 GHz, lo cual es bastante mejor que los datos teóricos.



a)

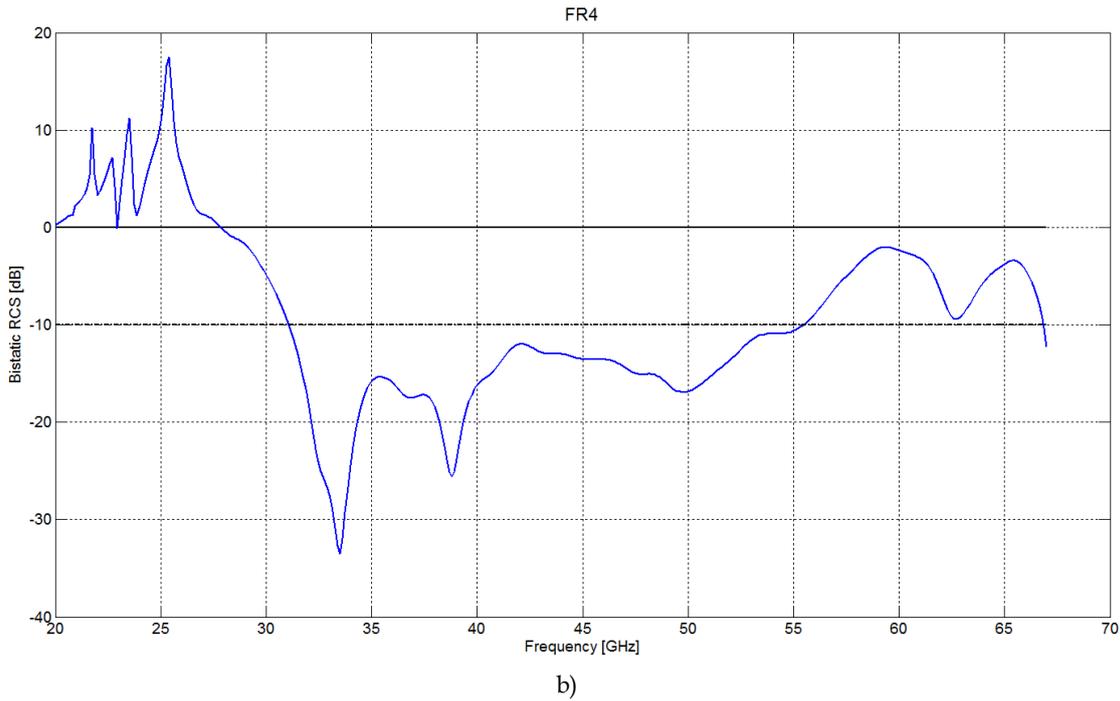


Figura 5.10. Medidas del campo reflejado normalizado obtenidas para las estructuras con los materiales a) RO5880 y b) FR4.

En la tabla 5.2 se recogen estos datos y se comparan con los datos teóricos obtenidos a partir de la simulación de las estructuras completas, para así hacer una mejor comparación entre los datos obtenidos mediante las simulaciones y los datos medidos.

Se puede ver que en el caso de la estructura fabricada con el material RO5880, los datos experimentales dan un menor ancho de banda de funcionamiento para la estructura. Sin embargo, para la estructura fabricada con el material FR4 el rango de frecuencias en el la estructura presenta una reducción de la sección recta radar mejora con respecto a los datos teóricos obtenidos mediante las simulaciones. La diferencia de los rangos de funcionamiento se pueden deber a pequeñas variaciones de los tamaños fabricados respecto a los simulados, así como el hecho de que la fresadora haya rebajado la altura del sustrato al eliminar el material, reduciendo la altura de las zonas de dieléctrico.

Material	Datos	$f_{\min}$ (GHz)	$f_{\max}$ (GHz)	BW (%)
RO5880 ( $\epsilon=2.2$ )	Teóricos	38	63	49.5
	Medidos	47	65	32.1
FR4 ( $\epsilon=4.4$ )	Teóricos	32	43	29.3
	Medidos	31	55	55.8

Tabla 5.2. Comparación entre los resultados teóricos obtenidos mediante las simulaciones realizadas y los datos experimentales medidos

Por tanto, se ha conseguido fabricar un par de estructuras con los materiales Rogers RO5880 y FR4, con valores de permitividad 2.2 y 4.4 respectivamente, los cuales reducen la sección recta radar en los rangos de frecuencia entre 47 GHz y 65 GHz en el caso del RO5880, y entre 31 GHz y 55 GHz para la estructura con el material FR4. Se ha demostrado que al cambiar el valor de permitividad del sustrato el ancho de banda de mueve. En concreto, se tiene que para un cambio de 2.2 a 4.4 en el valor de la permitividad, esta estructura tiene un ancho de banda de funcionamiento desde los 31 GHz hasta los 65 GHz, lo que equivale a un ancho de banda porcentual de 70.8%.

### 5.3. Diseño estructura con parches para LC

Como se ha visto en el apartado anterior, se ha conseguido fabricar dos estructuras que funcionan en un rango de frecuencias diferente, debido a que se han fabricado utilizando dos materiales diferentes, el Rogers RO5880 y el FR4, con valores de permitividad 2.2 y 4.4 respectivamente. El objetivo de este apartado es el diseñar una estructura que pueda ser sintonizable usando la tecnología de cristales líquidos. Para realizar el diseño de esta estructura se partirá de la estructura que se ha visto en el apartado anterior, los parches cuadrados metálicos. La altura con la que se van a hacer las simulaciones va a ser una altura de 0.8 mm, partiendo de la altura del diseño con parches del apartado anterior. El rango de valores de permitividad en los que se va realizar el estudio va a ser en torno a 2-4, debido a que es un rango cercano a la variación del valor de la permitividad de los cristales líquidos comerciales.

#### 5.3.1. Estudio estructuras AMC

Para conseguir que el valor de la constante dieléctrica del material varíe en un cristal líquido es necesario aplicar un voltaje entre las caras superior e inferior del mismo [Yag13]. Para poder aplicar esto en una estructura tipo chessboard es necesario alimentar cada uno de los AMC de la estructura con un voltaje que haga que se modifiquen las condiciones del material que queda justo debajo de ella. Esto implica rediseñar la estructura, uniendo los parches con una fina línea de alimentación que permita aplicar a todos los parches el mismo voltaje.

Se ha estudiado varias formas de poder realizar esta alimentación, intentando que afecte de la menor forma posible al comportamiento de la estructura. Debido a que se pretende fabricar esta estructura, el tamaño mínimo que se puede escoger a la hora de diseñar esta alimentación es de 0.15 mm. En la figura 5.11. se puede ver dos de los diseños que fueron simulados para intentar alimentar todos los parches. Se ha introducido una línea metálica de 0.15 mm que conecta los parches antiguos. Sin embargo, el hecho de introducir estas líneas de alimentación hace que cambie bastante el comportamiento de las celdas unidad. Cabe destacar que el hecho de alimentar los parches hace que la celda unidad no sea simétrica, y por lo tanto hace falta simular la estructura tanto para el modo TE (dirección en el eje x) como para el modo TM

(dirección en el eje  $y$ ), cosa que hasta ahora no se había tenido en cuenta debido a la simetría de todas las celdas unitarias estudiadas.

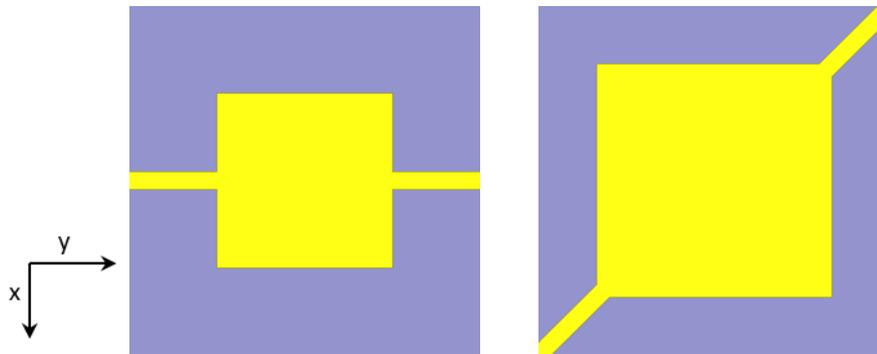


Figura 5.11. Diferentes tipos de alimentación simulados.

Por lo tanto, se ha tenido que realizar un estudio paramétrico del valor del tamaño del parche para poder reajustar el comportamiento de las celdas. Al hacer este estudio para los dos tipos de alimentación de los parches de la figura 5.11. no se ha podido conseguir un par de celdas unitarias que presenten interferencia destructiva en ambos modos y para el mismo rango de frecuencias. Otra forma de alimentación de los que se ha estudiado ha sido mediante pines y alimentar la estructura entre dos substratos- Sin embargo, con este tipo de alimentación no se obtuvo ninguna combinación de celdas para las que hubiese interferencia destructiva para ambos modos en el mismo rango de frecuencias.

Después de ver que ninguna configuración de las anteriores ha funcionado, se ha probado con una alimentación en forma de “zig-zag” (ver figura 5.12.). Se ha escogido este tipo de alimentación debido a que de esta forma no todas las líneas de alimentación están en el mismo eje, y por tanto no solo un modo de propagación se ve afectado por estas líneas. Para este tipo de configuración se ha hecho un estudio para encontrar un par de celdas con las que tener interferencia destructiva. Cabe destacar que para este tipo de alimentación de los parches, la celda unidad que se va a estudiar cambia, y ahora está conformada por un array de  $2 \times 2$  parches.

