

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO DE ESTRUCTURAS
METAMATERIALES PARA EL DISEÑO DE
METASUPERFICIES COMPLEJAS**
(Study of metamaterial structures for the
design of complex metasurfaces)

Para acceder al Título de

***Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Álvaro Sal de Cos

Septiembre - 2023

Índice

Abstract/Resumen.....	4
Capítulo 1: Introducción	5
1.1 Metamateriales.....	5
1.2 Metasuperficies	7
Capítulo 2: Marco Teórico.....	8
2.1 Clasificación Dieléctrica.....	8
2.2 Estructuras para reflexión anómala.....	12
2.3 Estructuras Codificables.....	14
2.4 Estructuras Conmutables.....	18
Capítulo 3: Metodología	21
3.1 Introducción	21
3.2 CST Studio Suite	22
3.3 Estructura Inicial.....	25
3.4 Evolución de la Estructura.....	26
Capítulo 4: Resultados	27
4.1 Introducción	27
4.2 Estructura inicial	27
4.3 Evolución a estructura N-bit	30
4.4 Evolución a estructura Bicapa.....	33
4.5 Evolución a estructura Conmutable.....	60
Capítulo 5: Conclusiones.....	64
Referencias	66
Índice de Figuras	68

Abstract

The objective of this project is to design complex metamaterial structures from a simpler selected structure, understanding it and evolving it until reaching an improved structure, either in dimensions, bandwidth, or utility. The function thought of these metamaterial structures can range from codable metasurfaces, to anomalous reflection or even the possibility of RIS structures has been contemplated, however they have not been finally developed. For the study, the CST Microwave Suite ® software tool has been used, a three-dimensional simulator of electromagnetic waves, and the results will be attached so that the response is clearly seen both in reflection and in phase of the different structures through which the design process has passed.

Resumen

El objetivo de este proyecto es diseñar estructuras metamateriales complejas a partir de una estructura seleccionada más simple, comprendiéndola y evolucionándola hasta llegar a una estructura mejorada, ya sea en dimensiones, ancho de banda o utilidad. La función que se contempla de estas estructuras metamateriales puede ir desde metasuperficies codificables, a reflexión anómala o incluso se ha contemplado la posibilidad de estructuras RIS, aunque no se han desarrollado finalmente. Para el estudio se ha utilizado la herramienta de software CST Microwave Suite ®, un simulador tridimensional de ondas electromagnéticas, y se adjuntarán los resultados de forma que se vea con claridad la respuesta tanto en reflexión como en fase de las distintas estructuras por las que ha ido pasando el proceso de diseño.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Metamateriales

El término ‘metamaterial’ tiene su origen en las palabras griegas ‘meta’ y ‘material’; ésta última es bastante común en el habla cotidiano, sin embargo, la terminología de la primera no es tan conocida. Esta palabra se utiliza justamente para referirse a algo que es poco común o a algo innovador, algo que va ‘más allá’ de lo habitual [1].

Un metamaterial es un material que posee unas propiedades o características ventajosas aunque insólitas, por lo que no pueden encontrarse de forma natural en el entorno. Por ende, estos materiales con propiedades especiales solo pueden diseñarse de forma específica para obtener esas características deseadas. Para que estas propiedades se den, los materiales han de ser de naturaleza compuesta y no homogénea, por ello, estos materiales suelen estar hechos de partes micrométricas o incluso nanométricas, y lo más importante es que no dependen de su composición, sino de su estructura [2].

Para explicarlo de forma más sencilla se puede hacer un símil con la estructura atómica de un material simple [3]; pongamos que una onda incide sobre una superficie homogénea, y esta onda es reflejada. En este ejemplo, la onda incide sobre cada uno de los átomos de este material, e interactúa de una forma con cada uno de ellos, sin embargo la respuesta de cada átomo no es interesante si se está estudiando la respuesta de un material macroscópico, lo que es de real interés es la respuesta general a gran escala, la cual es la suma de todas las dispersiones de todos los átomos del material, y esto mismo ocurre con un metamaterial. Un metamaterial está formado por unas estructuras repetidas periódicamente que asemejarían a los átomos del caso anterior, reciben el nombre de ‘celdas unidad’; aunque algunos autores los llaman ‘metaátomos’, y son las que se encargan de producir esa dispersión en la onda incidente. La respuesta de estas celdas, dependerá de su forma, tamaño, separación, y otros factores (aunque no de las propiedades específicas del material con el que éstas estén fabricadas), y en su conjunto conformarán la respuesta a gran escala del metamaterial.

Debido a este razonamiento, para que estas estructuras funcionen, el tamaño de éstas debe ser mucho menor que la longitud de onda de la radiación, como se puede ver en la Figura 1.1. Por el contrario, la respuesta electromagnética vendría dada por la dispersión de la onda que provocan las celdas que conforman estas estructuras y entonces, las propiedades de los materiales de fabricación sí que tendrían importancia, y esto no es lo que queremos.

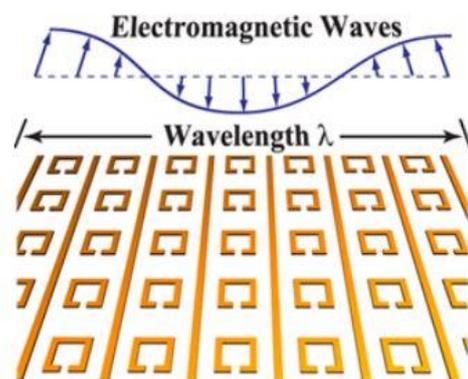


Figura 1.1: Diagrama esquemático de los metaátomos (celdas unidad) en comparación con la longitud de onda activa del metamaterial [1].

Uno de los usos más buscados desde que se comenzó a trabajar con metamateriales es el encubrimiento o invisibilidad [4]. Éste pasaría por la reducción de la firma radar, infrarroja, visible, acústica, y demás casos posibles, únicamente tras reducir todos estos aspectos de detección podríamos hablar de convertir algo en indetectable.

Para la detección de objetos por medio de ondas electromagnéticas hay que tener en cuenta dos tipos de efectos: la reflexión de las ondas por parte del objeto y la sombra que produce el objeto sobre las ondas electromagnéticas del fondo. Un objeto sería perfectamente invisible en un determinado rango del espectro electromagnético si no reflejase ni dispersase las ondas incidentes en otras direcciones y tampoco crease ninguna sombra, es decir, que el objeto se comportase como si fuera transparente a dichas ondas. Una manera de conseguir dicha transparencia sería recubriendo al objeto con una estructura que permita a las ondas electromagnéticas «rodear» a dicho objeto (Figura 1.2), emergiendo en el lado contrario como si hubieran atravesado un espacio vacío. Para conseguir algo así no sirve utilizar materiales convencionales, pues necesitamos estructuras con valores adecuados del índice de refracción, y teóricamente los metamateriales son capaces de alcanzar esos valores de índice de reflexión tan anómalos.

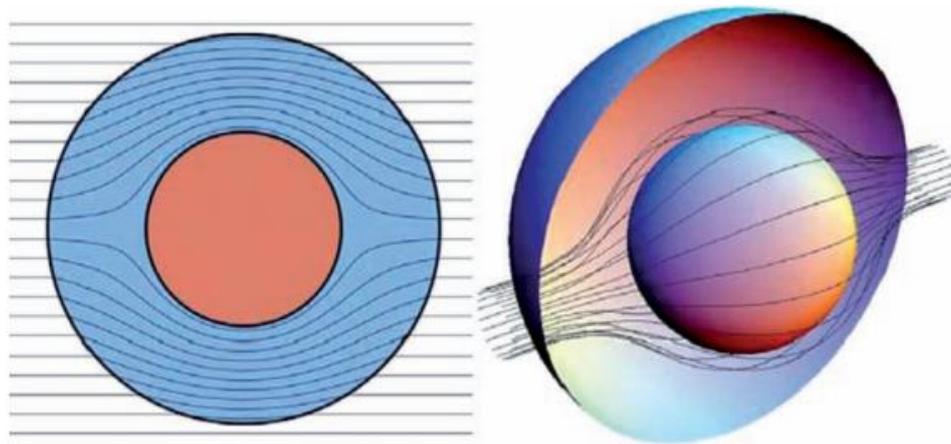


Figura 1.2: . Concepto de invisibilidad: las ondas (líneas negras) «rodean» el objeto a ocultar (esfera interior) gracias al metamaterial que lo recubre (esfera exterior). La figura de la izquierda es una representación de este concepto en dos dimensiones y la figura de la derecha lo representa en tres dimensiones [4].

Desgraciadamente, existen todavía demasiadas dificultades tecnológicas que nos impiden desarrollar un diseño realmente funcional, pues se dan problemas como pérdidas de potencia en la señal que atraviesa [5], la estrecha banda de frecuencia en la que el dispositivo es funcional, y también está el problema de la velocidad, pues las ondas que ‘rodean’ el objeto han de ir más rápido para no perder su posición relativa, cosa que es imposible si trabajamos con la velocidad de la luz.

Pero aunque con este tema por ahora no sea posible aun alcanzar el objetivo final, poco a poco se están logrando avances, además los metamateriales tienen muchas otras funciones para las que si son realmente útiles, algunas de las cuales comentaremos posteriormente.

1.2 Metasuperficies

El potencial que tenían los metamateriales cuando se empezó a trabajar con ellos era mayúsculo, pasando por la mejora de capacidades de antenas, fabricación de absorbentes perfectos, superlentes, reductores de Scattering, y otras muchas aplicaciones, sin embargo, muchos problemas; entre los que encontrábamos las altísimas pérdidas, o la dificultad de fabricación de materiales en 3 dimensiones, especialmente en dimensiones micro y nanométricas, impedían avanzar en este campo. La solución a esto fueron las metasuperficies [6].

Básicamente, las metasuperficies son la versión plana de los metamateriales.

Su forma bidimensional las hace muy prácticas, pues son más ligeras y fáciles de fabricar que un metamaterial normal manteniendo las mismas propiedades, ocupando mucho menos espacio y adaptándose mejor a las superficies de objetos. Se pueden utilizar con fines de bloqueo, absorción, dispersión, concentración, o guiado de ondas incidentes sobre estos objetos, con ángulos de incidencia variados, ya sean rasantes, normales, u oblicuos, y con rangos de frecuencia desde microondas hasta visibles [2].

Las ondas superficiales pueden controlarse diseñando celdas unidad para manipular su fase, amplitud o polarización. Estas están modeladas de tal manera que pueden guiar o repeler las ondas en ciertas direcciones, lo que se puede utilizar para controlar la dispersión (Figura 1.3). Controlando la metasuperficie, mediante los tamaños y las formas de las celdas unidad, se pueden lograr diferentes índices de refracción de superficie efectivos y se pueden modelar diferentes funciones en la superficie, desde metasuperficies destinadas a reflexión difusa; que pueden ser muy útiles para la indetectabilidad de objetos por radares, hasta superficies inteligentes reconfigurables; que puede ser muy interesante para dar cobertura a ángulos muertos donde no llegan las ondas de señal.

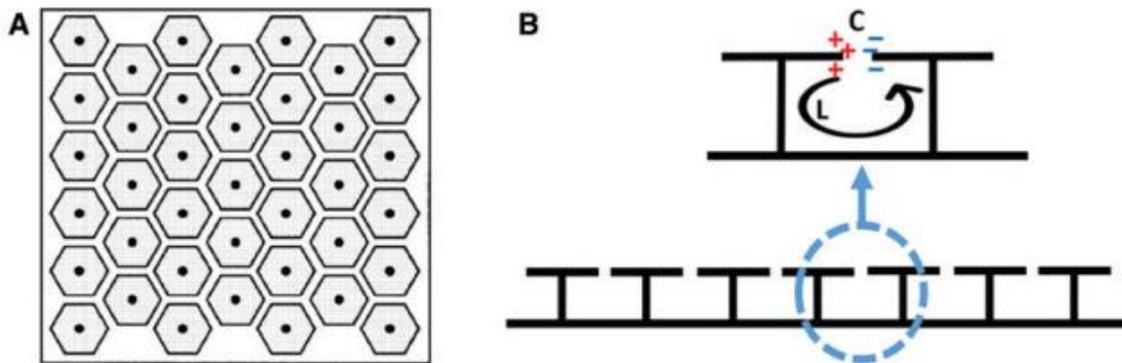


Figura 1.3: Metasuperficie de alta impedancia para supresión de ondas superficiales. (A) Vista superior de la superficie de alta impedancia. (B) Vista lateral de la superficie de alta impedancia con vista ampliada de la celda unidad de resonancia [6].

En este proyecto se tratará de estudiar estas estructuras metamateriales para poder diseñar celdas unidad que nos permitan componer metasuperficies mas complejas, con una amplia gama de utilidades de las cuales hablaremos a continuación.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Clasificación Dieléctrica

Las propiedades especiales que poseen los metamateriales provienen de sus valores de permitividad (ϵ) y permeabilidad (μ). Para ver mejor de donde viene esto, existe una clasificación de los medios dieléctricos hecha por el físico soviético Víctor Veselago.

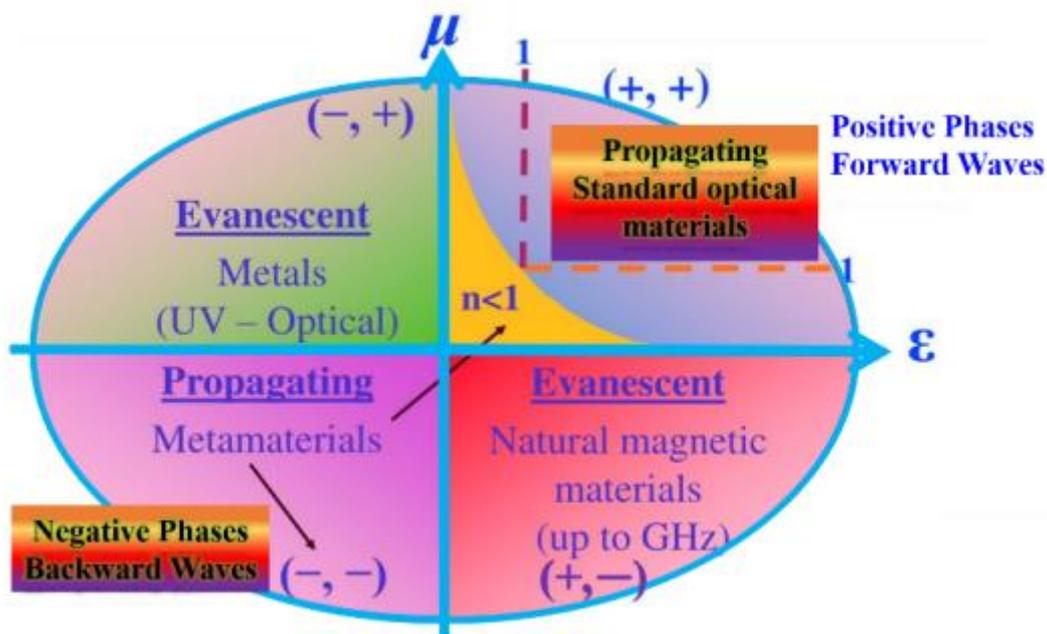


Figura 2.1: Grafismo de la clasificación de metamateriales en función de su permitividad (ϵ) y permeabilidad (μ) [2].

Como se puede apreciar en la Figura 2.1, la clasificación se representa como dos ejes; uno con el valor de la permitividad, y otro con el de la permeabilidad, los cuales forman cuatro cuadrantes [2] [3].

En el primer cuadrante se sitúan los materiales más conocidos y también los más comunes, estos son los que tienen tanto la permitividad como la permeabilidad positiva [$\epsilon > 0$, $\mu > 0$]. Se les denomina materiales doblemente positivos (DPS) o en inglés 'right-handed medium' (RHM). Se pueden encontrar de forma sencilla en la naturaleza como dieléctricos en los que puede tener lugar la propagación de ondas electromagnéticas.

En el segundo cuadrante se encuentran los materiales con permitividad negativa y permeabilidad positiva [$\epsilon < 0$, $\mu > 0$]. Se les denomina medios épsilon negativos (ENG). Es posible hallarlos en la naturaleza en forma de determinados plasmas, metales y semiconductores en frecuencias ópticas y ultravioletas, y solo soportan ondas evanescentes.