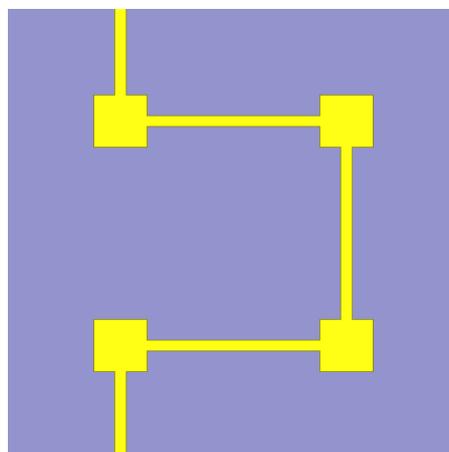


Figura 5.12. Alimentación en forma de zig-zag simulada

Una vez realizado el barrido de valores para el tamaño de los parches, se ha obtenido que para los valores del lado del parche 0.7 mm y 1.7 mm, con esta alimentación, se obtiene un ancho de banda de funcionamiento similar para ambos modos, para los valores de la permitividad del sustrato de 2 a 5. Para el modo TE, el ancho de banda para el valor de permitividad 4 es desde 51 GHz hasta 59 GHz, lo que equivale a un ancho de banda porcentual del 14,5%. Para el modo TM, el ancho de banda para el mismo valor de permitividad es desde 50 GHz hasta 56 GHz, lo que corresponde a un 11,3% de ancho de banda porcentual. El rango de frecuencias en los que ambas estructuras tienen un desfase en torno a  $180^\circ$  es bastante similar para los modos de propagación TE y TM. La altura del sustrato simulada ha sido 0.8 mm. No se han incluido las curvas de fase de estos AMC por simplicidad.

### 5.3.2. Simulación estructura chessboard

Una vez que se ha obtenido un par de celdas para las que existe interferencia destructiva, y EN LA que además el rango de frecuencias es el mismo para ambos modos, se ha simulado la estructura completa para este tipo de alimentación. En la figura 5.13. se pueden ver las estructuras que conforman la estructura completa, con sus respectivas dimensiones. La altura del sustrato es de 0.8 mm. Se ha escogido este valor debido a que ya se tenían datos en el anterior capítulo para esta altura.

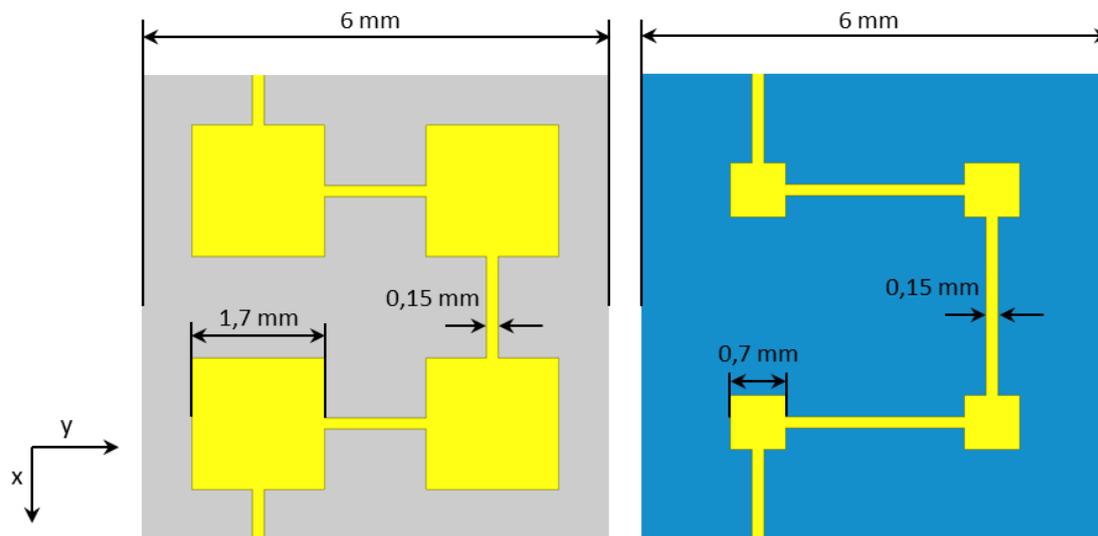


Figura 5.13. Par de estructuras que conforman la estructura chessboard completa que se va a simular.

La celda de la estructura completa que se ha simulado se puede ver en la figura 5.14. Las dimensiones de esta celda son  $24 \times 24$  mm<sup>2</sup>, con una altura del sustrato, como se ha mencionado anteriormente, de 0.8 mm. Se ha simulado la estructura para los valores de la permitividad del sustrato 2, 3 y 4. Se realizará este barrido del valor de la permitividad para los modos de propagación TE y TM.

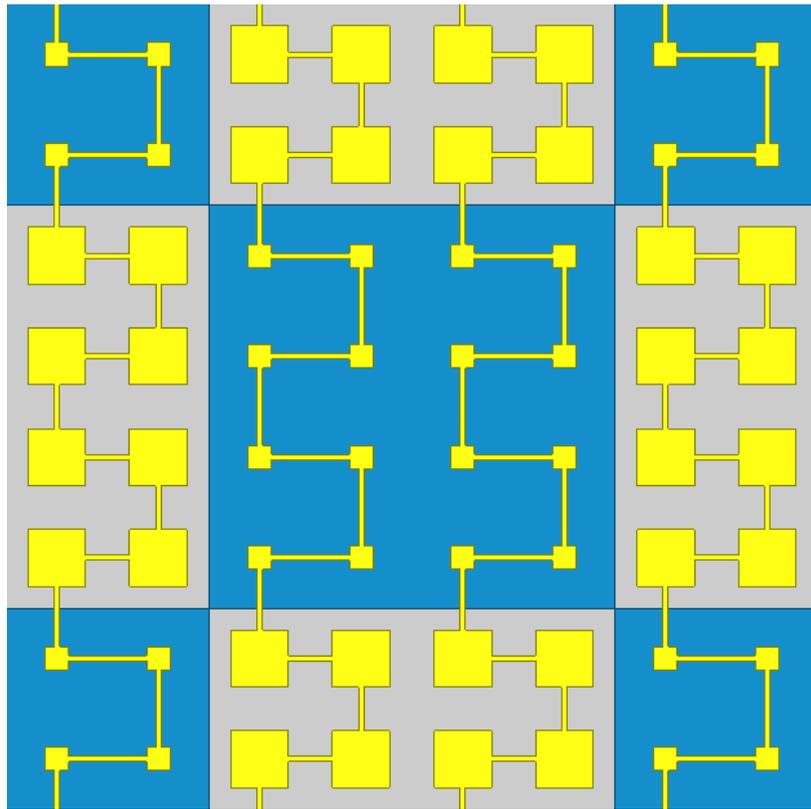
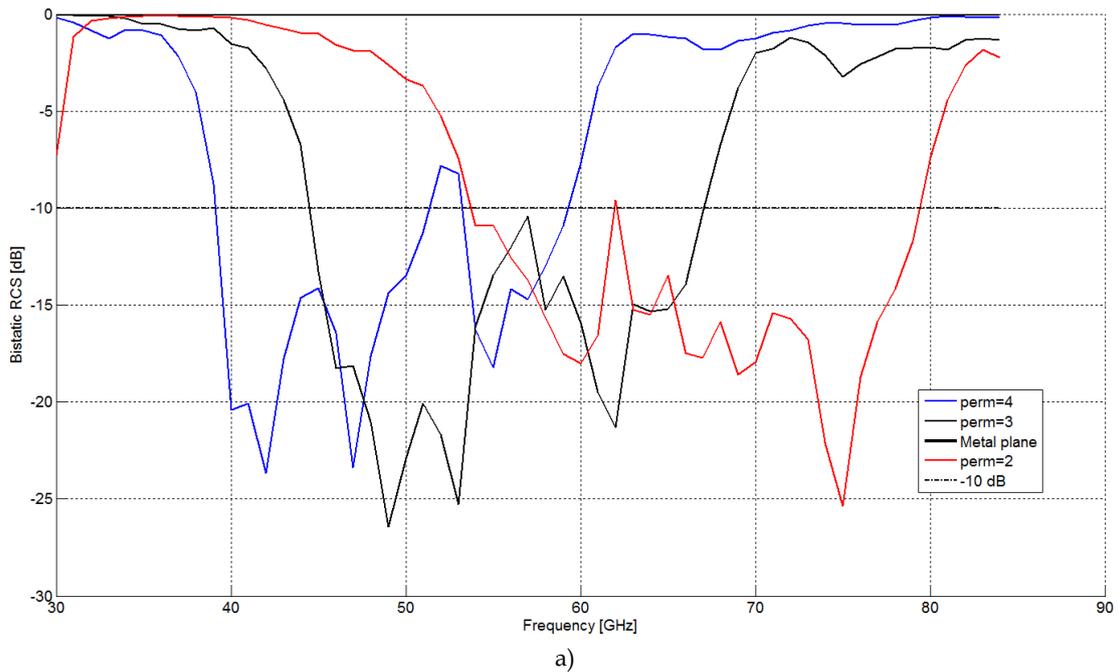


Figura 5.14. Celda de la estructura completa simulada.

En la figura 5.15. se pueden ver los resultados obtenidos de las simulaciones. En la figura 5.15. a) se muestran los resultados para los valores de la permitividad del sustrato 2, 3 y 4 para el modo de propagación TE, y en la figura 5.15. b) los mismos valores para el modo TM.



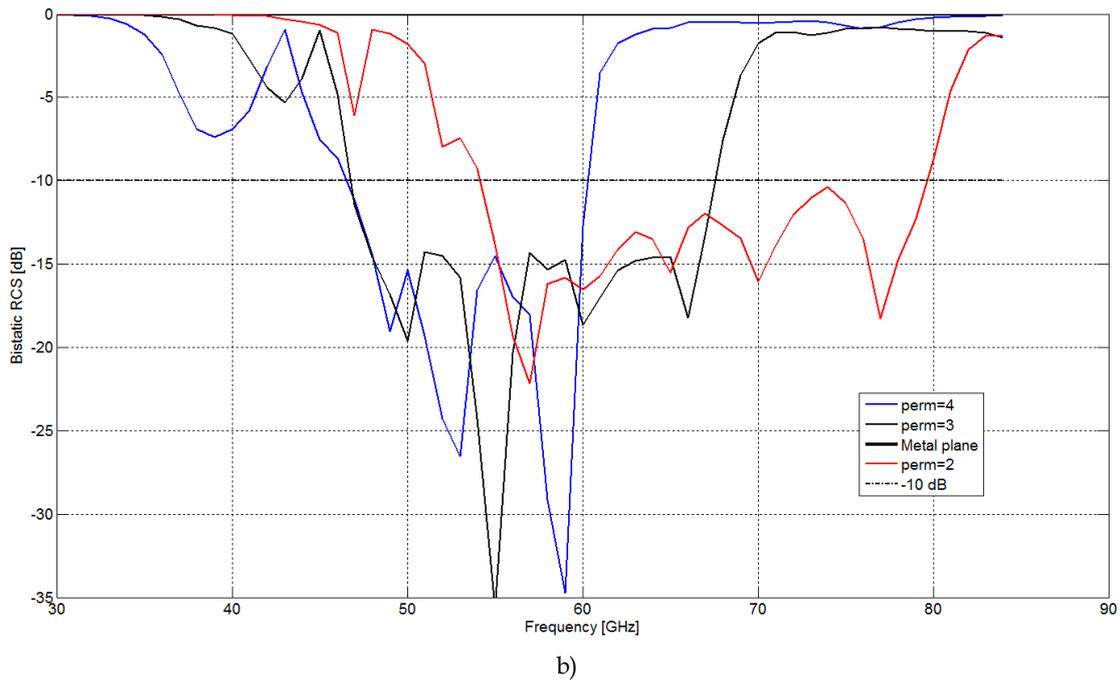


Figura 5.15. Campo reflejado por la estructura y el plano de masa para los valores de permitividad 2, 3 y 4 para los modos de propagación a) TE y b) TM.

Se puede ver que existe un desplazamiento frecuencial del rango en el que la estructura reduce la sección radar por debajo de -10 dB. En el caso del valor de la permitividad del sustrato 4 (línea azul de las figuras de la figura 5.15.), los anchos de banda en los que la estructura funciona son, para el modo TE desde 38 GHz hasta 60 GHz y para el modo TM desde los 47 GHz hasta los 60 GHz. Esta diferencia de ancho de banda puede ser debido a que las líneas de alimentación no son completamente simétricas, y puede que la estructura actúe como un polarizador en torno a 40 GHz. Se puede ver que en el modo TE hay un pico en el que la reducción de la RCS de la estructura está por encima de -10 dB, pero es un rango de frecuencias muy pequeño, por lo que no se tiene en cuenta a la hora de obtener el ancho de banda de funcionamiento. En la tabla 5.4 quedan recogidos los datos de estas gráficas.

$\epsilon$	Modo prop.	$f_{\min}$ (GHz)	$f_{\max}$ (GHz)	BW (%)
2	TE	54	79	37.6
	TM	54	79	37.6
3	TE	45	67	39.3
	TM	47	68	36.5
4	TE	38	60	44.9
	TM	47	60	24.3

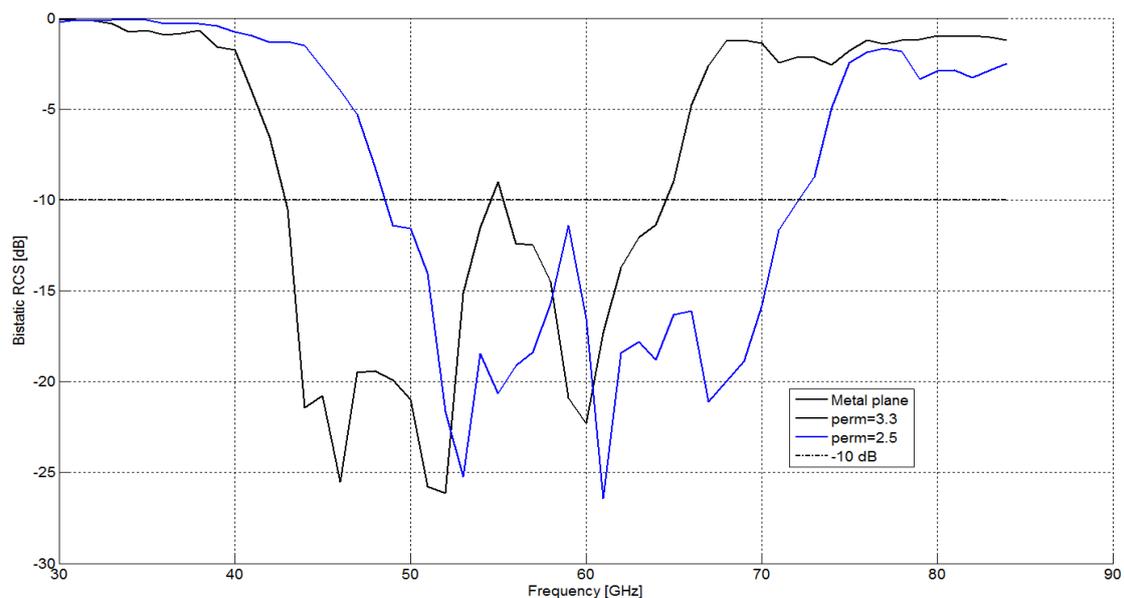
Tabla 5.3. Resumen de los datos obtenidos para las simulaciones de la estructura para los valores de permitividad 2, 3 y 4 para los modos TE y TM

Por tanto, con esta estructura se puede obtener un ancho de banda desde los 38 GHz hasta los 79 GHz para el modo TE (70% ancho de banda porcentual), y un ancho de banda desde los 47 GHz hasta los 79 GHz para el modo TM (50.8% ancho de banda porcentual), cambiando el valor de la permitividad de 2 a 4.

### 5.3.3. Implementación de cristales líquidos

Una vez obtenidos estos resultados, se buscó algún tipo de cristal líquido que tuviese el valor de la permitividad en torno a los valores simulados. Se puso en contacto con una empresa de cristales líquidos alemana, MERCK, para ver que materiales disponían y ver cuánto costaban y como se podía fabricar una estructura implementando esta tecnología. Debido a cuestiones de tiempo, no se pudo concretar nada con esta empresa, pero se tomó como referencia para hacer nuestro diseño un cristal líquido suyo, concretamente el GT3-23001. Este cristal tiene valor de permitividad de 2.5 y 3.3, dependiendo del voltaje externo que se le aplique. Por tanto, se ha simulado esta misma estructura para estos dos valores, y así tener los resultados teóricos para este diseño, a pesar de que no se ha podido fabricar.

En la figura 5.16. se muestran los resultados de las simulaciones que se realizaron para estos dos valores de permitividad del substrato. Se puede ver que al cambiar el valor de la permitividad del substrato, existe un desplazamiento frecuencial del rango de frecuencias en el que la estructura reduce la sección radar por debajo de los -10 dB. Concretamente, para el modo TE el rango de ancho de banda es desde 43 GHz hasta 64.5 GHz para el valor 2.5, y desde 49 GHz hasta 72.5 GHz para el valor 3.3. Para el modo de propagación TM, se tienen los anchos de banda desde 47 GHz hasta 65 GHz para el valor 2.5 y desde 49 GHz hasta 73 GHz para el valor 3.3. En la tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos de la figura 5.16.



a)