En el tercer cuadrante tenemos los medios con una permitividad y una permeabilidad negativas [$\epsilon < 0$, $\mu < 0$]. Estos se conocen como medios doblemente negativos (DNG), de refracción negativa o en inglés 'left-handed medium' (LHM). No existen en la naturaleza, pero si se han conseguido fabricar de forma artificial en laboratorios (metamateriales), además son capaces de propagar ondas electromagnéticas.

En el cuarto y último cuadrante están los materiales con permitividad positiva y permeabilidad negativa [$\epsilon > 0$, $\mu < 0$]. Se les llama medios mu negativos (MNG) y se pueden encontrar en la naturaleza en forma de materiales magnéticos. Al igual que los materiales del segundo cuadrante, solo soportan ondas evanescentes.

Los metamateriales son medios diseñados artificialmente para estar en cualquiera de los cuadrantes.

2.1.1 Propiedades

Como se ha explicado previamente, la alteración del índice de refracción tiene que ver con unos valores simultáneamente negativos de la permitividad (ϵ) y permeabilidad (μ), conllevando unos fenómenos físicos anormales, algunos de los cuales se mencionaran a continuación.

Primeramente hay que entender el fenómeno de la refracción negativa, el cual se da en los medios DNG, pues siguiendo con la relación del índice de refracción (n), con la permitividad (ϵ) y la permeabilidad (μ), que viene dada por la siguiente formula:

$$n = \pm \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$$

Obtenemos que el índice de refracción es negativo en ese caso. Y esto afecta, por ejemplo, a la ley de reflexión y la ley generalizada de Snell.

$$\theta_{trans} = \pm(n_2) \arcsin \left(\frac{n_1}{|n_2|} \sin \theta_{inc} \right)$$

Esto provoca que el ángulo de refracción sea negativo.



Figura 2.2: Primera imagen; trazado de rayos de una varilla de metal en un vaso vacío. Segunda imagen; mismo escenario, pero el vaso está lleno de agua normal, $n = 1.3$, lo que lleva a la refracción ordinaria. Tercera imagen; el agua se sustituye por "agua" con un índice de refracción ficticio de $n = -1.3$ [7].

Un ejemplo de refracción negativa podría ser el mostrado en la Figura 2.2, donde se muestra la refracción de una varilla de metal al pasar de un medio con índice 1 (aire) a otro medio con índice 1.3 (agua), donde se vería una refracción común, y se compara con otro caso donde el segundo medio tiene índice de refracción negativo (-1.3), pudiéndose ver así, como sería este tipo de difracción, con aspectos curiosos como la aparente 'rotura' de la varilla, pues visualmente se aprecia como la parte sumergida está en una posición no coherente, o el hecho de que no se ve el fondo del vaso [7].

Este fenómeno de la refracción negativa que se da en los medios DNG tiene aplicaciones interesantes como por ejemplo la compensación de fase.

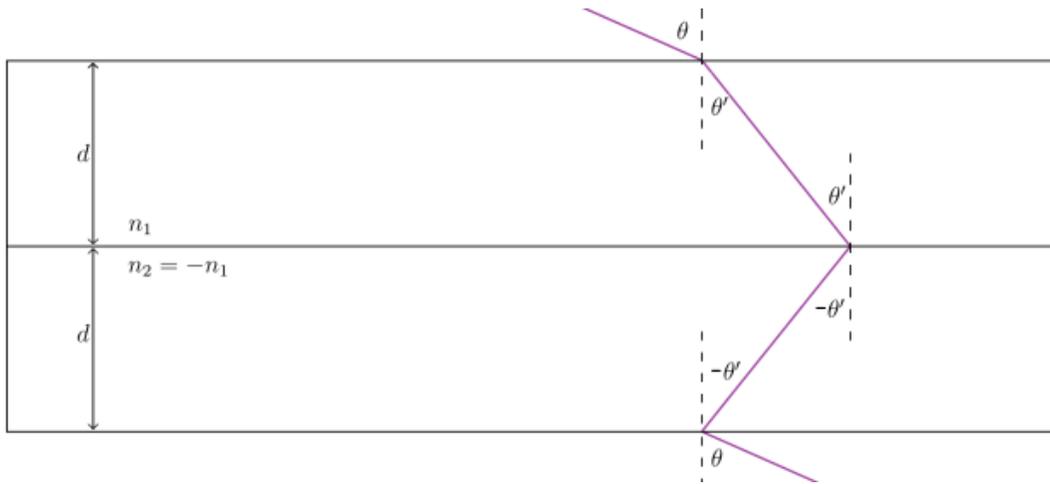


Figura 2.3: Esquema donde se puede ver un ejemplo de compensación de fase al traspasar una lámina de un material DNG justo después de una de material DPS [3].

Si consideramos una lámina de un material DPS de espesor 'd1' con un índice de refracción $n_1 > 0$, y otra lamina inmediatamente adyacente de espesor 'd2' con un índice de refracción $n_2 < 0$. Si una onda monocromática de frecuencia f_0 atraviesa ambas láminas, la diferencia de fase entre la salida y la entrada de ambas laminas es el resultado de la suma de cada una.

$$\Delta Fase = |n_1|k_0d_1 - |n_2|k_0d_2 \quad \text{Con } k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0\mu_0}$$

Así pues, para compensar la fase hemos de ajustar correctamente el espesor de las láminas y su índice de refracción de forma que:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{|n_2|}{|n_1|}$$

De esta forma, como se puede comprobar en el ejemplo de la Figura 2.3, el punto de entrada en la primera lámina y de salida de la segunda lámina están alineados verticalmente y mantienen la fase.

También está la aplicación del índice de refracción negativo a la lente perfecta, o lente de John Pendry [3]. Está demostrado que la nitidez que puede tener una imagen formada por una lente convencional, está truncada por la longitud de onda de la luz, sin embargo, Pendry llevo a cabo un estudio sobre una lente hecha con un material DNG con índice de refracción negativo, y explicó que esta tenía la capacidad de focalizar todas las componentes de Fourier en una imagen en dos dimensiones, superando así el límite propuesto por la longitud de onda [5].

Esto conllevaba que estas lentes podrían formar imágenes que teóricamente tuvieran una nitidez infinita, sin embargo posteriormente se demostró que, para que esto ocurriera, el medio debía ser no dispersivo, cosa que no se cumple, y por ende, esta dispersión y la formación de ondas superficiales, impiden la formación de la imagen perfecta.

A pesar de ello, si es cierto que se han conseguido crear lentes que son capaces de focalizar formando imágenes que superan la barrera impuesta por la longitud de onda en la lentes convencionales (Figura 2.4), lo cual ya es un avance de suma importancia.

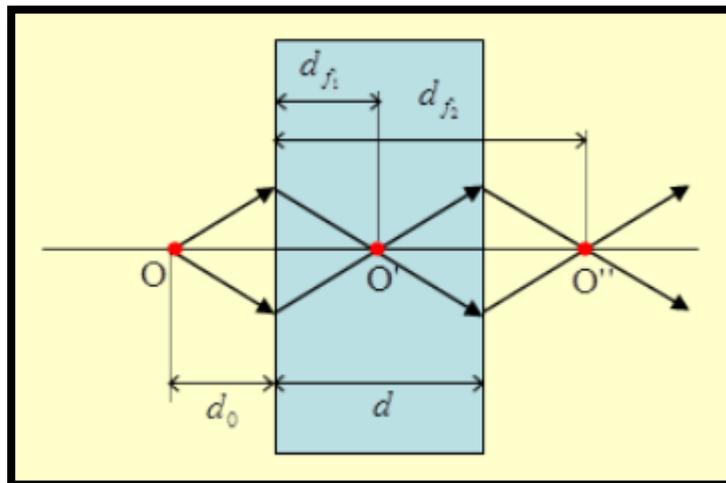


Figura 2.4: Lente plana de Pendry: una lámina de metamaterial (en este caso con $n = -1$) que enfoca los rayos de una fuente en dos puntos, uno interno y otro externo [5].

Hay bastantes más propiedades de los medios DNG que son muy útiles entre los que se encuentra por ejemplo el fenómeno del desplazamiento Goos-Hänchen positivo o negativo, pero de lo que no se hablará en profundidad para no extenderse.

2.2 Estructuras para reflexión anómala

Los metamateriales se pueden clasificar en base a su composición estructural de dos formas [8]; homogéneos (estructuras periódicas) y no homogéneos (estructuras no periódicas), donde las estructuras no homogéneas tienen considerablemente mayor libertad a la hora de controlar campos electromagnéticos [9].

Sabiendo eso y que una de las funcionalidades de los metamateriales que más despiertan el interés en los científicos es la capacidad de redirigir el flujo de ondas electromagnéticas incidentes en una metasuperficie, podemos suponer la importancia que tienen los metamateriales no homogéneos para este tipo de uso conocido como reflexión anómala (Figura 2.5).

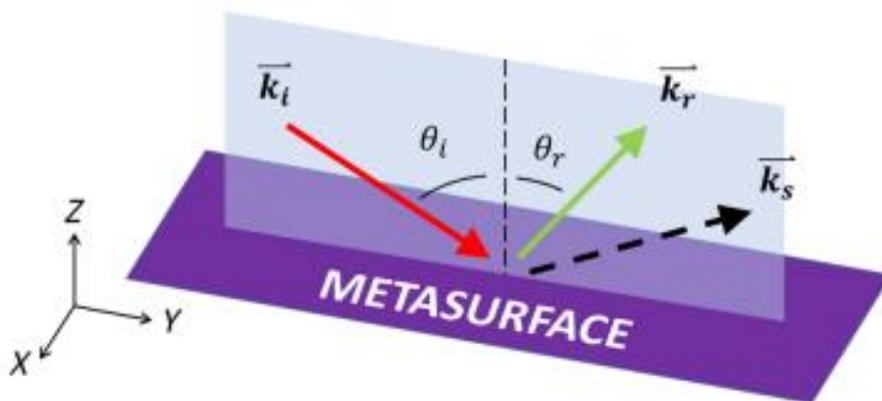


Figura 2.5: Representación gráfica de una reflexión anómala sobre una metasuperficie: El rayo incidente representado en rojo, con un ángulo de incidencia θ_i , el cual es diferente del ángulo de reflexión θ_r del rayo reflejado de forma anómala, representado en verde. El rayo que cabría esperarse en una reflexión común está representado en negro discontinuo [10].

Este fenómeno consiste, de forma simplificada, en que el ángulo de incidencia de las ondas sobre la metasuperficie es diferente del ángulo de reflexión, es decir, se refleja de forma anómala, esto ocurre debido a la ley generalizada de Snell, la cual se muestra a continuación.

$$\sin(\theta_r) - \sin(\theta_i) = \lambda \frac{\nabla_{\phi}}{2\pi n_i}$$

La ley Generalizada de Snell muestra que una variación abrupta de fase, con gradiente ∇_{ϕ} , a lo largo de n interfaz que separa dos medios modifica la dirección de la onda reflejada. En (1) θ_i y θ_r representan los ángulos de incidencia y reflexión respectivamente, n_i el índice de refracción del medio donde se propagan las ondas incidente y reflejada y la longitud de onda.

Este suceso da lugar a algunos tipos de estructuras de interés, entre las que encontramos las estructuras con gradiente de fase, y otras más complejas como las estructuras para reflexión difusa.

2.2.1 Estructuras para reflexión difusa

Con el rápido desarrollo de la tecnología de detección de radar, se ha tratado mucho de mejorar el rendimiento de sigilo en aeronaves [11]. Esto se puede reducir la sección radar [12] mediante la forma de la aeronave; lo cual influye mucho en la aerodinámica, o se puede hacer mediante el material de construcción. Es entonces donde entran los metamateriales de reflexión difusa, los cuales se encargan de reflejar las ondas incidentes en múltiples direcciones, de esa forma, gran cantidad de potencia de la onda se disipa, y la señal que puede llegar a la antena receptora del radar es mínima, un ejemplo muy visual es el de la Figura 2.6.

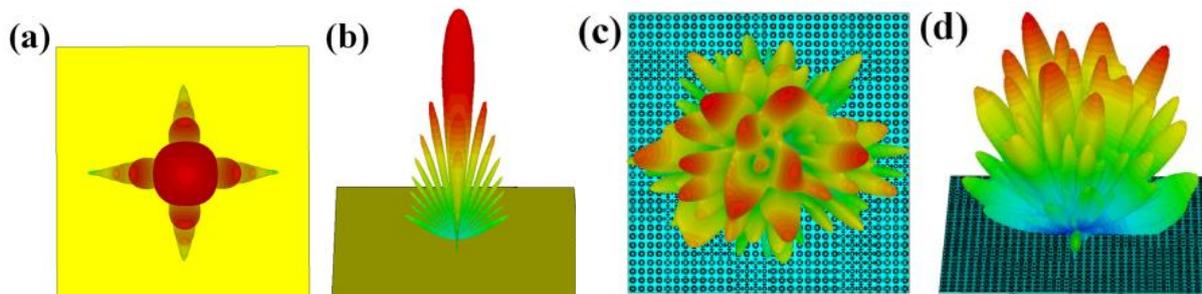


Figura 2.6: Distribución 3D del campo de Scattering. a) y b) sobre una placa metálica, c) y d) sobre una estructura metamaterial de reflexión difusa [11].

Esto se consigue gracias a una combinación de celdas unidad diferentes, siguiendo algunos métodos complicados de los que hablare posteriormente.

2.3 Estructuras Codificables

En cuanto a la clasificación de los metamateriales en ‘homogéneos’ y ‘no homogéneos’, esta clasificación evoluciona cuando vemos que ambos tipos de estructuras, homogéneas y no homogéneas, se caracterizan generalmente por medios continuamente macroscópicos con permitividad y permeabilidad efectivas, y esta característica continua clasifica a estos metamateriales como “analógicos”.

Della Giovampaola y Engheta fueron las autoras que desarrollaron un método para construir “metamateriales digitales” a través de “bits metamateriales digitales” con variaciones de fase específicas entre estos elementos [Cui 2014].

A la hora de diseñar un metamaterial, ya se ha comentado que están formados por pequeñas celdas llamadas celdas unidad, pues la idea sobre los “metamateriales digitales”; también conocidos como estructuras “codificables” o “programables”, consiste en diseñar diferentes tipos de celdas unidad con diferentes propiedades de forma que, según como distribuyamos esas celdas por la estructura, podamos obtener diferentes funcionalidades.