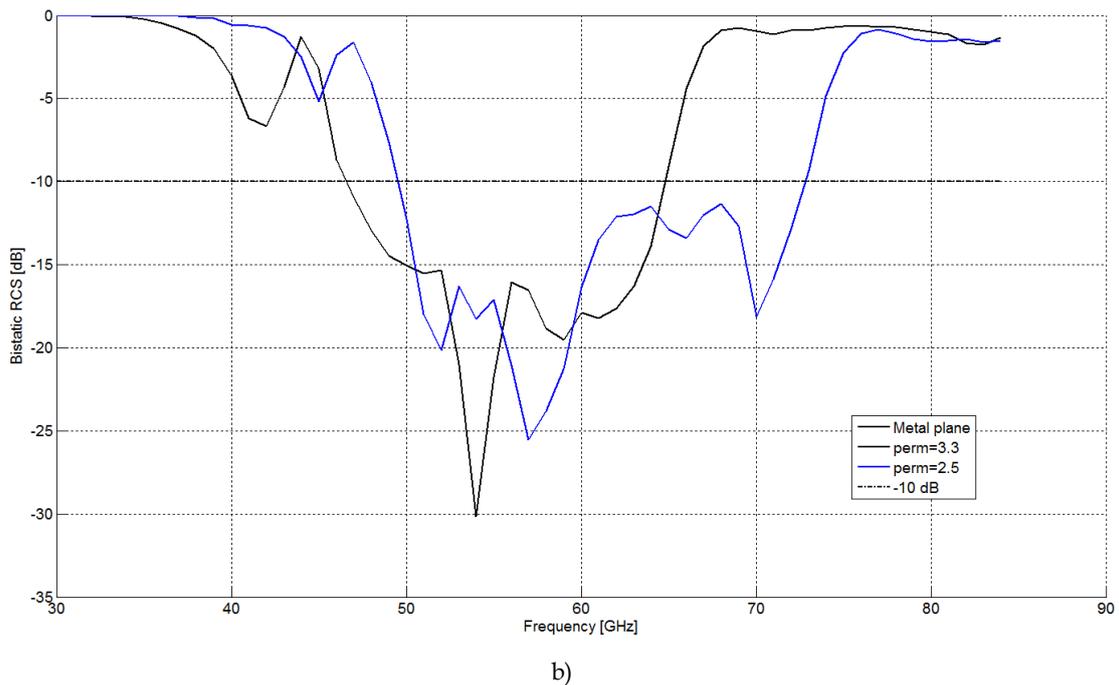


Figura 5.16. Campo reflejado por la estructura *chessboard* y el plano de masa para los valores del cristal líquido GT3-23001 2.5 y 3.3, para los modos de propagación a) TE y b) TM.

$\epsilon$	Modo prop.	$f_{min}$ (GHz)	$f_{max}$ (GHz)	BW (%)
2.5	TE	43	64.5	40
	TM	47	65	32.1
3.3	TE	49	72.5	38.7
	TM	49	73	39.3

Tabla 5.4. Resumen de los datos obtenidos de la simulación de la estructura para los valores del cristal líquido GT3-23001.

Por lo tanto, se ha diseñado una estructura que se puede implementar con la tecnología de cristales líquidos. Utilizando el cristal líquido GT3-23001, cuyos valores de permitividad son 2.5 y 3.3, se obtiene un ancho de banda total de funcionamiento de la estructura desde los 43 GHz hasta los 72.5 GHz para el modo de propagación TE, y para el modo TM se tiene un ancho de banda desde los 47 GHz hasta los 73 GHz, lo que supone un ancho de banda porcentual del 51,1% para el modo TE y el 43,3% para el modo de propagación TM.

---

## CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

A lo largo de este Proyecto Final de Carrera se ha tenido como objetivo reducir la sección recta radar mediante el uso de estructuras AMC. Se ha buscado la forma de poder diseñar una estructura que fuese sintonizable, utilizando alguna tecnología de sintonización como por ejemplo los cristales líquidos.

La primera parte del proyecto se ha enfocado en la búsqueda de diferentes celdas unitarias para poder ver su comportamiento entre ellas, ver que frecuencias de resonancia tenía cada tipo de estructura y como variaba esta al cambiar parámetros de diseño de los AMC. Una vez que se estudiaron varias estructuras, se realizó una comparación entre ellas para ver cuál era la más resonante para buscar cuál de ellas, ante un mismo cambio del valor de la permitividad del sustrato, variaba más su comportamiento. Para la realización de las simulaciones se utilizó el software comercial Ansys HFSS.

Se escogió finalmente la estructura AMC tipo esvástica, debido a que era una celda nueva de la que no se tenían datos sobre su comportamiento y que resonaba lo mismo que otras celdas estudiadas anteriormente. Se buscó un par de celdas con las que poder crear interferencia destructiva y poder reducir la sección recta radar a partir de un factor de escala, aplicado al AMC. Se encontró una combinación de celdas entre las cuales había una diferencia de fase en torno a  $180^\circ$  para diferentes valores de la permitividad del sustrato. Se conformó una estructura completa en forma de chessboard para comprobar que combinando estos dos AMC se conseguía una reducción de la sección recta radar, y que el rango en el que la estructura funcionaba variaba al ir cambiando el valor de la permitividad del sustrato. Se obtuvo que para un cambio del valor de la permitividad del sustrato de 6.5 a 11 el ancho de banda en el que la estructura reducía la sección recta radar era desde los 18.7 GHz hasta los 26.2 GHz, lo que supone un ancho de banda porcentual del 33.4%. Sin embargo, como las dimensiones eran muy pequeñas no se pudo fabricar esta estructura debido a que la fresadora mecánica no tenía tanta resolución.

Por este motivo se decidió hacer un estudio para un tipo de AMC más sencillo, los parches cuadrados y que se pudiese fabricar. Se realizó un estudio de las variables de diseño tanto del tamaño del parche como el tamaño de la celda unitaria. Se obtuvo que la pareja de estructuras con las que se conseguía interferencia destructiva presentaban un tamaño de celda de 3 mm, y con los parches de 1 y 2 mm. Se simuló para los valores de materiales con los que poder fabricar dicha estructura, Rogers RO5880 con permitividad 2.2 y FR4, con un valor de permitividad de 4.4. Una vez que se comprobó que para estos valores de permitividad la estructura reducía la sección radar y que el rango en el que funcionaba se movía, se fabricó la estructura con los dos tipos de materiales. La fabricación y la medida de estas dos estructuras se realizaron en la Universidad Pública de Navarra. Se pudo ver que el cambio del valor de

permitividad hace que el rango en el que la estructura reduce la sección recta radar cambie.

Una vez demostrado que al cambiar el valor de la permitividad, cambia el rango frecuencial en el que la estructura funciona, se diseñó una estructura con la que poder implementar la tecnología de cristales líquidos. Para ello se tuvo que añadir al diseño anterior unas líneas de alimentación para aplicar el voltaje externo a todos los parches. El grosor de estas líneas fue de 0.15 mm, tamaño mínimo con el que se puede fabricar. Se tuvo que rediseñar el tamaño de los parches debido a que al introducir estas líneas de alimentación, cambia el comportamiento de la estructura. Además, al introducir estas líneas de alimentación se rompió la simetrías de las celdas, con lo que se tuvo que hacer dos simulaciones para cada celda, una para el modo de propagación TE y otra para el modo TM. Se hizo un barrido para obtener los tamaños de los parches que eran necesarios para obtener interferencia destructiva, y el resultado que se obtuvo fue que el tamaño de los parches debía de ser 0.7 y 1.7 mm. Una vez obtenidos los tamaños para nuestro diseño, se simuló la estructura completa para los valores de permitividad 2, 3 y 4.

Una vez que se comprobó que esta estructura con los parches alimentados funcionaba en este rango de valores de la permitividad, se simuló la estructura para los valores que puede tomar el cristal líquido GT3-23001, valores 2.5 y 3.3. Se obtuvo que el ancho de banda total para este diseño comprende desde los 43 GHz hasta los 72.5 GHz para el modo de propagación TE, y para el modo TM se tiene un ancho de banda desde los 47 GHz hasta los 73 GHz, lo que supone un ancho de banda porcentual del 51,1% para el modo TE y el 43,3% para el modo de propagación TM.

Las conclusiones finales que se pueden extraer de este Proyecto Final de Carrera son:

- Se ha probado que el desplazamiento frecuencial de los AMC es muy similar, independientemente de cómo de resonante sean.
- Se ha demostrado que se puede realizar una estructura tipo *chessboard* sintonizable, ya que la variación del valor de la permitividad del substrato mantiene la diferencia de fase necesaria entre celdas para conseguir la interferencia destructiva.
- Se ha observado que para desplazar completamente el ancho de banda de funcionamiento de la estructura *chessboard* se necesita una variación del valor de la permitividad muy elevada que no se puede conseguir en la actualidad con los cristales líquidos existentes en el mercado.
- Se ha obtenido una estructura *chessboard* adaptada para ser fabricada en tecnología de cristales líquidos.

- Al adaptar la estructura a la tecnología de cristales líquidos se pierde la simetría de la estructura, lo que obliga a estudiar dos modos de propagación de la onda incidente.

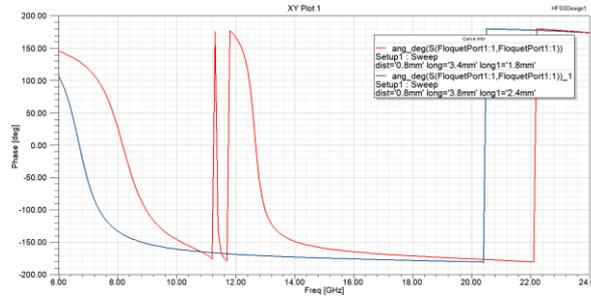
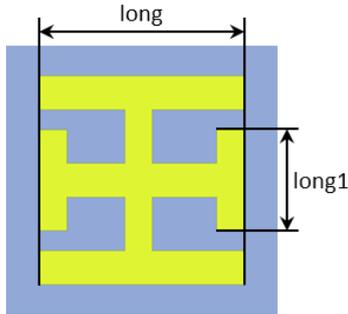
La principal línea futura que deja abierta este proyecto es la fabricación y medida de la estructura adaptada a la tecnología de cristales líquidos para comprobar su correcto funcionamiento.