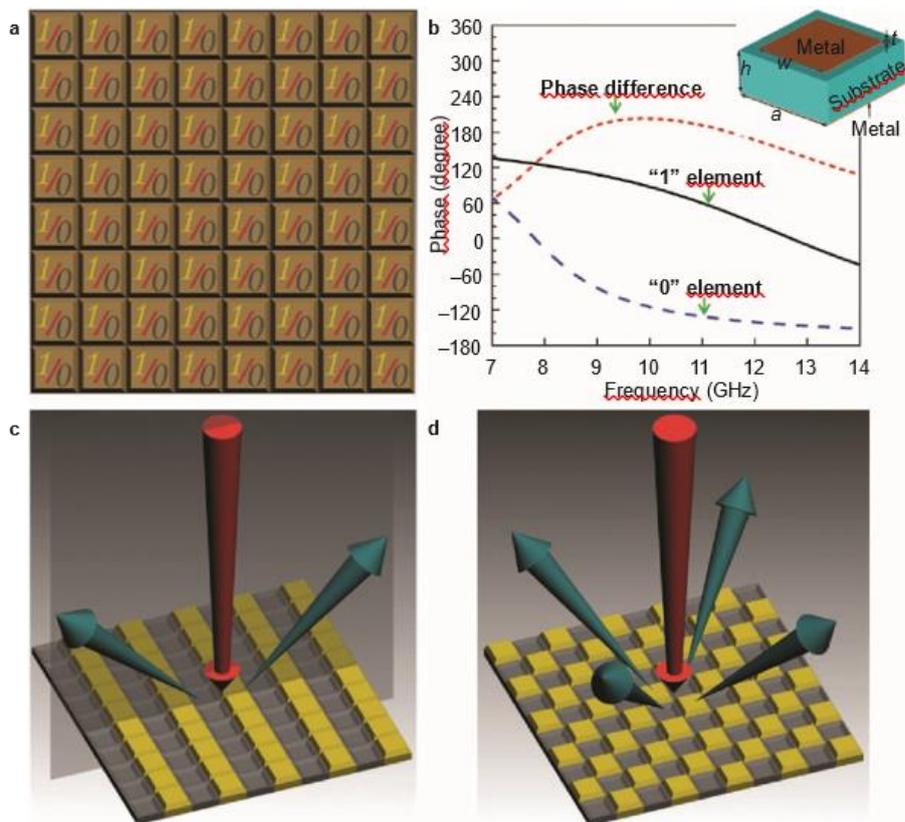


Figura 2.7: Metasuperficie digital de 1 bit. (a) La metasuperficie digital de 1 bit se compone de sólo dos tipos de celda unidad: '0' y '1'. (b) Una celda unidad de parche metálico cuadrado (recuadro) para conformar los elementos '0' y '1' y las respuestas de fase correspondientes en un rango de frecuencias. (c) y (d) Dos metasuperficies de codificación periódica de 1 bit para modificar la dispersión de haces según las secuencias de codificación de elementos '0' y '1': (c) código 010101.../010101... y (d) código 010101.../ 101010.... [8]

Si quisiéramos diseñar un metamaterial codificable de 1 bit, como es el caso de la Figura 2.7, tendríamos que diseñar dos tipos de celdas unidad a las que les asignaremos elementos '0' y '1'. La realización física de elementos digitales no es única, pero requiere respuestas

distintas para obtener cambios de fase significativos y así tener una libertad considerable para controlar las ondas electromagnéticas. En el caso binario, la diferencia de fase máxima es π (180°), por lo que nos interesa que la diferencia de fase entre la respuesta de cada una de las dos celdas unidad sea lo más próxima posible a este valor. En el caso b) de la Figura 2.7, se podría tomar un ancho de banda entre 8.5 y 12 GHz aproximadamente [12].

Una vez se tienen diseñadas las celdas unidad, llegamos al momento donde se ha de decidir que secuencias de codificación se aplican, en el caso adjunto se decantan por secuencias que dan lugar a estructuras periódicas, en el caso c) vemos una distribución en forma de franjas paralelas, mientras que en el caso d) vemos una distribución de tablero de ajedrez, ambas bastante comunes, y que dan lugar a dos tipos diferentes de manipulación de las ondas electromagnéticas.

Este proceso se puede ampliar para conseguir una codificación de 2 bits o más, en el caso de 2 bits tendríamos 4 tipos de celdas unidad, cubriendo los elementos '00', '01', '10' y '11', en este caso la diferencia de fase óptima sería de $\pi/2$ (90°) entre cada elemento, conformando una fase de 0 , $\pi/2$, π y $3\pi/2$, respectivamente. Al tener una codificación de más bits, consigues acceso a más opciones de secuencias a la hora de elaborar los patrones con las celdas unidad, y por ende se consigue tener más control a la hora de interactuar con los campos electromagnéticos incidentes [9].

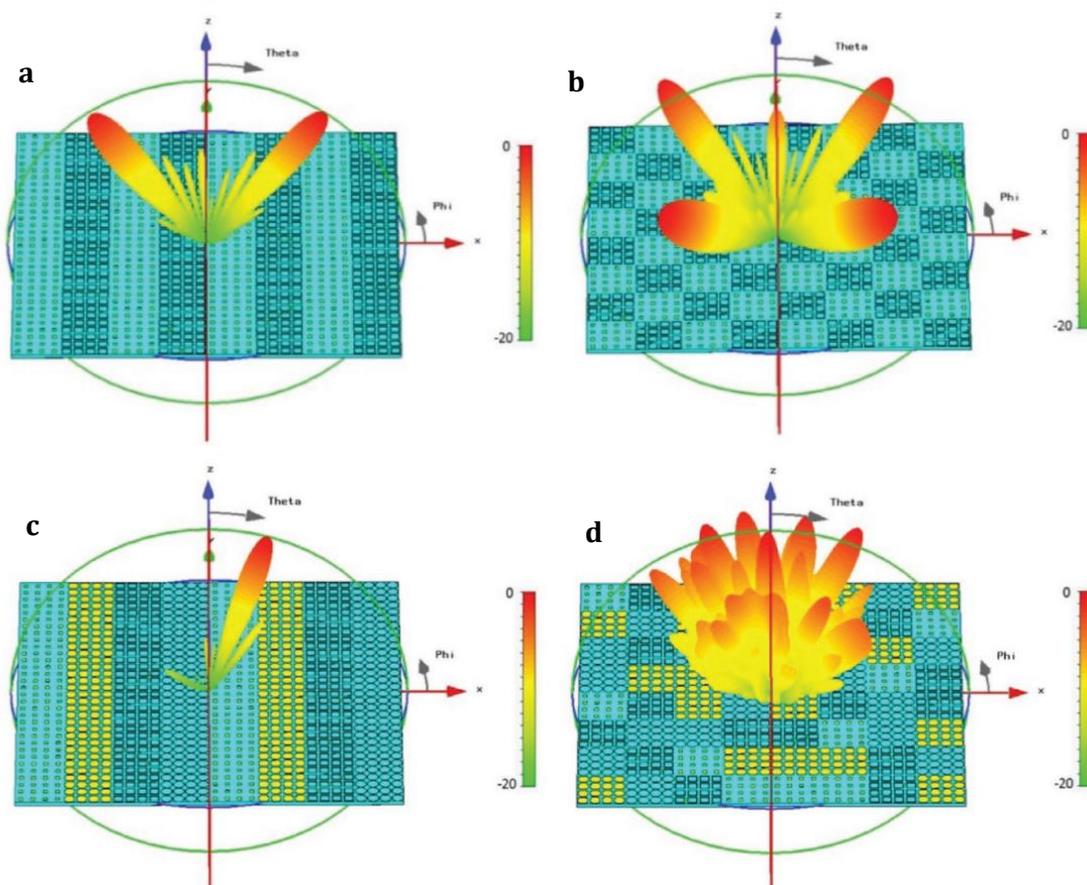


Figura 2.8: Comparación de los campos de Scattering en respuesta a una misma onda EM (10.5 GHz) entre metamateriales con codificación de 1 bit (a y b) y 2 bits (c y d) [9]

Un ejemplo de este claro control en la manipulación de los campos EM sería el caso d) de la Figura 2.8, donde se puede ver que el patrón utilizado (que es un patrón optimizado según el artículo de origen) consigue una reflexión difusa mucho más elaborada de la que podemos obtener con un patrón de ajedrez en una codificación de 1 bit, como se puede comprobar en

el caso b). Esto ocurre porque gracias al uso de ordenadores que se encargan de buscar los patrones óptimos para obtener el mejor resultado posible, consiguiendo así estructuras codificables avanzadas o de diseño algorítmico.

Este método, la codificación de bits, es muy usada para desarrollar estructuras de reflexión difusa por ejemplo.

2.3.1 Pancharatnam–Berry

La fase Pancharatnam–Berry [14], también conocida como fase geométrica es un método de fuerte control sobre las ondas polarizadas circularmente que inciden sobre una metasuperficie y que está determinada por el ángulo de rotación de los metaátomos o celdas unidad.

Esto quiere decir lo siguiente; cada celda unidad tiene su propia fase de respuesta ante la incidencia de una onda, pero si somos capaces de rotar esta estructura un cierto ángulo, manteniendo la celda en su lugar de origen, somos capaces de alterar esa fase inicial, como se puede ver en la Figura 2.9.

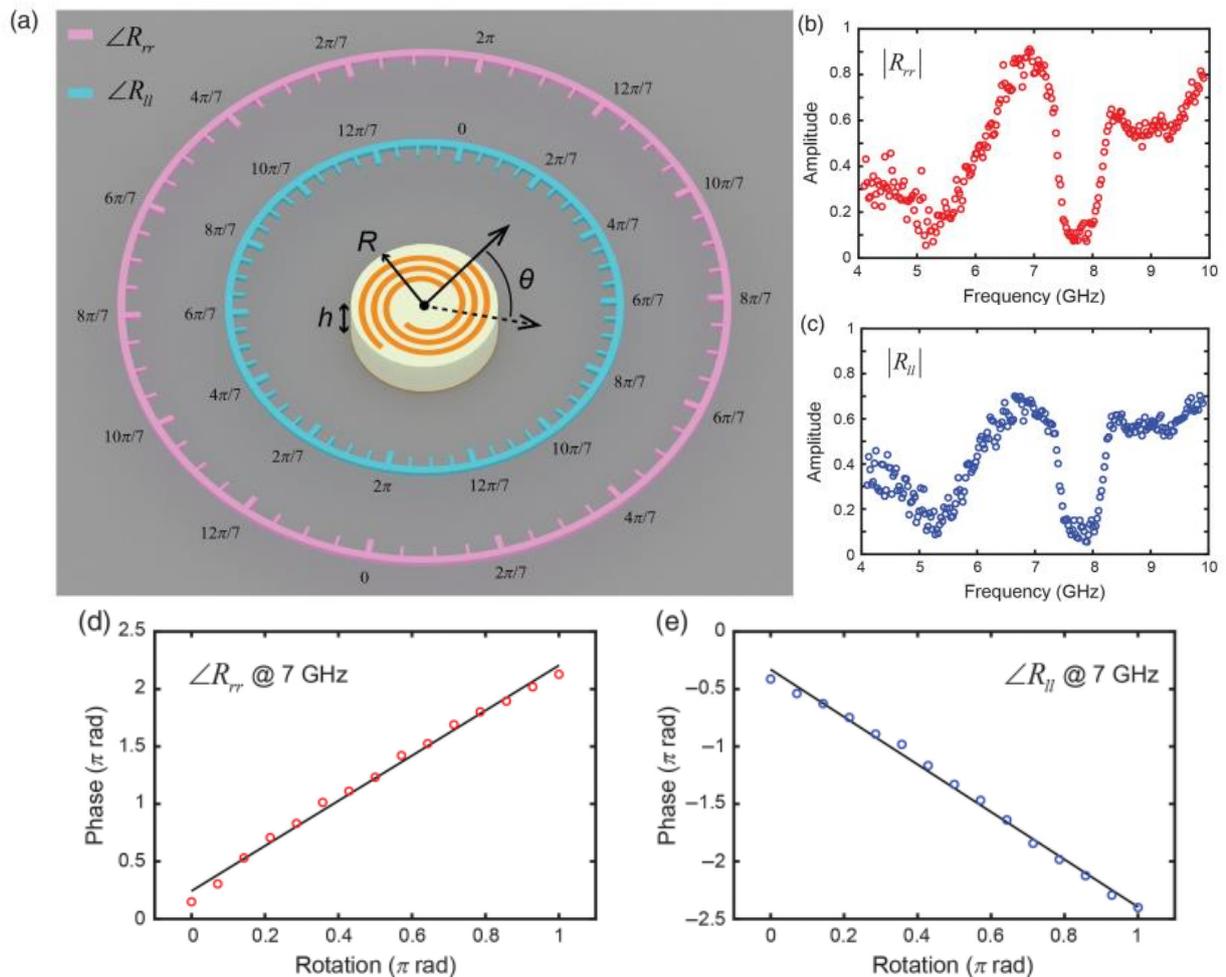


Figura 2.9: Respuesta de fase PB. (a) La porción superior del metaátomo de PB es un par de Espirales de Arquímedes con los mismos parámetros geométricos: radio interior (1,9 mm), radio exterior (4,3 mm), altura (0,035 mm), ancho (0,4 mm) y número de vueltas (dos vueltas). Las esferas rosa y azul representan esquemáticamente la resolución de control de fase PB y los gradientes de variación para la polarización circular de derechas (Rrr) y de izquierdas (Rll), respectivamente. b), c) Amplitudes medidas de Rrr y Rll, respectivamente. d), e) Fase de PB medida en respuesta de Rrr y Rll, respectivamente, frente a diferentes ángulos de rotación [14].

Esto es de suma utilidad, pues si somos capaces de diseñar una celda unidad con unas propiedades que se ajusten a nuestras necesidades de transmisión o reflexión, y que además tengamos la capacidad de rotar la estructura que conforma esa celda (o la celda completa en caso de que el metamaterial estuviera diseñado expresamente para ello con celdas circulares), podríamos obtener tantos elementos como quisiéramos, con la diferencia de fase que quisiéramos y por tanto, un metamaterial con una codificación de tantos bits como quisiéramos.

Este método es posible usarlo, como es evidente, para desarrollar estructuras de reflexión difusa o estructuras RIS.

2.4 Estructuras Conmutables

Uno de los mayores inconvenientes que tenemos a la hora de fabricar metamateriales y darles uso es que tras fabricarlo, no podemos modificar su utilidad, o en caso de poder, es muy laborioso hacerlo, ya que las celdas unidad tienen una posición fija una vez se elige el patrón de secuencias que tendrá la estructura.

Una comparación de este problema podría ser por ejemplo una fotografía, donde cada punto de color (lo que serían las celdas unidad) cumple con su función en el lugar que le corresponde, y si quisiéramos obtener otra fotografía (lo que sería otra funcionalidad), no nos valdría la foto que tenemos, sino que tendríamos que hacer otra nueva.

Sin embargo, en avance científico en este ámbito llevo al desarrollo de estructuras conmutables, también conocidas como reconfigurables, o reprogramables. Estas estructuras equivaldrían en el símil anterior a una televisión por ejemplo, donde los píxeles son capaces de cambiar de color, alterando la imagen de conjunto (lo que equivaldría a una nueva funcionalidad en el metamaterial).

La dificultad de esto radica en cómo se consigue que una celda unidad pueda cambiar entre varios elementos. Pues lo cierto es que hay varias opciones de hacer esto, una de las más comunes es la utilización de diodos PIN en la creación de las celdas [15].

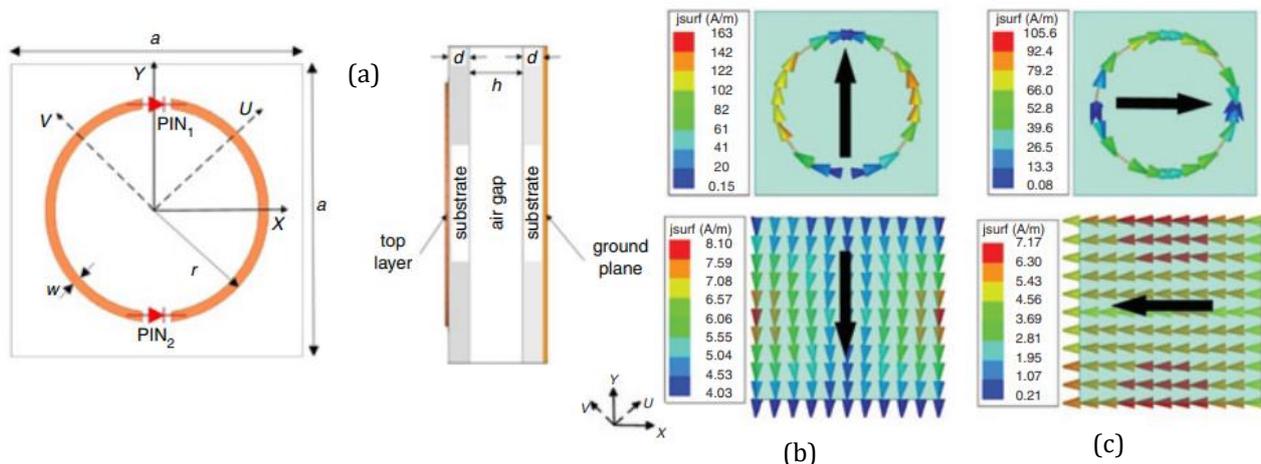


Figura 2.10: Geometría de una estructura metamaterial absorbente conmutable. a) Vista frontal y vista lateral. b) y c) Diagrama de corriente [15].

De esta forma, dependiendo de cómo polaricemos los diodos, podemos obtener un cortocircuito (directa), o un circuito abierto (inversa), modificando así la estructura interna de cada celda unidad según cómo la polaricemos y obteniendo de esta forma diferentes elementos con los que realizar la codificación de bits.