Otras líneas futuras podrían ser:

- Estudiar en profundidad otros tipos de AMC que permitan un mayor ancho de banda de funcionamiento.
- Estudiar nuevas configuraciones que permitan adaptar las estructuras *chessboard* a la tecnología de LC, mediante variaciones en la alimentación de las celdas que la conforman.
- Utilizar otro tipo de tecnología de sintonización, como el BST, y la adaptación de la estructura *chessboard* a estas tecnologías.
- En un futuro, poder aplicar cristales líquidos que presenten una mayor variación en los valores de permitividad que los que presentan en la actualidad.

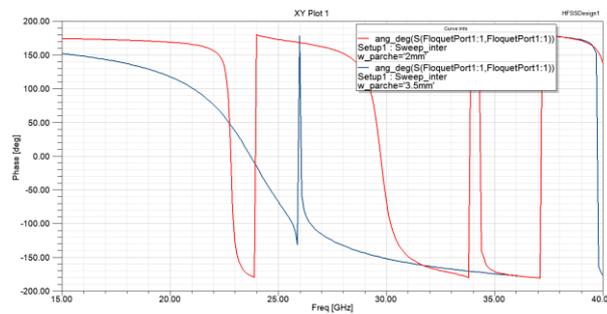
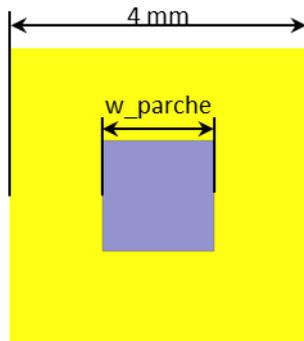
## ANEXO I. OTROS TIPOS DE ESTRUCTURAS AMC ESTUDIADAS

### 1. Parrilla



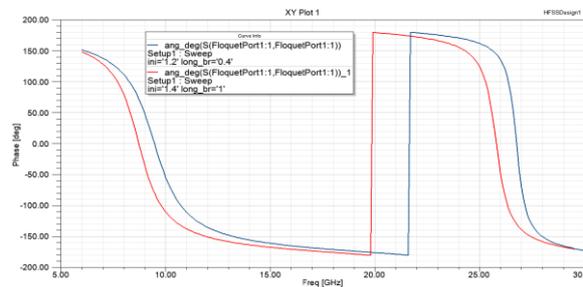
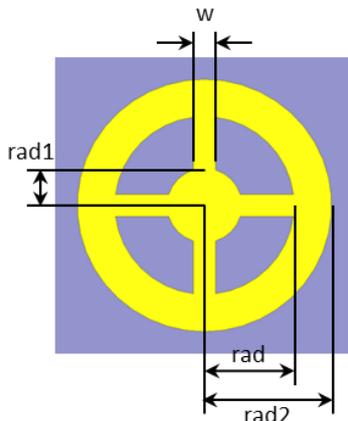
BW=13%

### 2. Parche invertido



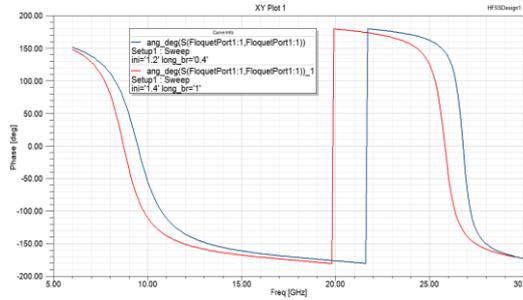
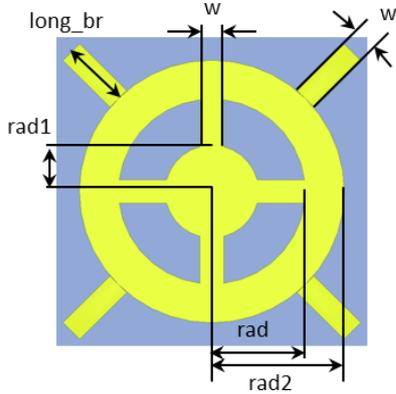
BW=3.4%

### 3. Parche circular



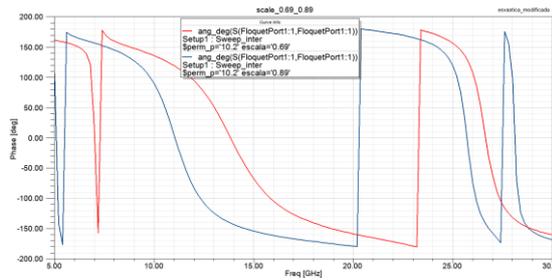
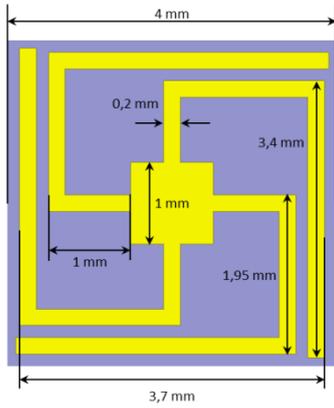
BW=18%

### 4. Parche circular con brazos



BW=2.6%

### 5. Esvástica modificada



BW=16%

---

## PUBLICACIONES

---

---

### Conferencias Nacionales

---

**I. Hernández**, I. Ederra, R. Gonzalo, J.C. Iriarte, "Estructura Reductora de la RCS Sintonizable en Tecnología AMC," XXX Symposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2015, Sept 2015.

# Estructura Reductora de la RCS Sintonizable en Tecnología AMC

I. Hernández, I. Eterra, R. Gonzalo, J.C. Iriarte

[hernandez.64496@e.unavarra.es](mailto:hernandez.64496@e.unavarra.es), [jcarlos.iriarte@unavarra.es](mailto:jcarlos.iriarte@unavarra.es)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pública de Navarra,  
Campus Arrosadia, 31006, Navarra, España

**Abstract-** Several techniques can be used to reduce Radar Cross Section (RCS). As it can be found in literature, AMC technology can be used to achieve this reduction by using a combination of two AMC cells in a chessboard like configuration. 180 degrees phase difference can be obtained by properly selecting the phase slope versus frequency of both AMCs, reflecting the energy away from the source. However, any design has been focused in the reconfigurability of the structure. In this paper, a study of the viability of designing a tunable chessboard is shown. The value of permittivity of the substrate has been changed to vary the working frequency of the chess keeping the RCS reduction.

## I. INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos utilizados para la reducción de la sección radar (RCS) se basa en reflejar la energía de las ondas que inciden a una superficie en una dirección diferente a la especular. Este fenómeno se puede lograr mediante la combinación de dos estructuras AMCs (Artificial Magnetic Conductor) [1], [2], en una configuración tipo tablero de ajedrez. Se debe conseguir que los AMCs presenten una diferencia de fase de  $180^\circ$ , para conseguir una interferencia destructiva de la onda reflejada. Todos los trabajos presentados hasta el momento reflejan el rango de funcionamiento de una estructura tipo ajedrez, sin mostrar sintonización alguna. En este artículo se estudia la viabilidad de construir un tablero de ajedrez que sea sintonizable, de tal forma que se pueda variar el rango frecuencial en el que se produce rechazo de la Sección Recta Radar (RCS) [3]-[8]. Se han estudiado diferentes posibilidades para conseguir la sintonización de la estructura, resultando la más viable la variación de la permitividad del sustrato. Por lo tanto, se mostrará el comportamiento de la fase los AMCs seleccionados para confeccionar el tablero de ajedrez al variar el valor de la permitividad del sustrato. Una vez elegidos los AMC óptimos para el diseño se comprobará el comportamiento esperado de la estructura completa.

## II. DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS AMC

El primer paso para el diseño del tablero de ajedrez es la selección del tipo de AMC. Se han estudiado distintos diseños de las estructuras AMC, como parches, espirales, o cruces, buscando aquella cuya variación de la fase fuera más sensible a la variación de la constante del sustrato. Finalmente, la estructura seleccionada para el diseño del tablero de ajedrez ha sido un AMC con forma de espiral (ver Fig. 1).

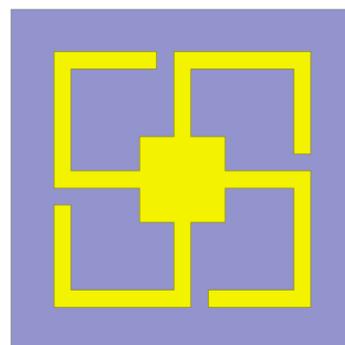


Fig. 1. AMC con forma de espiral

Para conseguir los  $180^\circ$  de desfase entre las celdas del tablero de ajedrez se necesitan dos AMCs con distintas frecuencias de resonancia. En este caso, se ha utilizado el mismo tipo de celda AMC tanto para rellenar las “celdas blancas” como las “celdas negras” del tablero, con diferentes dimensiones. Las dimensiones de los AMCs se muestran en la Fig.2.