La Figura 2.10 es un ejemplo simple de cómo sería una estructura de este estilo.

Otra opción diferente sería la de las estructuras conmutables magnéticas [16], donde parte de la estructura es fija y la otra es desplazable magnéticamente, de forma que se puede alterar la forma de cada celda unidad generando el mismo efecto que en el caso anterior. Se puede ver un ejemplo en la Figura 2.11.

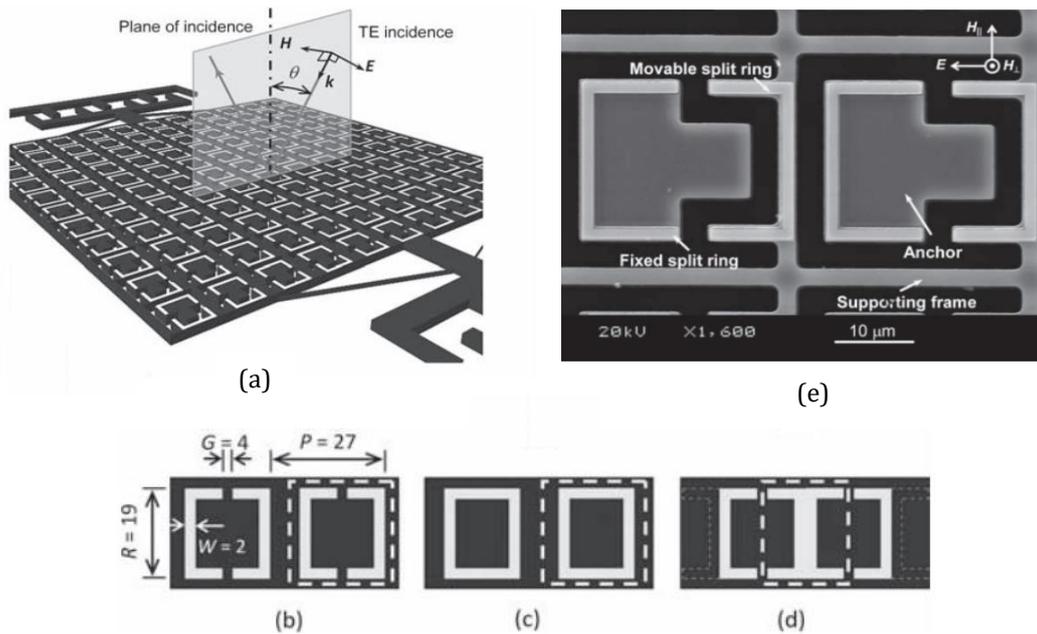


Figura 2.11: a) Vista general del metamaterial magnético conmutable. b) Cada celda unidad consiste en dos semi-anillos cuadrados separados por un espacio de los cuales uno es móvil y el otro está fijo. En el estado de anillo abierto, la celda unidad tiene la forma "[]". La celda unidad se puede cambiar a c) el estado de anillo cerrado con la forma rectangular "[]" y d) el estado de contacto posterior con la forma "I" transformando toda la división móvil de semi-anillos al mismo tiempo. En e) vemos como es la estructura móvil ampliada [16].

Por último cabe resaltar que se puede usar el método de cambio de fase Pancharatnam-Berry [14] para diseñar estructuras conmutables, únicamente es necesario diseñar la infraestructura que te permita girar cada una de las celdas unidad de forma independiente para modificar la respuesta en fase de esa celda. De esa forma podemos cambiar a placer el patrón de la metasuperficie y con ello su funcionalidad.

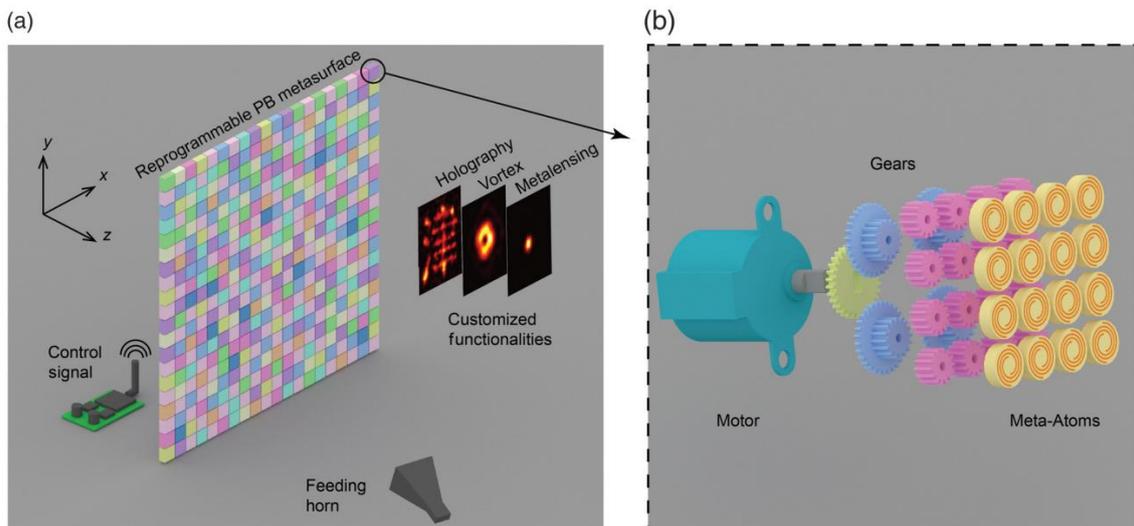


Figura 2.12: a) Vista general de la metasuperficie PB reprogramable. b) Mecanismo de giro independiente de cada celda unidad que permite controlar la fase PB de cada una, en el caso de este estudio [14] cada celda puede alternar entre 28 fases diferentes..

Este método es mucho más preciso que los anteriores ya que te facilita una codificación de bits muy alta, hasta el punto de que, en la Figura 2.12, el sistema de giro permite obtener hasta 28 fases diferentes, lo cual permite tener una calidad de control en la respuesta altísima, hasta el punto de que en la imagen se ve que pueden dar forma a caracteres chinos como reflexión.

2.4.1 Estructuras RIS

Una aplicación de estas estructuras reconfigurables la tenemos ante la problemática de que en numerables ocasiones se crean zonas donde una señal deseada no llega, lo que se conocen como ángulos muertos o puntos ciegos. Es algo bastante común por ejemplo con el wifi, en zonas de la casa donde no llega suficiente potencia de la señal, por las obstrucciones de algunos objetos, por lo que no se puede usar.

Este problema llevado a situaciones más relevantes, donde es primordial que las ondas lleguen a una zona determinada, sorteando los obstáculos del entorno, se puede ver solucionado gracias a las estructuras de reflexión inteligente reconfigurables (RIS) [13].

Su funcionamiento consiste en lo siguiente, usando el mismo principio que las estructuras de reflexión difusa para cambiar la dirección de reflexión de las ondas, lo que podemos conseguir es redirigir las ondas en la dirección exacta que queremos, de forma que los ángulos de reflexión que tomaría la onda en circunstancias normales se ven alterados por los que más nos interesen, enviando las ondas al ángulo muerto que sería el objetivo final.

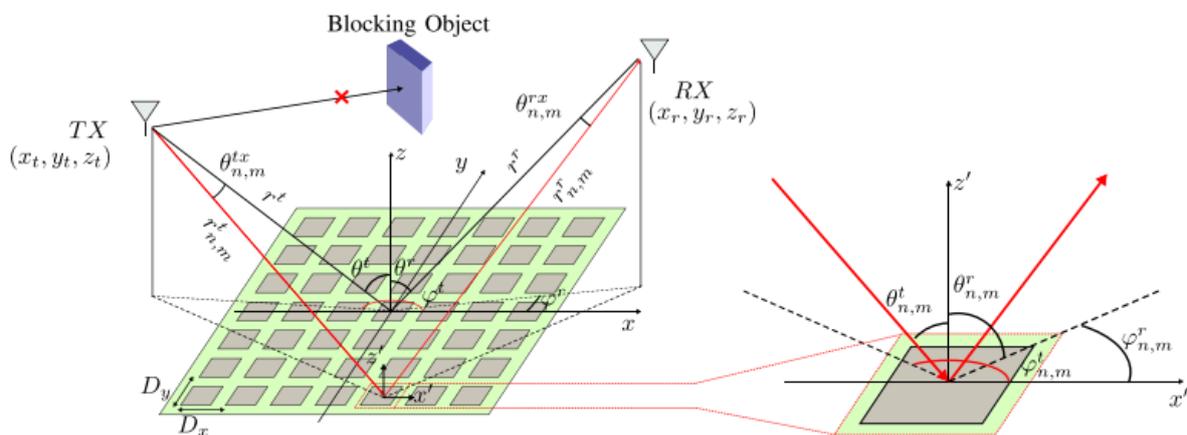


Figura 2.13: Visual de como la superficie inteligente de reflexión permite sortear el obstáculo y que las ondas alcancen la antena receptora [13].

Como se puede ver en la Figura 2.13 de forma más gráfica, el ángulo de incidencia difiere del ángulo de reflexión, y gracias a eso, se consigue alinear el ángulo de salida de la onda con la antena receptora, superando de esta forma el obstáculo.

Estas han sido algunas de las aplicaciones más comunes de los metamateriales, en las cuales se ha centrado mi proyecto

Capítulo 3

Metodología

3.1 Introducción

El objetivo primero de este proyecto, fue el de diseñar un metamaterial desde cero, con alguna característica interesante como por ejemplo la reflexión difusa que tanto se está investigando hoy en día con los avances militares de ocultación de radares. Como inicio, comenzamos por la familiarización con el interfaz del programa, mediante el modelado de numerosas estructuras de uso habitual en metamateriales como cruces, rosetas, gammadion, y algún diseño propio, pero aunque se dominó el proceso de modelado relativamente pronto, no disponía del conocimiento necesario sobre por qué los resultados eran los que eran y por ende, me encontraba ante la incapacidad de evolucionar las estructuras para obtener las características deseadas.

Por este motivo, el diseño de un metamaterial funcional con unas características específicas diseñado desde cero por alguien tan nuevo en el tema, se hizo muy complicado, y aunque podría haberse conseguido, habría requerido un tiempo bastante más amplio del disponible.

Es por ello, que se decidió que era mejor idea partir de una estructura ya diseñada, de forma que se pudieran fijar como objetivos el estudiar esta estructura, ver su funcionamiento, asimilar el papel de cada elemento en los resultados y en última instancia, ser capaz de modificarla mejorando sus características, tanto sus dimensiones como sus propiedades, en el mejor de los casos. El resultado ha sido bastante satisfactorio.

3.2 CST Studio Suite

El programa que se utilizará para llevar a cabo el modelado de estructuras, así como las simulaciones pertinentes será el CST STUDIO SUITE®, un software de simulación electromagnética 3D de alto rendimiento, perteneciente a la compañía francesa *Dassault Systemes Simulia SE*.

CST Studio Suite es utilizado por empresas líderes de tecnología e ingeniería en todo el mundo, para diseñar, identificar y optimizar dispositivos con prototipos virtuales, reduciendo el coste y el tiempo necesarios para desarrollar nuevos productos, gracias a disminuir el número de prototipos físicos necesarios y minimizar el número de fallos.

Este software contiene varias técnicas de simulación diferentes entre las que encontramos las opciones de resolver en el dominio de la frecuencia o en el dominio del tiempo.

La interfaz de usuario es bastante intuitiva, lo que permite que sea fácil de utilizar a grandes rasgos, sin embargo es una herramienta bastante compleja cuando profundizas en sus opciones por lo que sí es cierto que es más difícil conocer y manejar todas las posibilidades que incluye.

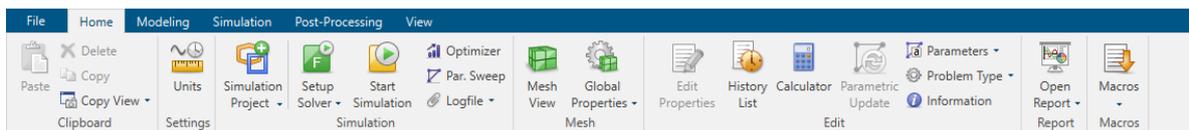


Figura 3.1: Barra de herramientas del software CST Studio Suite

En la Figura 3.1 se pueden ver las opciones de la barra de herramientas; incluye una pestaña 'File' para hacer diversas cosas con el archivo en uso; una pestaña 'Home' donde se sitúan las opciones más generales, entre las que podemos remarcar los botones de simulación, o el historial donde podemos ver y editar los pasos que hemos ido dando; luego tenemos la pestaña de 'Modeling' donde seremos capaces de dar forma a nuestras estructuras con la ayuda de numerosas herramientas; a continuación esta la pestaña 'Simulation' donde podemos modificar parámetros importantes para realizar las simulaciones de la forma que queramos; y por último las pestañas de 'Post-procesing' y 'View', donde podremos darle unos últimos retoques a nuestros resultados y analizarlos de la mejor manera.

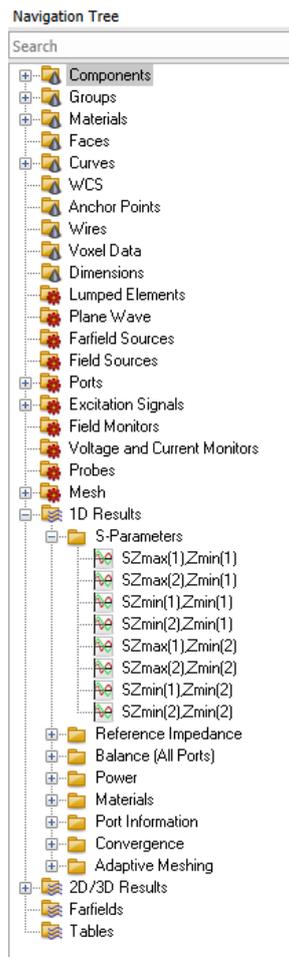


Figura 3.2: Árbol de navegación

Como se ve en la Figura 3.2, además de la barra de herramientas tenemos un árbol de navegación donde podemos encontrar información importante sobre nuestro proyecto, como las estructuras que hemos ido modelando, los puertos de simulación, monitores de campo, etc. y donde podemos ver también los resultados de nuestras simulaciones.

Otro aspecto interesante es el de la posibilidad de crear parámetros que posteriormente puedes usar a la hora de modelar una estructura, esto es de mucha utilidad porque si queremos cambiar algún valor de la estructura, como por ejemplo una longitud, no tenemos que remodelar esta estructura, ni editar en el 'history list' el valor original, sino que cambiando el valor de ese parámetro y pinchando en 'parametric update' se actualizará el valor del parámetro y se cambiará en todos los lugares donde haya sido usado.

El interfaz de usuario no tiene mucho más además de esto, simplemente la ventana de visualización en 3 dimensiones donde se trabaja y se puede ver la estructura modelada, y otra pequeña ventana donde se ven los archivos abiertos, si están simulando o no, y el progreso de simulación en caso de estar haciéndose.

El software emplea un método de simulación en el dominio de la frecuencia utilizando el método de elementos finitos (Finite Element Model). El simulador resuelve las ecuaciones de Maxwell en su forma fasorial frecuencia a frecuencia. El método FEM discretiza la estructura, dividiendo el volumen en una malla de tetraedros

Otro aspecto importante sobre el programa es cómo interpretar los resultados que vamos a ver; en primer lugar, no vamos a centrar en los parámetros de Scattering, que son los que nos van a dar la información sobre cómo se comportan las ondas electromagnéticas al interactuar con la superficie, concretamente nos centraremos en las ondas reflejadas y con la polarización opuesta a la que enviamos en primer lugar, ya que si trabajamos con polarización circular, las ondas que se reflejen, lo harán con la polarización opuesta.

Para darnos cuenta de qué estamos viendo en cada resultado debemos mirar la leyenda, que puede ser algo difícil de comprender si no tienes experiencia con este tipo de programas.



Figura 3.3: Ejemplo de leyenda que se encontrará en resultados de simulaciones.