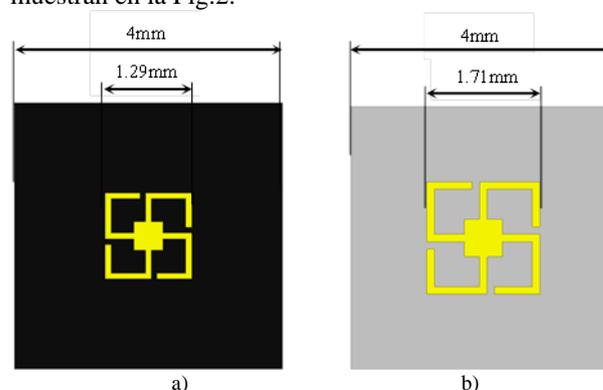


Fig. 2. a) AMC “celdas negras” y b) AMC “celdas blancas”

Se han simulado en ANSYS HFSS ambas celdas con condiciones simetría para calcular la fase introducida a la onda reflejada en función de la frecuencia y de la permitividad del sustrato (ver Fig. 3). Se han incluido en la gráfica solamente las curvas correspondientes a los valores de permitividad límites del barrido, 6.5 y 11 por simplicidad de la misma. En la Fig. 3.a) se muestran las curvas de fase para los dos AMCs para un valor de permitividad de 6.5 y en la Fig. 3.b) la resta de ambas curvas. Lo mismo se muestra en la Fig. 3.c) y 3.d) para el caso de permitividad 11. Para estimar el ancho de banda de funcionamiento del tablero a partir del comportamiento de los AMCs se restan dos a dos las curvas de fase de

ambas estructuras para cada permitividad (Fig. 3.b) y 3.d)). Se toma como ancho de banda el rango de frecuencias donde la diferencia de fase introducida por ambos AMCs se desvía  $\pm 20^\circ$  en torno a  $180^\circ$ .

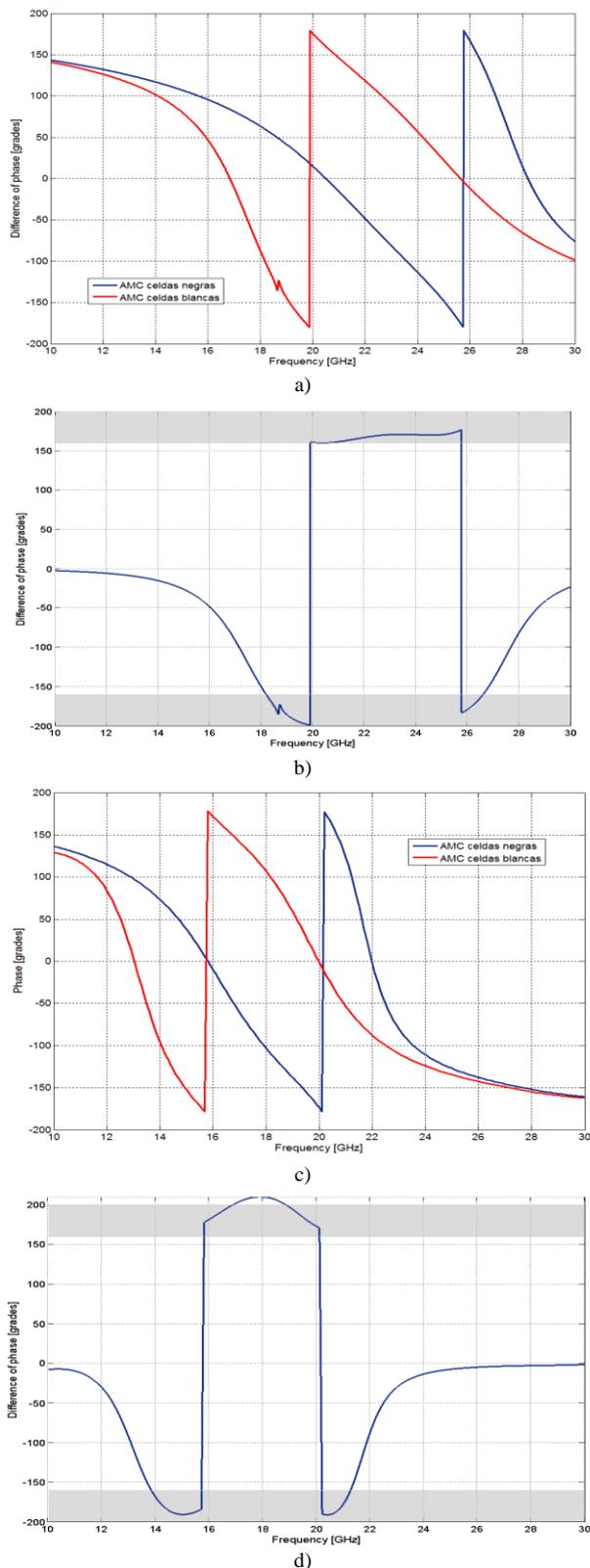


Fig. 3. Variación de la fase de la onda reflejada para los dos AMCs elegidos para diferentes valores de permitividad  
 a) perm=6.5, b) diferencia de fase perm=6.5, c) perm=11, d) diferencia de fase perm=11

En la Tabla 1 se muestran los diferentes anchos de banda en relación con el valor de permitividad del sustrato obtenidas en las simulaciones de la celda unidad de los AMCs. El valor de la permitividad es el mismo para ambas celdas unidades.

$\epsilon$	$f_{\min}$ (GHz)	$f_{\max}$ (GHz)	BW (%)
6.5	18.6	26.6	35.40
7	18	25.7	35.24
7.5	17.44	25	35.63
8	16.92	24.22	35.49
8.5	15.66	23.52	40.12
9	15.5	22.94	38.71
9.5	15	22.5	40.00
10	14.66	21.97	39.91
10.5	14.16	21.66	41.88
11	13.8	21.27	42.60

Tabla 1. Anchos de banda frente a permitividades

Tal y como se aprecia en los datos de la tabla, al variar el valor de la permitividad de la estructura el rango de frecuencias de funcionamiento se desplaza aproximadamente unos 5 GHz. Por lo tanto, la estructura seguirá reduciendo la RCS al variar la permitividad del sustrato. Se mantiene la diferencia de fase entre los AMCs al variar la constante dieléctrica. Se muestra por tanto la viabilidad de sintonización de la estructura a la vista de la fase de los AMCs que compondrán el tablero de ajedrez. Con la variación de permitividad desde 6.5 hasta con 11 se puede conseguir un ancho de banda de funcionamiento desde 13.8 GHz hasta 26.6 GHz (BW = 63.37%). Fuera de este rango de permitividades el ancho de banda de funcionamiento empieza a reducirse considerablemente.

### III. CONFIGURACION DE LA ESTRUCTURA EN TABLERO DE AJEDREZ

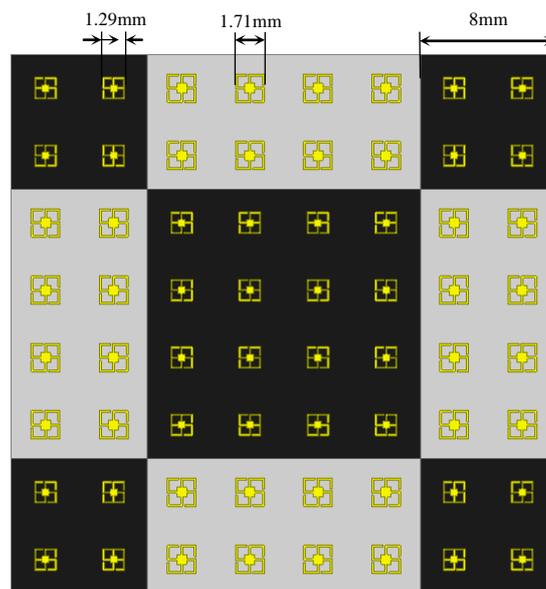


Fig. 4. Celda del tablero de ajedrez simulada

Una vez obtenidos los resultados de las celdas AMC, se estudia el tablero completo. Para ello se simula una celda unidad del tablero siendo esta simétrica con condiciones de contorno que simulen una estructura infinita, ya que los costes computacionales de simular la estructura entera serían muy elevados. Cada celda del tablero de ajedrez está formada por un array AMC de 4x4 elementos de las celdas AMCs (ver Fig. 4). Las dimensiones de esta estructura son de 32x32 mm<sup>2</sup> con un espesor de 1.27mm. El tamaño de las espirales blancas es de 1.71mm y 1.29mm para las espirales negras.

Se realiza un nuevo estudio variando el valor de la permitividad de la estructura completa, se simula la estructura de la Fig. 4 con los valores 6.5, 8, 9.5 y 11 de permitividad, para comprobar que el ancho de banda se desplaza manteniendo la reducción de la RCS.

En la Fig. 5. se muestra el campo reflejado por la estructura en función de la frecuencia y normalizado respecto al campo reflejado por una superficie metálica de las mismas dimensiones con los diferentes valores de permitividad, para incidencia normal.

Para fijar el ancho de banda de funcionamiento se ha tomado como referencia los puntos en los que el campo reflejado cae 10 dB por debajo del metal.

Se puede comprobar que los anchos de banda son menores en las simulaciones de la celda del tablero de ajedrez en comparación con los anchos de banda de los AMCs negro y blanco que figuran en la Tabla 1. Esto es debido a que al simular los AMCs por separado estos son considerados como una superficie infinita mientras que al incluirlos en las celdas del tablero el tamaño se reduce a un array 4x4. Esto hace que se produzcan diferencias de fase entre la simulación de la celda AMC infinita y en la celda del tablero, resultando una diferencia entre el ancho de banda dado por los AMCs y el del tablero final.