En primer lugar debemos entender la disposición $SZ_{xxx}(A), Z_{yyy}(B)$. Al igual que en cualquier parámetro de Scattering, Z_{xxx} es el lugar donde se realiza la medición, y Z_{yyy} el lugar del que proviene la onda a medir, es decir, en el caso de la Figura 3.3 donde vemos $SZ_{min}(A), Z_{min}(B)$, estaríamos analizando la onda reflejada, puesto que se transmite desde Z_{min} y se está analizando Z_{min} también.

Una vez entendida esta parte solo queda entender qué significan los valores A y B, los cuales sirven para identificar la polarización de las ondas. Un valor de 1 puede significar una polarización lineal vertical (eje Y) o circular a izquierdas (según como se haya establecido antes de simular), y un valor de 2 puede significar una polarización lineal horizontal (eje X) o circular a derechas. De esta forma, en el ejemplo de la Figura 3.3, donde vemos $SZ_{min}(1), Z_{min}(2)$, estaríamos viendo cómo se explicó previamente, la polarización circular opuesta a la incidente.

3.3 Estructura Inicial

La estructura elegida como base para el proyecto fue sacada de uno de los artículos adjuntos [17] y se puede ver en la Figura 3.4. Se trata de una estructura de tres capas, en la capa más baja tenemos la lámina metálica característica de los metamateriales de reflexión, posteriormente hay una capa de dieléctrico sobre la cual descansa el anillo exterior; posteriormente tenemos otra capa de dieléctrico sobre la que se posiciona finalmente el anillo interior.

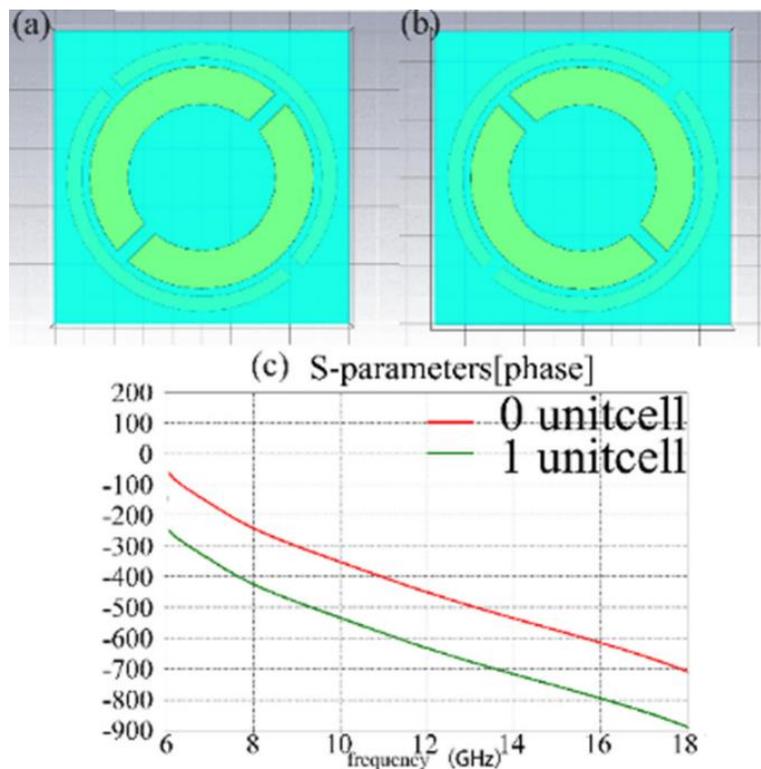


Figura 3.4: Estructura inicial; (a) primer elemento '0', (b) segundo elemento '1', (c) diferencia de fase entre los elementos de 180°.

Como se puede apreciar, es una estructura de codificación de 1 bit, y por ende tiene 2 tipos de celda unidad. Se puede ver también como en las imágenes, el anillo exterior está un poco menos opaco, haciendo referencia visual a que no está a la misma altura que el anillo interior, sino que está bajo la primera capa de dieléctrico, ya que la estructura es tri-capa.

Cabe mencionar que en esta estructura trabajaremos con polarización circular, y por extensión, con las demás estructuras derivadas también lo haremos.

3.4 Evolución de la Estructura

Una vez elegida la estructura inicial, lo primero que se hizo fue intentar modelarla desde cero en el programa CST Studio Suite, y una vez conseguido eso, debíamos comprobar si los resultados obtenidos eran los mismos o similares.

Posteriormente, se valoraron maneras de mejorar la estructura. La primera y quizás más obvia fue la codificación, pues es una estructura con la que se puede trabajar muy bien para alcanzar una codificación de bit más alta gracias al método de la fase geométrica o de Pancharatnam – Berry.

A continuación, lo siguiente que se valoró mejorar fue la cantidad de capas y el grosor del sustrato dieléctrico, pues la estructura inicial, al tener tres capas con dos sustratos, es más complicada de fabricar que una de dos capas y un único sustrato. Pero esto no queda solamente ahí, la intención de reducir la estructura a dos capas y reducir su grosor, no puede interferir de manera negativa en las propiedades a la estructura, de lo contrario sería contraproducente.

Es por ello, por lo que este paso se ha de llevar a cabo manteniendo la diferencia de fases y el ancho de banda de la estructura inicial, o mejorándolo. Este paso es el más complejo y extenso del proyecto, como se verá en los resultados.

Lo siguiente que se planteó fue estudiar la posibilidad de hacer la estructura conmutable (reprogramable o reconfigurable), cosa que depende mucho de la forma de la estructura en sí. En nuestro caso se valoró la posibilidad en la estructura original con diodos, puesto que a simple vista parecía viable.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Introducción

En este capítulo se recogen una serie de simulaciones electromagnéticas con CST que buscan ilustrar el proceso de mejora de diseño de la estructura inicial hasta conseguir una estructura compleja con mayores propiedades, aplicable a funciones detalladas en el Capítulo 2.

4.2 Estructura inicial

En este apartado del proyecto se presentarán los resultados que se han ido obteniendo a lo largo del desarrollo de las estructuras, así como las conclusiones que se han ido deduciendo. Como se mencionó previamente el primer paso fue intentar recrear la estructura inicial modelándola desde 0 en el software de CST.

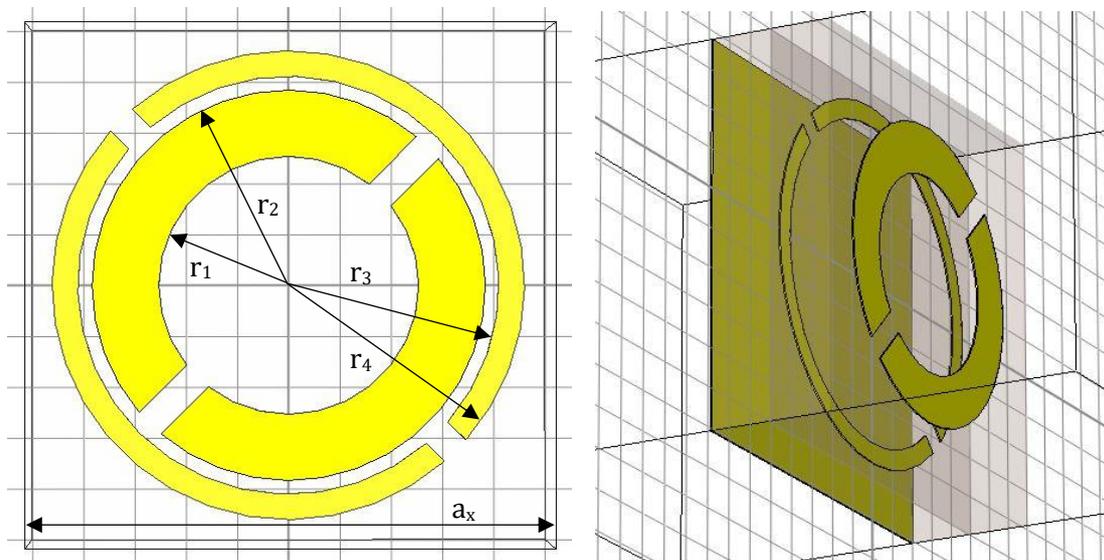


Figura 4.1: Representación de la estructura inicial modelada en CST. A la izquierda vista frontal, a la derecha vista diagonal para apreciar la profundidad de las 3 capas.

Cabe explicar que se ha modelado únicamente una estructura, para conseguir el otro elemento de la codificación simplemente tenemos que variar un parámetro, que fue nombrado como 'giro', introduciendo el ángulo concreto que equivale al segundo elemento.

De esta forma, el elemento mostrado en la Figura 4.1 podría identificarse como el elemento '0' con un valor de 'giro' de (-45°) o lo que es lo mismo, un giro de (135°) ; ya que es una estructura simétrica y al girar 180° se queda igual, mientras que el elemento '1' se

conseguiría con un valor del parámetro ‘giro’ de (45°) , y así conseguimos de forma exacta la estructura inicial con sus dos elementos de codificación.

En cuanto a las medidas de la estructura modelada son las siguientes; el ancho de la celda unidad es a_x , con un valor de 10 mm, al igual que el alto que es a_y , pues es una celda cuadrada, en cuanto a la profundidad el grueso de la metalización, tanto de la lámina como de los anillos, es 0.035 mm de cobre, y el de cada sustrato es de 1.524 mm (60 mils) de un material con una permitividad eléctrica de $\epsilon_r = 2.65$. En cuanto a los anillos, el anillo interior tiene unos radios tal que $r_1 = 2.5$ y $r_2 = 3.8$; mientras que el anillo exterior tiene unos radios de $r_3 = 4.1$ y $r_4 = 4.6$; todo ello en mm, además, los gap que tiene cada anillo tienen una dimensión de 0.6 mm.

Los resultados obtenidos de esta estructura tras realizar las simulaciones son los siguientes.

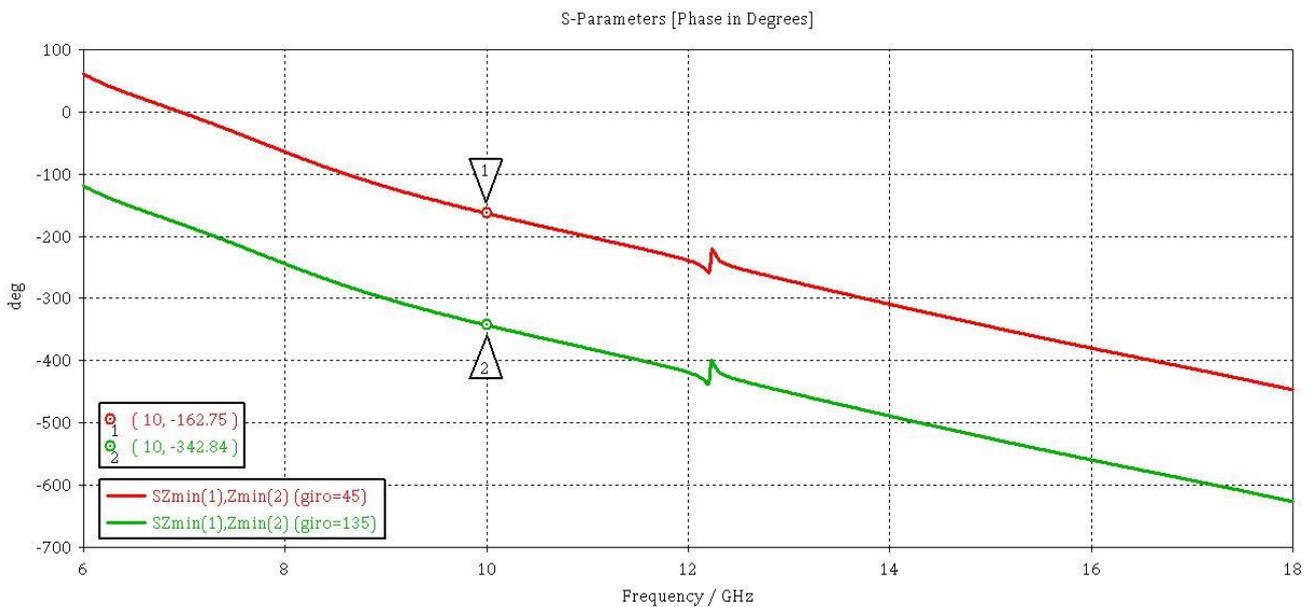


Figura 4.2: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 1 bit de la estructura inicial.

Como se puede apreciar en la Figura 4.2, ambos elementos (giro de 45° y de 135°) poseen una fase con una tendencia bastante constante, salvo por una pequeña variación que sufren ambos en torno a la frecuencia de 12.25 GHz. Obviando este pequeño suceso, como se puede calcular gracias a los valores que exhiben los marcadores en la frecuencia de 10 GHz, la diferencia de fase entre los elementos es de 180° casi exactamente, lo cual es igual a los resultados de la estructura en la que nos basamos. Si es cierto que no son los mismos valores de fase para cada frecuencia, pero eso carece de importancia ya que lo fundamental es la diferencia entre estas.

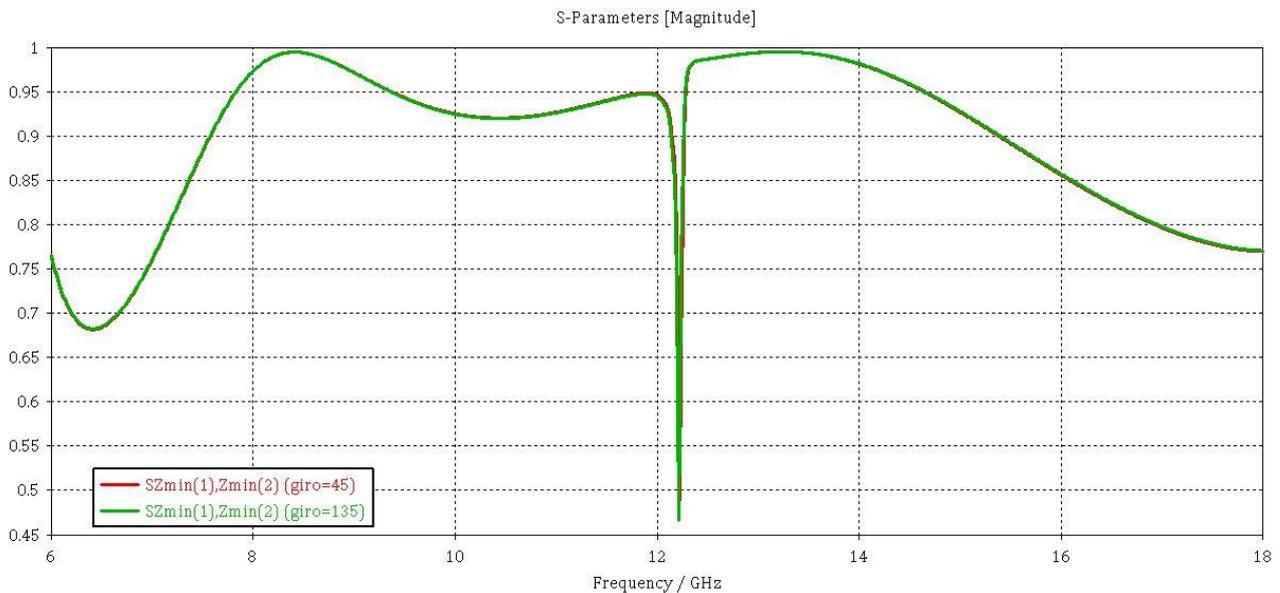


Figura 4.3: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 1 bit de la estructura inicial.

En cuanto al coeficiente de reflexión obtenido, el cual se muestra en la Figura 4.3, los autores de la estructura original aseguraban un ancho de banda desde los 7 a los 17 GHz aproximadamente, sin embargo no mostraban resultados que apoyaban ese ancho de banda. Si vemos el resultado obtenido por nuestra parte, podemos suponer que han puesto un límite de en torno a 0.8 como mínimo para calcular el ancho de banda, cosa que es probable ya que 0.7 ya es demasiado bajo, pues en términos de dB supondrían unas pérdidas de 3 dB, es decir, la mitad de la potencia en lineal ($0.7^2 = 0.49$).

También se ve una fluctuación en torno a los 12.25 GHz que supone un problema ya que en esa frecuencia se pierde mucha reflexión partiendo por el medio la banda. No se sabe si los autores también tenían este gap en la banda, es posible que se deba a alguna diferencia en el modelado de la estructura con la estructura original ya que hay parámetros que no estaban especificados en el artículo, como el grosor de sustrato, la distancia en profundidad entre las capas de los anillos, o la longitud de los gaps. Esos valores fueron elegidos en base a la disponibilidad de material en nuestros laboratorios sin conocer los valores de la estructura publicada.

Continuaremos con esta estructura intentando mejorar sus características y veremos si podemos eliminar esa fluctuación en el proceso.

En resumen, si obviamos el gap en la banda, y tomamos como límite un coeficiente de reflexión del 0.9, tendríamos en torno a 8 GHz, mientras que si tomamos como límite 0.8, tendríamos un ancho de banda de 10 GHz, llegando a 12 GHz de BW si tomáramos 0.7 como límite mínimo. El límite que deberíamos tomar puede variar en función de la utilidad que vaya a tener el metamaterial y la precisión que vaya a necesitar.

4.3 Evolución a estructura N-bit

Como primer paso para mejorar la estructura se eligió mejorar la codificación de bit, partiendo de una codificación de 1 único bit, se trató de llegar a otra codificación de al menos 2 bits.

Para ello se ha usado el método de la fase geométrica o de Pancharatnam-Berry, el cual nos permite obtener elementos nuevos con las fases requeridas, girando la estructura un ángulo determinado. Concretamente la estructura con la que trabajamos, tiene una simetría de espejo; en la que un giro de 180° deja la estructura igual que estaba, y por ello la relación entre el giro que apliquemos a la estructura (θ) y la variación que sufra en la fase (ϕ) es de $[\Delta\phi = 2\theta]$, donde una rotación de la estructura de θ produce una variación en la fase de 2θ .

En consecuencia, conseguimos una codificación de 2 bits, añadiendo dos elementos con un valor del parámetro de giro de (0°) y de (90°) respectivamente, a los elementos que ya teníamos con valores del parámetro de giro de (45°) y (135°) , y en la simulación obtenemos lo siguiente.

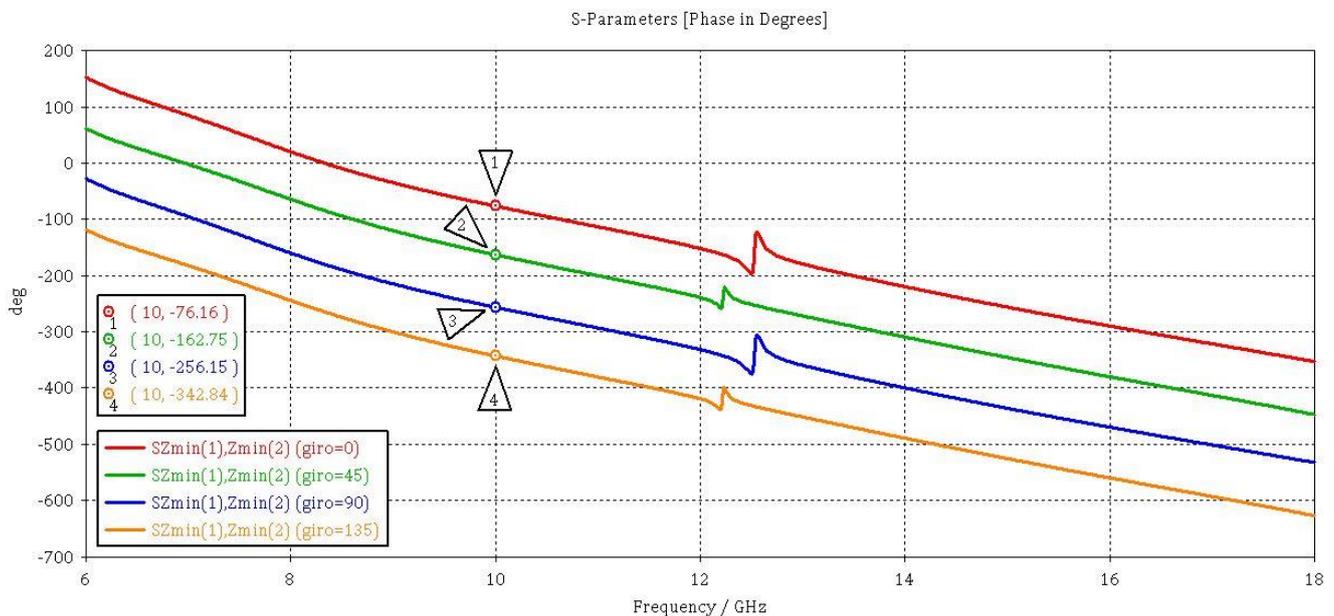


Figura 4.4: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura inicial.

En esta representación de la fase reflejada que se muestra en la Figura 4.4, podemos apreciar los resultados de los 4 elementos bien identificados en la leyenda según su ángulo de giro. En la imagen podemos ver como se mantiene una diferencia de fases constante de 90° aproximadamente entre cada elemento adyacente durante todo el ancho de banda, menos en las pequeñas fluctuaciones en torno a las frecuencias de 12,25 y 12,5 GHz.

Este resultado es muy satisfactorio ya que demuestra que podemos realizar una codificación de bits más alta incluso, pues el método de la fase geométrica funciona correctamente; lo único que debemos hacer es más elementos con los valores de giro adecuados. A pesar de ello, no vamos a buscar una codificación más alta porque no nos es realmente necesario, ya que nos estamos centrando en estructuras de reflexión difusa. Una aplicación para la que sí sería realmente interesante tener más celdas con diferentes fases reflejadas son las

estructuras RIS, ya que nos permitiría mejorar en alcanzar el ángulo de reflexión adecuado para cada situación.

En cuanto al coeficiente de reflexión, obtenemos este resultado.

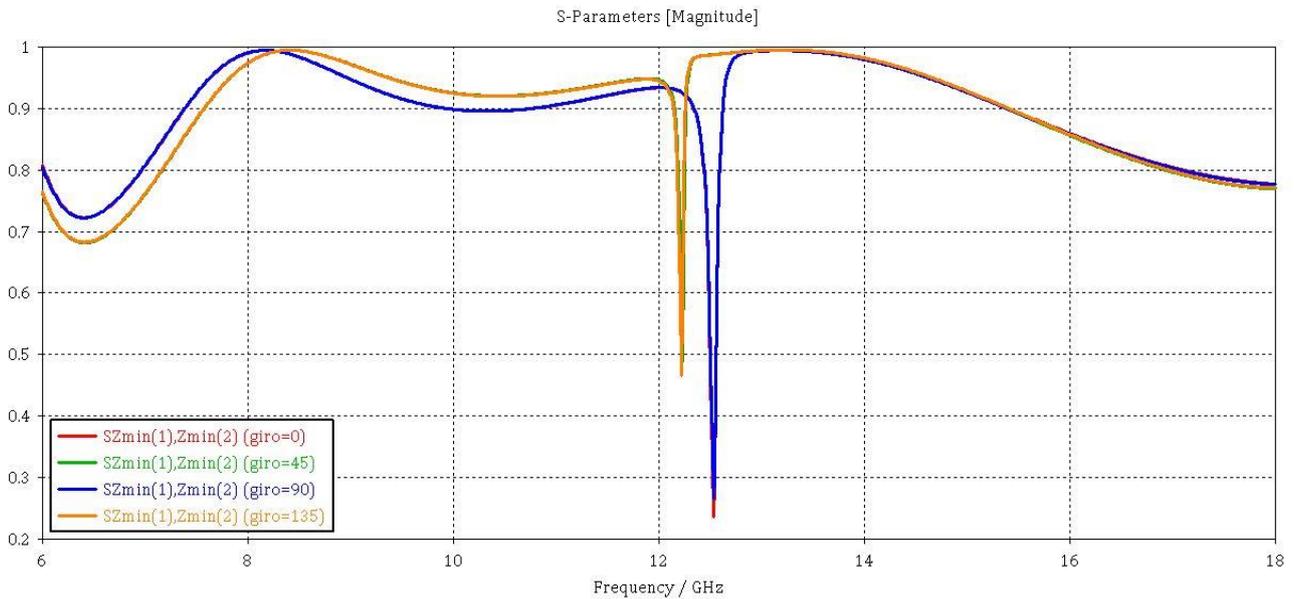


Figura 4.5: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura inicial.

En este caso, al fijarnos en la Figura 4.5, vemos como no todos los elementos tienen el mismo coeficiente sino que están solapados dos a dos; los de giro de 45° y 135° por un lado, y los de giro 0° y 90° por otro. Hemos llegado a la conclusión de que esto ocurre porque al girar la estructura circular formada por los anillos, sobre una celda unidad cuadrada, la distancia de los anillos de cada celda unidad a los de las celdas adyacentes varía por la posición de los gaps.

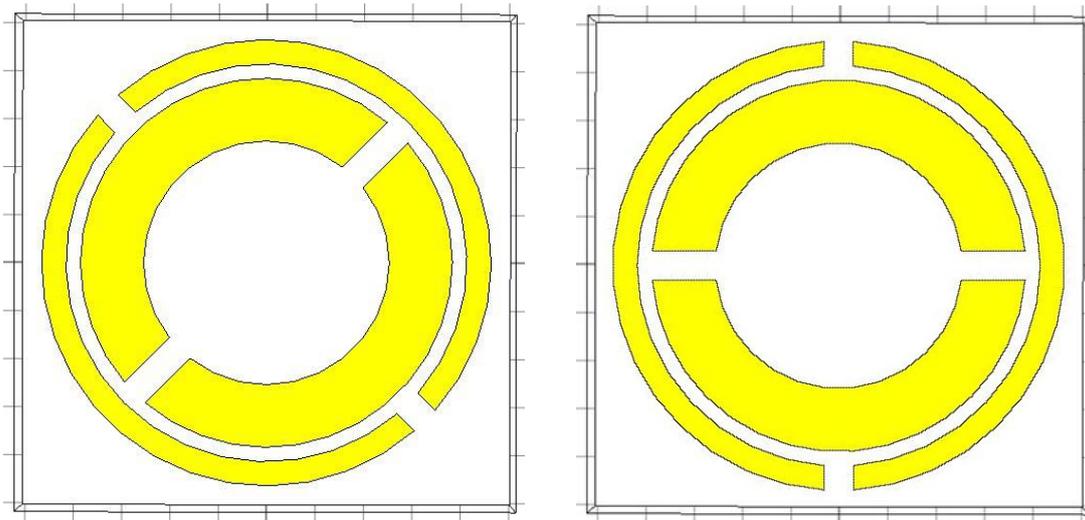


Figura 4.6: A la izquierda estructura vista de frente con un giro de 135° , lo que provoca los mismos resultados en coeficiente de reflexión que el giro de 45° . A la derecha la estructura vista de frente con un giro de 0° , lo que provoca los mismos resultados en coeficiente de reflexión que el giro de 90° .

En la Figura 4.6, vemos dos de los cuatro casos que generan los dos tipos de resultados diferentes en cuanto a módulo del coeficiente de reflexión, obviaremos los restantes porque

serían redundantes. En el caso de la izquierda, los gaps están apuntando a las esquinas del cuadrado, de forma que están lo más alejado posible de los anillos de otras celdas unidad. Sin embargo en el caso de la derecha, los gaps están apuntando hacia los lados de la celda unidad cuadrada, de forma que están lo más cerca posible de los anillos de celdas adyacentes, esto implica que modifican la interferencia entre las celdas dando lugar a estos cambios en los resultados del coeficiente de reflexión.

La importancia de esto tampoco es crítica pues la variación en el coeficiente de reflexión no es tan grande como para suponer un problema, simplemente varía un poco el resultado pero siempre se encuentran muy próximos entre sí, por ello, el resultado confirma que hemos podido mejorar la codificación de 1 bit a 2 bits sin más problema que una leve reducción de la banda, ya que tenemos un nuevo gap que sumado al anterior nos hace tener una zona mayor de la banda que no es utilizable.

4.4 Evolución a estructura Bicapa

Tras conseguir aumentar la codificación de 1 bit a 2 bits, el siguiente paso a realizar era reducir las dimensiones en la estructura, puesto que la estructura actual es tri capa, nuestro objetivo consistía el reducirla a dos capas. Para ello lo primero que hacemos es analizar la influencia que tiene cada anillo por separado en la reflexión de la estructura original, como se puede ver en la Figura 4.7.

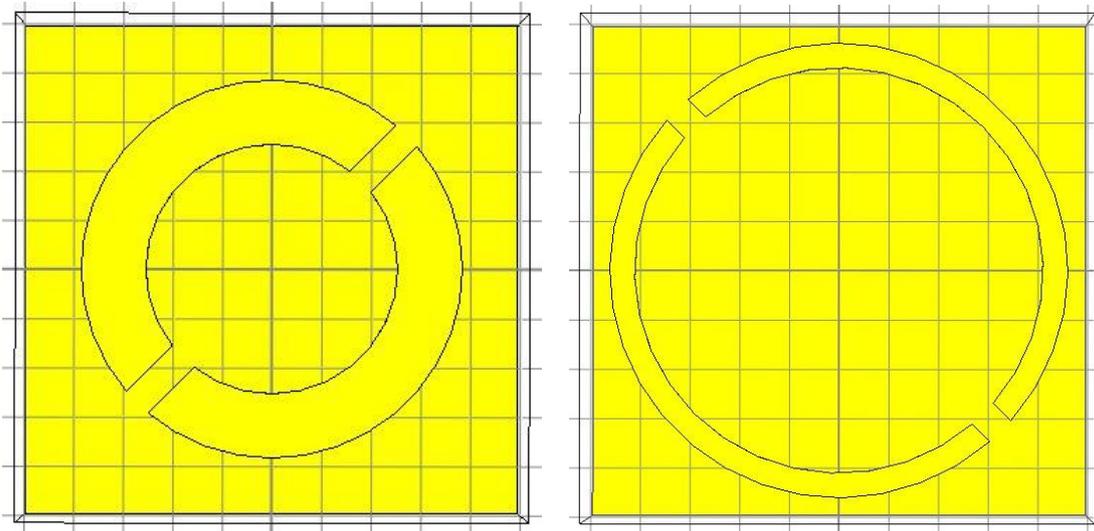


Figura 4.7: Vista frontal de cada anillo por separado, en la misma profundidad de capa que la estructura original. En la izquierda en anillo interior, en la derecha el anillo exterior.

Comenzamos por el anillo interior.

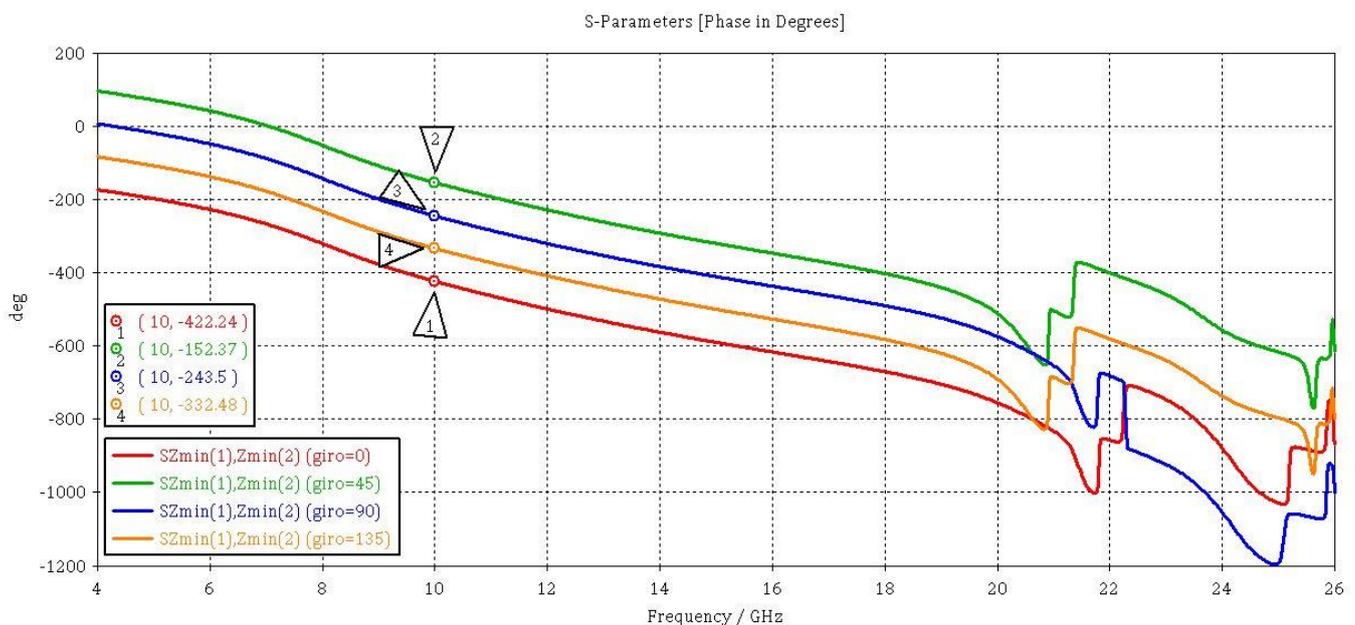


Figura 4.8: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits del anillo interior de la estructura inicial, para su estudio en aislamiento.