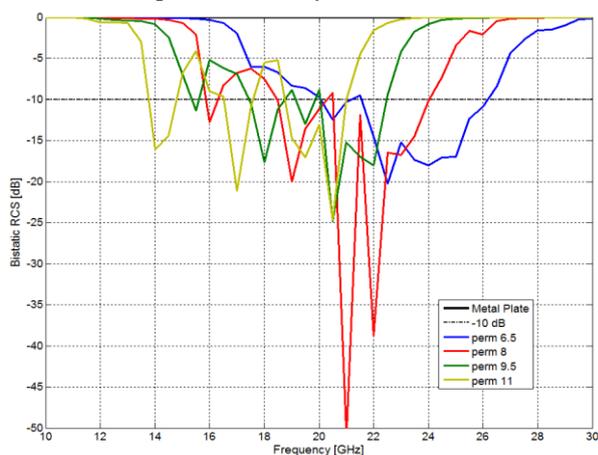


Fig. 5. Campo reflejado normalizado, respecto un plano metálico, por la estructura de ajedrez frente a las permitividades 6.5, 8, 9.5, 11.

Se aprecia de nuevo el desplazamiento frecuencial del rango de funcionamiento del tablero en función de la permitividad, con lo que se demuestra la viabilidad de realizar una estructura sintonizable variando la permitividad del sustrato.

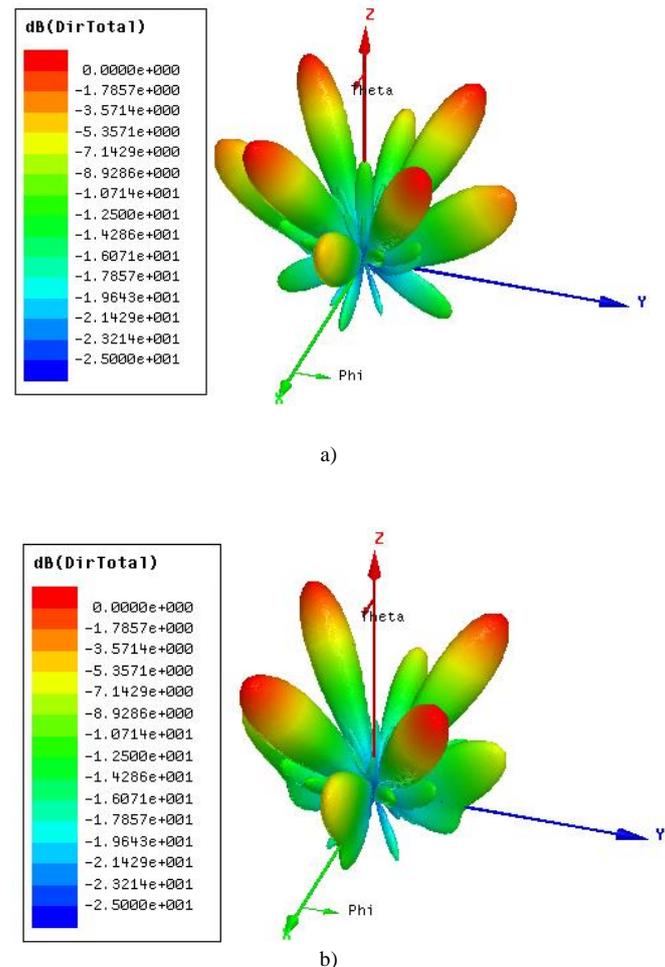
En la Tabla 2 se muestran los anchos de banda para los diferentes valores de permitividad del sustrato. Cabe destacar que para la permitividad 11 del sustrato, la RCS biestática presenta dos picos por encima del valor de -10

dB. Esto es debido a que tal y como se había intuido en el estudio inicial, para valores a partir de 11 el comportamiento de reducción de RCS empieza a deteriorarse en ciertas frecuencias del ancho de banda. Por este motivo el ancho de banda para el valor de permitividad 11 es el más pequeño.

$\epsilon$	$f_{\min}$ (GHz)	$f_{\max}$ (GHz)	BW <sub>-10dB</sub> (%)
6.5	20	26.2	26.84
8	18.5	24	25.88
9.5	17.4	22.5	25.21
11	18.7	21	11.58

Tabla 2. Anchos de banda frente a permitividades

Una vez comprobado que la estructura tiene las propiedades de reducción de la RCS y que al variar el valor de la permitividad del sustrato el ancho de banda se desplaza frecuencialmente, se muestra en la Fig. 6 el campo reflejado en 3 dimensiones a la frecuencia central de cada ancho de banda para los diferentes valores de permitividad. Se demuestra que la potencia se refleja en los planos de  $\phi = \pm 45^\circ$ , reduciendo la RCS. Las direcciones a las que se redirige el campo se puede explicar utilizando la teoría de los “grating lobes” [3], [9].



Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación gracias al proyecto TEC2013-47753-C3-1-R

REFERENCIAS

- [1] Iriarte J. C., Ederra I., Gonzalo R. Maagt P., “Dual Band RCS Reduction Using Planar Technology by Combining AMC Structures”, Proceedings EuCAP 2009, (2009).
- [2] Paquay M., Iriarte J. C., Ederra I., Gonzalo R., de Maagt P., “Thin AMC Structure for Radar Cross-Section Reduction”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 55, no. 12, December 2007.
- [3] Iriarte Galarregui, J.C.; Tellechea Pereda, A.; Martínez de Falcon, J.L.; Ederra, I.; Gonzalo, R.; de Maagt, P., “Broadband Radar Cross-Section Reduction Using AMC Technology,” Antennas and Propagation, IEEE Transactions on , vol.61, no.12, pp.6136,6143, Dec. 2013
- [4] M. E. de Cos, Y. Alvarez, and F. Las-Heras, “A novel approach for RCS reduction using a combination of artificial magnetic conductors,” Progr. Electromagn. Res., vol. 107, pp. 147–159, 2010.
- [5] M. E. de Cos, Y. Alvarez, and F. Las-Heras, “RCS reduction using a combination of artificial magnetic conductors,” in Proc. 5th Eur. Conf. Antennas Propag., Apr. 11–15, 2011, pp. 1336–1340.
- [6] S. Simms and V. Fusco, “Chessboard reflector for RCS reduction,” Electron. Lett., vol. 44, no. 4, pp. 316–317, 2008.
- [7] Y. Zhang, R. Mittra, B. Z. Wang, and N. T. Huang, “AMCs for ultrathin and broadband RAM design,” Electron. Lett., vol. 45, no. 10, pp. 484–485, 2009.
- [8] Y. Zhang, R. Mittra, and B. Z. Wang, “Novel design for low- RCS screens using a combination of Dual-AMC,” presented at the Proc. Antennas Propag. Soc. Intl. Symp. (APSURSI), Jun. 1–5, 2009, 1–4.
- [9] Hansen R., “Phased Array Antennas”, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering

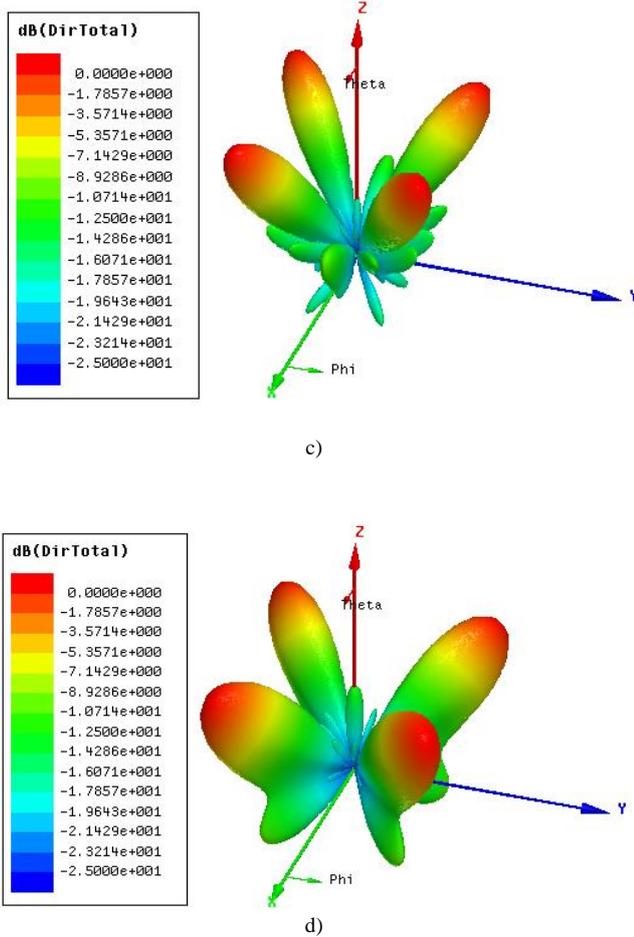


Fig. 6. Campo reflejado normalizado de la estructura tipo tablero de ajedrez a la frecuencia central para cada valor de permitividad del sustrato a) perm=6.5, f=22.5 GHz, b) perm=8, f=21 GHz, c) perm=9.5, f=20.5 GHz, d) perm=11, f=17 GHz

Actualmente se está fabricando un tablero de ajedrez sobre dos sustratos de diferente permitividad para demostrar las predicciones del simulador. Este es el paso previo a estudiar la implementación de un tablero de ajedrez en tecnología de cristales líquidos. Los resultados de las medidas se mostraran en el congreso.