En los resultados de la Figura 4.8, vemos como en el ancho de banda original se mantiene la relación entre fases de los diferentes elementos de la codificación.

A continuación, el coeficiente de reflexión.

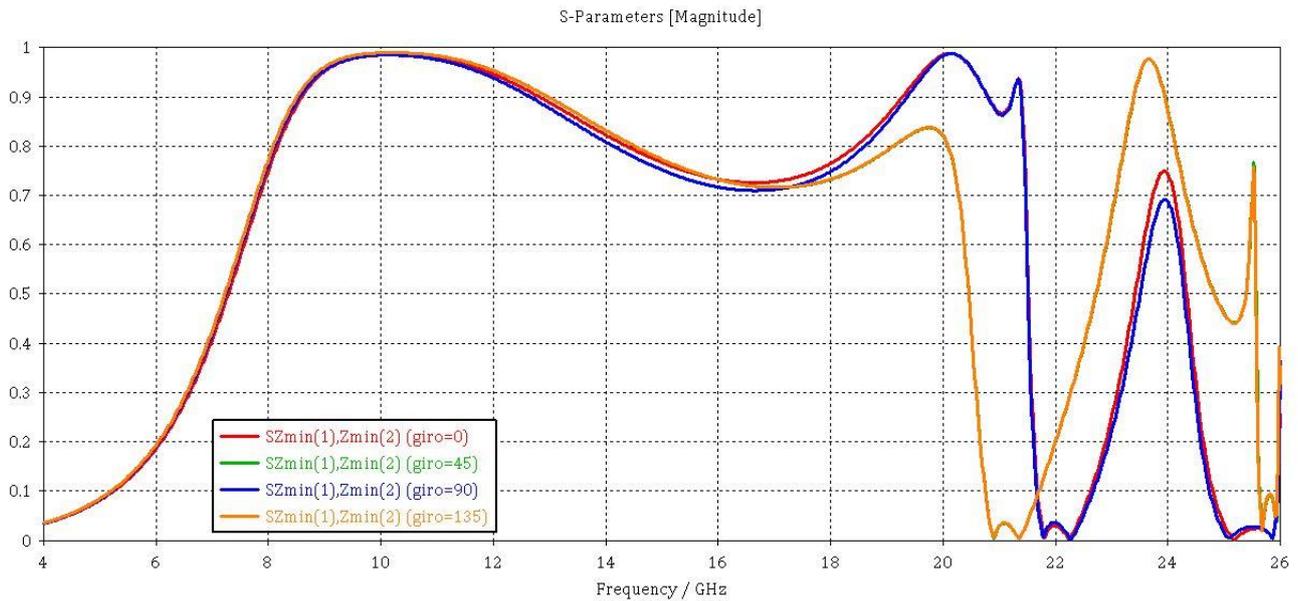


Figura 4.9: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits del anillo interior de la estructura inicial, para su estudio en aislamiento.

En la Figura 4.9, se puede apreciar como el ancho de banda resultante no se ve tan comprometido en relación al obtenido con la aplicación de los dos anillos en la estructura inicial. Pasamos de un BW de unos 10 GHz (desde los 6 a los 18 GHz) en la estructura original, tomando 0.7 como coeficiente mínimo, a unos 12 GHz también usando únicamente el anillo interior tomando el mismo límite mínimo (desde 8 a 20 GHz).

No es así cuando tomamos un coeficiente mínimo de 0.8, pues pasamos de un BW de 10 GHz (desde 7 a 17 GHz), a uno de 6 GHz (desde 8 a 14 GHz), donde ya se ve mejor la limitación del uso de un anillo individual, sin embargo, los resultados no son tan negativos, ya que a pesar de que la zona de máxima reflexión es menor, tiene una zona bastante amplia donde la reflexión tiene un módulo de 0.7 o más, y si pudiéramos mejorar esa zona alcanzando una mayor reflexión en esas frecuencias, podríamos evitar tener que utilizar dos anillos.

Esa es una de las conclusiones más importantes que se dedujeron de este estudio individual de los anillos.

Tras estudiar el anillo interior pasamos a analizar el exterior de la misma forma.

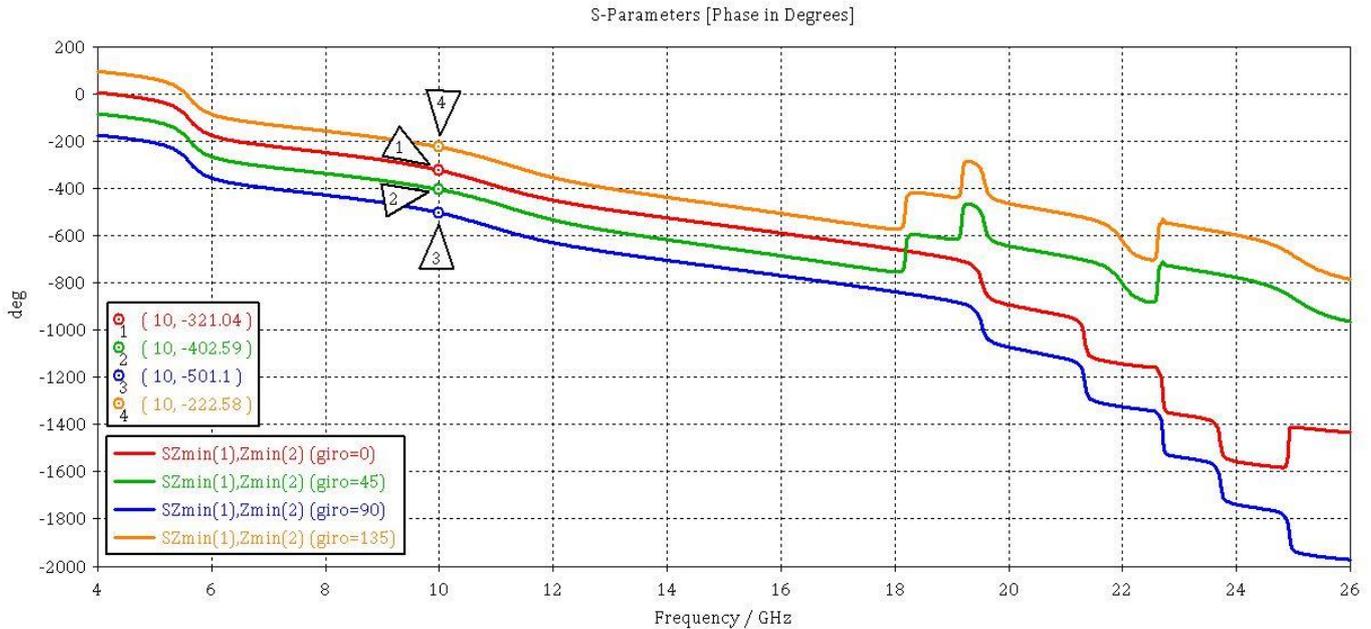


Figura 4.10: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits del anillo exterior de la estructura inicial, para su estudio en aislamiento.

Los resultados mostrados en la Figura 4.10, en este caso son un poco menos exactos que con el otro anillo, ya que las diferencias de fase ya no son 90° en toda la banda, sino que varían un poco hacia los 80° o los 100° , a pesar de ello, siguen estando en valores aceptables al fin y al cabo, por lo que no supone un problema realmente.

Por lo demás, el ancho de banda permanece estable de nuevo, por lo tanto veamos los resultados del coeficiente de reflexión.

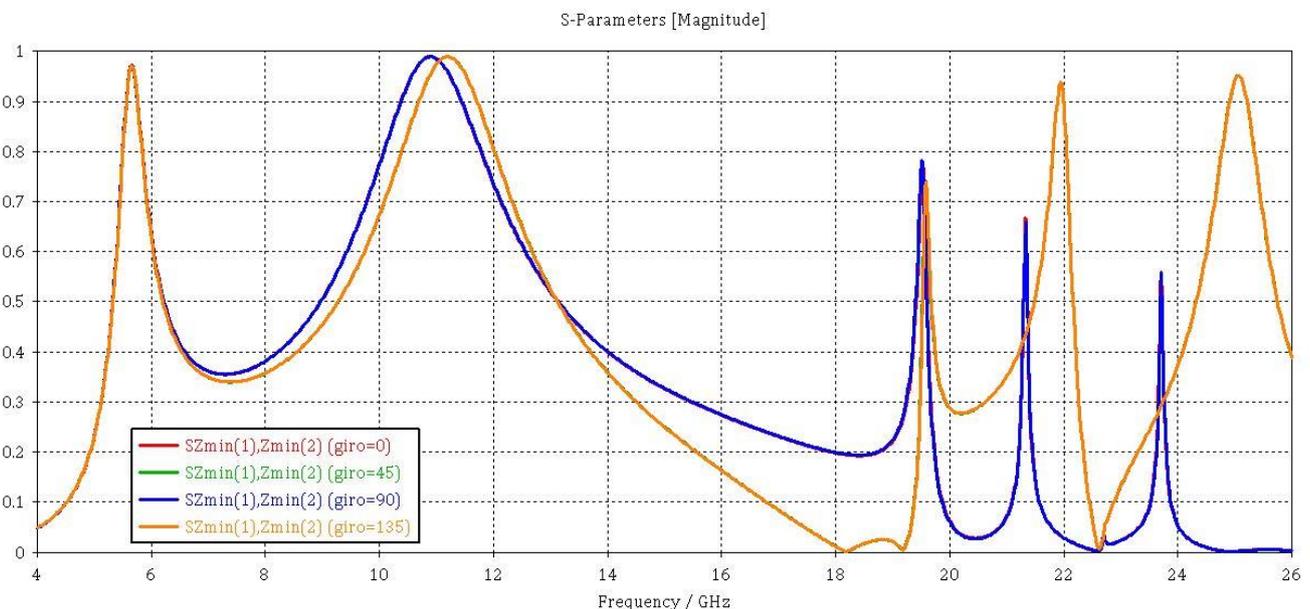


Figura 4.11: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits del anillo exterior de la estructura inicial, para su estudio en aislamiento.

En este caso, en la Figura 4.11 sí que vemos un ancho de banda bastante malo, se pueden identificar dos picos de reflexión muy alta en torno a las frecuencias de 5.6 GHz y 11 GHz

aproximadamente, entre los cuales hay una bajada muy radical del coeficiente de reflexión que anulan toda posibilidad de tener un buen ancho de banda entre picos.

Esto puede deberse a muchos factores, al ser un anillo muy estrecho de 0.5 mm de grosor, tiene poca superficie sobre la que la onda pueda interactuar, además el radio del anillo es muy alto por lo que está muy cerca de los anillos de otras celdas y puede interferir en sus respuestas, y también, este anillo está a otra distancia del plano conductor, es decir, está a la altura donde termina la primera capa de sustrato y por debajo de la segunda, lo que varía en gran medida la respuesta de la onda respecto a la que daría si estuviera posicionado sobre ambos sustratos.

Una vez hemos analizado el comportamiento de cada anillo por separado teniendo en cuenta las diferencias que hay entre ellos, y hemos visto un poco más el papel que desempeña cada uno en su tarea común, el siguiente paso fue hacer una prueba directa de como resultaría plasmar la misma estructura pero con los dos anillos en el mismo plano.

Como hemos visto que hay una gran diferencia entre el anillo que está situado sobre los dos sustratos y el que está únicamente sobre un sustrato y por detrás del otro, hicimos esta prueba con dos casos diferentes para ver la diferencia; un caso con los dos anillos sobre las dos capas de sustrato (que también puede entenderse como un sustrato el doble de grueso, pero se modeló como dos sustratos pegados por facilidad de procedimiento al añadir el anillo en el interior), y otro caso con los dos anillos sobre una única capa de sustrato, eliminando la otra. Además, ante la posibilidad de querer fabricar el producto final, debíamos reducirlo a una única capa de sustrato ya que no se disponía de sustratos de 3.048 mm, sino únicamente de 1.524 mm, por lo tanto, la reducción del sustrato a la mitad era otro objetivo añadido pero no íbamos a dar pasos tan grandes sino que nos acercaríamos a ello poco a poco.

En primer lugar veamos la estructura del primer caso que probamos en la Figura 4.12, donde utilizamos los dos sustratos sobre los que colocamos los dos anillos en el mismo plano.

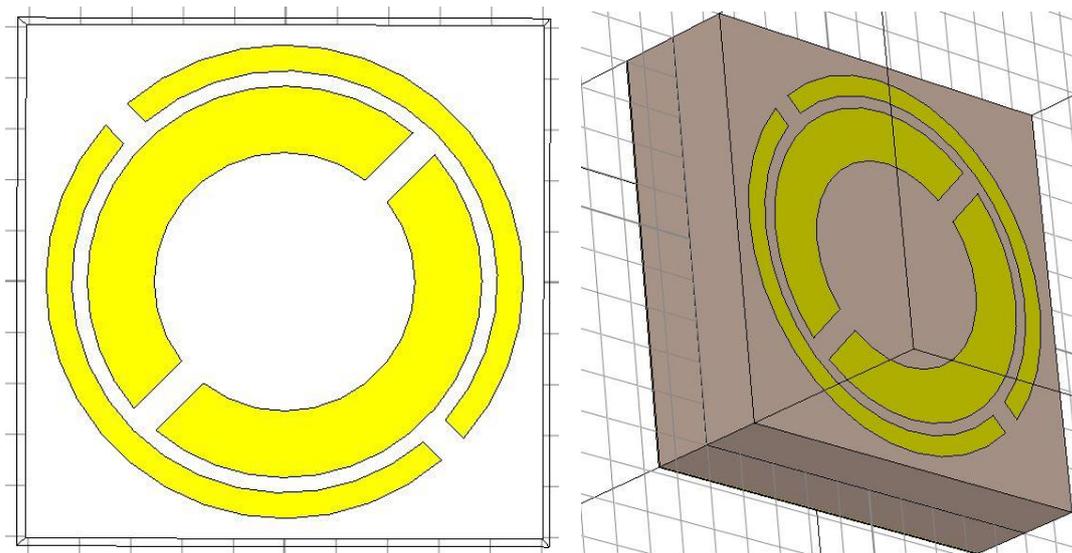


Figura 4.12: Prueba directa de los dos anillos en el mismo plano con doble sustrato. A la izquierda vista frontal, y a la derecha vista diagonal para apreciar la profundidad.

Comenzaremos viendo la fase.