IV. CONCLUSIONES

Se ha estudiado la viabilidad de diseñar un tablero de ajedrez utilizando una combinación de estructuras AMC para reducir la sección radar que sea sintonizable. Se ha demostrado que cambiando los valores de la permitividad del sustrato el ancho de banda se desplaza frecuencialmente, manteniendo el desfase entre celdas AMC de 180°, con lo que se continúa reduciendo la RCS. Variando el valor de la permitividad del sustrato de 6.5 a 11 obtenemos un ancho de banda de 20-26.2 GHz y 13.8-21 GHz respectivamente, con lo que se podría obtener un ancho de banda desde los 13.8 GHz hasta los 26.2 GHz (62%). Este estudio es el paso previo al diseño de un tablero sobre sustrato de cristales líquidos.

## REFERENCIAS

---

- [Bro95] E. Brown and O. McMahon, "Large electromagnetic stop bands in metallodielectric photonic crystals", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 67, pp.2138 - 2141 1995.
- [Cal01] C. Caloz, C.-C. Chang, and T. Itoh, "Full-wave verification of the fundamental properties of left-handed materials in waveguide configurations," *J. Appl. Phys.*, vol. 90, no. 11, pp. 5483-5486, Dec. 2001.
- [Cal02] C. Caloz, H. Okabe, T. Iwai, T. Itoh, "Transmission line approach of left-handed materials," paper presented at the 2002 IEEE AP-S International Symposium and SNC/URSI Digest, p. 39.
- [Cha91] C. Chan, K.-M. Ho, and C. Soukoulis, "Photonic band gaps in experimentally realizable periodic dielectric structures", *Europhys. Lett.*, vol. 16, pp.563 -566 1991.
- [Cur14] Cure, D.; Weller, T.M.; Price, T.; Miranda, F.A.; Van Keuls, F.W., "Low-Profile Tunable Dipole Antenna Using Barium Strontium Titanate Varactors," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.62, no.3, pp.1185,1193, March 2014.
- [Eng06] N. Engheta, R. W. Ziolkowki, "Metamaterials, Physics and Engineering Explorations", Ed. Wiley, 2006.
- [Eta08] D. Etayo, "Estudio de una estructura tipo chess-board con combinación de AMCs para disminución de la RCS en una aplicación broadband", Final Degree Project, UPNA 2008.
- [Fan94] S. Fan, P. Villeneuve, R. Meade, and J. Joannopoulos, "Design of three-dimensional photonic crystals at submicron lengthscales", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, pp.1466 -1469 1994.
- [Fan96] S. Fan, P. Villeneuve, and J. Joannopoulos, "Large omnidirectional band gaps in metallodielectric photonic crystals", *Phys. Rev. B, Condens. Matter*, vol. 54, pp.11245 -11251 1996.
- [Gup97] S. Gupta, G. Tuttle, and K.-M. Ho, "Infrared filters using metallic photonic band gap structures on flexible substrates", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, pp.2412 -2415 1997.
- [Ho90] K.-M. Ho, C. Chan, and C. Soukoulis, "Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 65, pp.3152 -3155 1990.

- [Iri08] J. C. Iriarte, "Design, Fabrication and Measurement of EBG Structures and their Application in Antenna Field and Reflecting Surfaces," Ph.D. dissertation, UPNA, 2008.
- [Iri09] Iriarte, J.C.; Ederra, I.; Gonzalo, R.; de Maagt, P., "Dual band RCS reduction using planar technology by combining AMC structures," *Antennas and Propagation*, 2009. EuCAP 2009. 3rd European Conference on , vol., no., pp.3708,3709, 23-27 March 2009.
- [Iri11] Iriarte, J.C.; Martinez de Falcon, J.L.; Maestrojuan, I.; Liberal, I.; Rebollo, A.; Ederra, I.; Gonzalo, R., "Broadband RCS reduction using AMC technology," *Antennas and Propagation (EUCAP)*, Proceedings of the 5th European Conference on , vol., no., pp.1322,1323, 11-15 April 2011.
- [Iri13] Iriarte Galarregui, J.C.; Tellechea Pereda, A.; Martinez de Falcon, J.L.; Ederra, I.; Gonzalo, R.; de Maagt, P., "Broadband Radar Cross-Section Reduction Using AMC Technology," *Antennas and Propagation*, IEEE Transactions on , vol.61, no.12, pp.6136,6143, Dec. 2013.
- [Iye02] A. K. Iyer and G. V. Eleftheriades, "Negative refractive index metamaterials supporting 2-D waves," in 2002 IEEE MTT International Microwave Symposium (IMS) Digest, Seattle, WA, June 2-7, 2002, pp. 1067-1070.
- [Jai12] Chahat Jain, Navneet Kaur, Gurburneet Kaur "Artificial magnetic conductor for miniaturized antenna applications-A Review" *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* (ISSN 2250-2459, Volume 2, Issue 7, July 2012).
- [Jak04] Jakoby, R.; Scheele, P.; Muller, Stefan; Weil, Carsten, "Nonlinear dielectrics for tunable microwave components," *Microwaves, Radar and Wireless Communications*, 2004. MIKON-2004. 15th International Conference on , vol.2, no., pp.369,378 Vol.2, 17-19 May 2004.
- [Joa95] J. Joannopoulos, R. Meade, and J. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, 1995 :Princeton Univ. Press.
- [Jul15] C. Juliá, "Tunable Antenna Design by Metamaterial Structures Operating At S Band", Final Degree Project, UPNA. 2015.
- [Kno04] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, M. T. Tuley, "Radar Cross Section", Ed. Scitech, 2nd Edition, 2004.
- [Kur94] G. Kurizki and J. Haus, *J. Modern Opt.* (Special Issue on Photonic Band Structures), vol. 41, 1994.
- [Kus13] N. Kushwaha and R. Kumar, "An UWB fractal antenna with defected gorund structure and swastika shape electromagnetic band gap," *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 52, 383-403, 2013.

- [Kuz94] V. Kuzmiak, A. Maradudin, and F. Pincemin, "Photonic band structures of two-dimensional systems containing metallic components", *Phys. Rev. B, Condens. Matter*, vol. 50, pp.1683 1994.
- [Mat13] S. Mateo, "Estructura para la reducción de la Sección Recta Radar", Final Degree Project, UPNA 2013.
- [Osu15] D. Osuna, "Diseño, simulación, fabricación y medida de lentes de metamaterial acopladas a antenas de bocina", Final Degree Project, UPNA. 2015.
- [Ozb94] E. Ozbay, A. Abeyta, G. Tuttle, M. Tringides, R. Biswas, C. Chan, C. Soukoulis, and K.-M. Ho, "Measurement of a three-dimensional photonic band gap in a crystal structure made of dielectric rods", *Phys. Rev. B, Condens. Matter*, vol. 50, pp.1945 -1951 1994.
- [Paq07] Paquay, M.; Iriarte, J.-C.; Ederra, I.; Gonzalo, R.; de Maagt, P., "Thin AMC Structure for Radar Cross-Section Reduction," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.55, no.12, pp.3630,3638, Dec. 2007.
- [Pen96] J. Pendry, A. Holden, W. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, pp.4773 -4776 1996.
- [Pen00] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, no. 18, pp. 3966-3969, Oct. 2000.
- [She01] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction," *Science*, vol. 292, no. 5514, pp. 77-79, 6 Apr. 2001.
- [Sie96] D. Sievenpiper, M. Sickmiller, and E. Yablonovitch, "3D wire mesh photonic crystals", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, pp.2480 -2483 1996.
- [Sie98] D. Sievenpiper, E. Yablonovitch, J. Winn, S. Fan, P. Villeneuve, and J. Joannopoulos, "3D metallo-dielectric photonic crystals with strong capacitive coupling between metallic islands", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, pp.2829 -2832 1998.
- [Sie99a] Sievenpiper, Dan; Lijun Zhang; Broas, R.F.J.; Alexopolous, N.G.; Yablonovitch, E., "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol.47, no.11, pp.2059,2074, Nov 1999.
- [Sie99b] D. Sievenpiper, "High-Impedance Electromagnetic Surfaces," Ph.D. dissertation, UCLA, 1999.

- [Sig95] M. Sigalas, C. Chan, K.-M. Ho, and C. Soukoulis, "Metallic photonic band-gap materials", *Phys. Rev. B, Condens. Matter*, vol. 52, pp.11744 -11751 1995.
- [Smi94] D. Smith, S. Schultz, N. Kroll, M. Sigalas, K.-M. Ho, and C. Soukoulis, "Experimental and theoretical results for a two-dimensional metal photonic band-gap cavity", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, pp.645 -648 1994.
- [Smi00] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187, May 2000.
- [Sou96] C. Soukoulis, Ed., *Photonic Band Gap Materials*. Norwell, MA: Kluwer, 1996.
- [Ves67] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  y  $\mu$ ," *Sov. Phys. Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, 1968. [*Usp. Fiz. Nauk*, vol. 92, pp. 517-526, 1967].
- [Yab87] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, pp.2059 -2062 1987.
- [Yag13] Yaghmaee, P.; Withayachumnankul, W.; Horestani, A.K.; Ebrahimi, A.; Bates, B.; Fumeaux, C., "Tunable electric-LC resonators using liquid crystal," *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2013 IEEE* , vol., no., pp.382,383, 7-13 July 2013.
- [Zio01] R. W. Ziolkowski and E. Heyman, "Wave propagation in media having negative permittivity and permeability," *Phys. Rev. E*, vol. 64, no. 5, 056625, Oct. 2001.