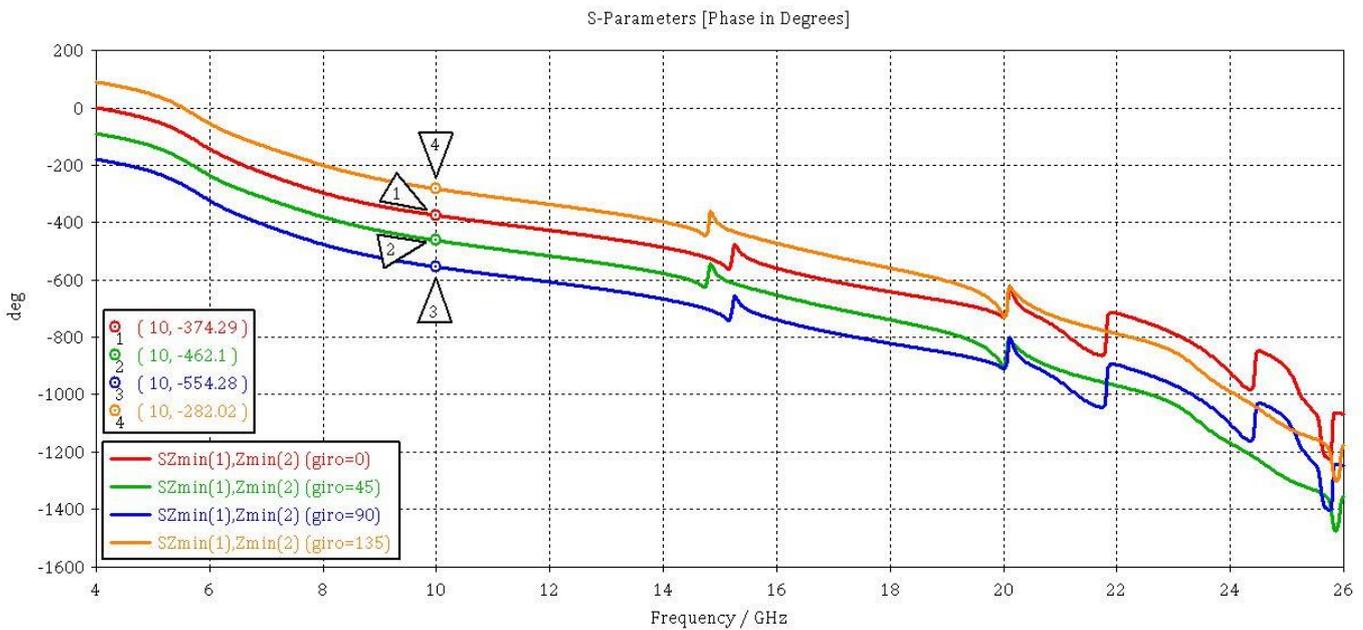


Figura 4.13: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de prueba con los dos anillos en el mismo plano y sustrato doble.

De nuevo, como ya nos llevamos encontrado en los últimos casos, en la Figura 4.13 la diferencia de fases es bastante constante en el ancho de banda original (6 – 18 GHz), salvo por unas pequeñas fluctuaciones en torno a 15 GHz. A partir de los 19 GHz se pierde totalmente la relación entre elementos.

En cuanto al coeficiente de reflexión obtenemos los siguientes resultados.

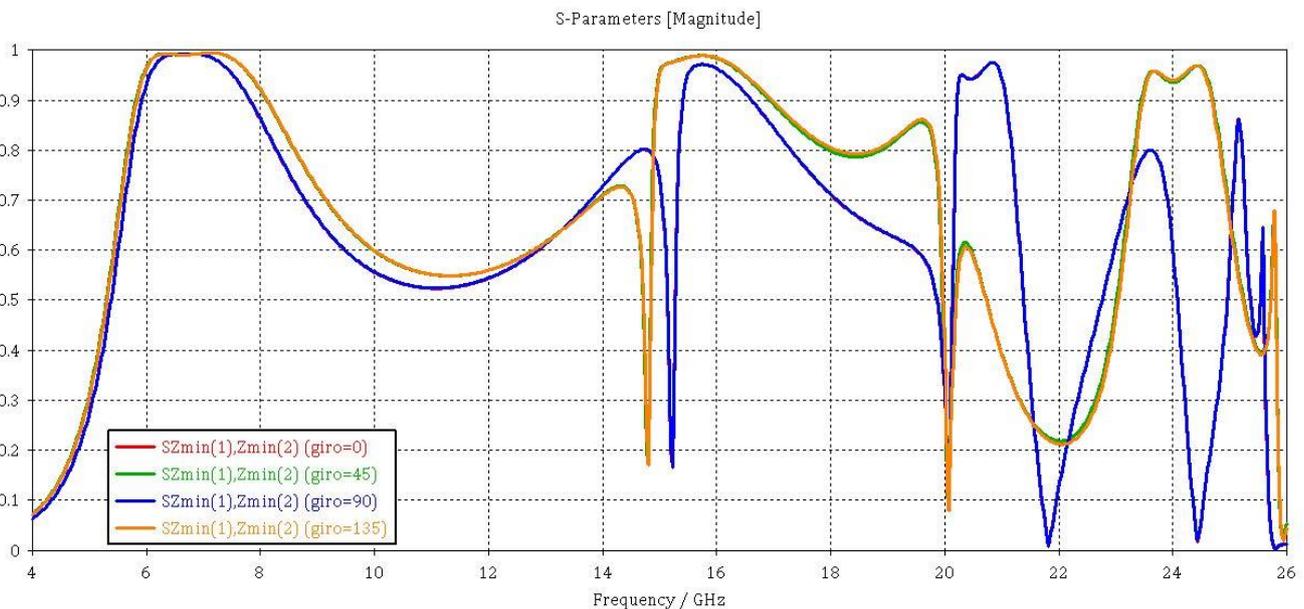


Figura 4.14: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de prueba con los dos anillos en el mismo plano y sustrato doble.

El resultado de la Figura 4.14, es bastante similar al obtenido de la Figura 4.9, donde se analizaba el coeficiente de reflexión únicamente del anillo interior sobre ambos sustratos,

sin embargo, este resultado de los anillos en el mismo plano parece una compresión en frecuencia del resultado del anillo interior aislado.

De alguna manera, la forma de la función es muy similar, pero la zona del ancho de banda se ha visto encogida y bajada en frecuencia, pasando de un ancho de banda desde 8 hasta 14 GHz; con un coeficiente mínimo de 0.8, a un ancho de banda desde 5.5 a 8.5 GHz. La reflexión se empieza a descontrolar en torno a los 18 GHz en los resultados de la Figura 4.9, mientras que en estos últimos lo hace en torno a los 14 GHz.

Con estos datos queda clara la similitud en la forma de la función, y la compresión y el desplazamiento que ha sufrido de alguna forma el coeficiente de reflexión al añadir el anillo exterior; en el mismo plano que el interior, a la estructura donde solo teníamos el anillo interior. De alguna forma los anillos interfieren entre sí, estropeando la reflexión enormemente.

Veamos ahora el segundo caso en la Figura 4.15, donde hacemos el mismo estudio pero esta vez con una única capa de sustrato.

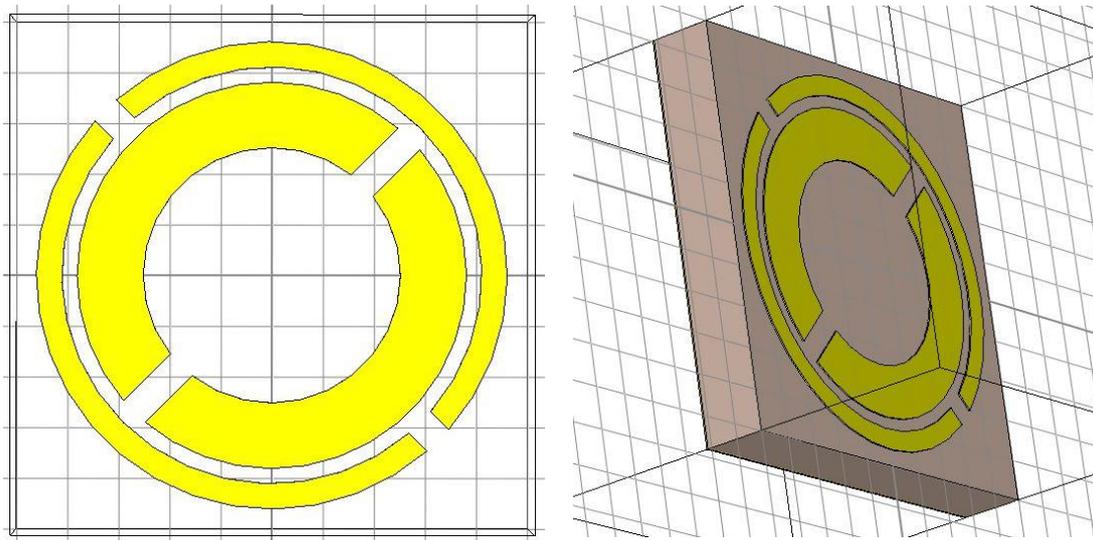


Figura 4.15: Prueba directa de los dos anillos en el mismo plano con sustrato simple. A la izquierda vista frontal de la estructura, y a la derecha vista diagonal para apreciar la profundidad.

Comenzaremos viendo los resultados de las fases.

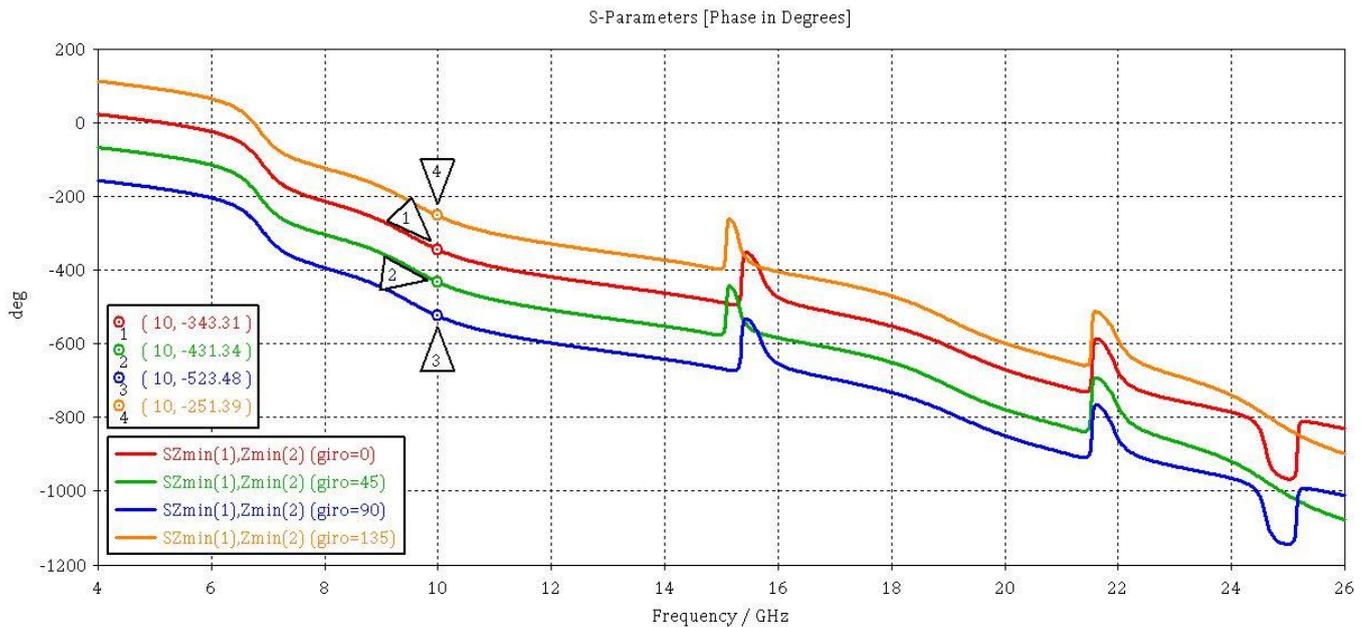


Figura 4.16: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de prueba con los dos anillos en el mismo plano y sustrato simple.

El resultado presentado en la Figura 4.16 es aceptable por los mismos motivos que en los casos anteriores, se mantiene la relación entre fases bastante bien menos en la frecuencia de 15 - 15.5 GHz donde sufre unas molestas fluctuaciones, por lo demás se mantiene correcto en todo el ancho de banda original. Y en cuanto al coeficiente de reflexión obtenemos lo siguiente.

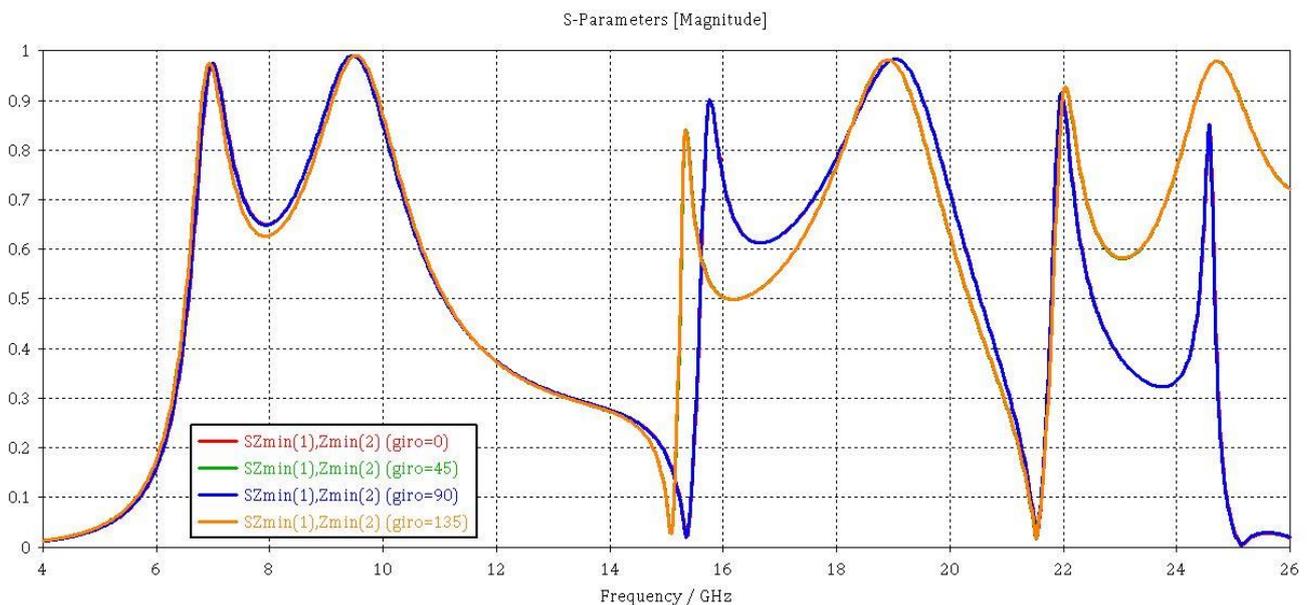


Figura 4.17: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de prueba con los dos anillos en el mismo plano y sustrato simple.

En este caso, el resultado mostrado en la Figura 4.17, es de nuevo muy parecido al resultado mostrado por la simulación de un único anillo, aunque esta vez no se trata del anillo interior sino del exterior, cuyo coeficiente de reflexión se analiza en la Figura 4.11

De nuevo ocurre lo mismo que en el caso anterior, la forma de la función resultante tiene una similitud alta, donde puede identificarse una compresión que hace su silueta más

estrecha pero aun así bastante reconocible, con sus dos picos de máxima reflexión con su valle donde el coeficiente baja radicalmente, la bajada en reflexión tras el segundo pico que desemboca en un descontrol del coeficiente a frecuencias mayores.

Esta similitud entre los casos donde únicamente estudiamos un anillo aislado, con los casos donde juntamos ambos anillos en el mismo plano; siendo ese plano el mismo donde estudiamos el anillo por separado (es decir, cuando estudiamos los dos anillos con los dos sustratos, el resultado se asemeja al del anillo interior que se encuentra en ese mismo plano, y cuando estudiamos los dos anillos con un único sustrato, se asemeja al resultado del anillo exterior que está en ese mismo plano de nuevo), nos lleva a pensar que el usar dos anillos en lugar de uno solo no es tan útil para una estructura bicapa como podíamos pensar en un principio, y también se percibe la importancia del grosor del sustrato en estos resultados.

De alguna forma al poner los anillos en el mismo plano, se pierde mucho ancho de banda en reflexión, en comparación con la estructura original. Y además, si lo comparamos también con los casos donde usamos un anillo nada más, también se pierde ancho de banda por esas contracciones en frecuencia. Esto lleva a pensar que de alguna forma los anillos al estar en el mismo plano, interfieren entre sí estropeando sus propiedades.

Para buscar una forma correcta de modificar la estructura mejorando esta reflexión, se realiza un estudio paramétrico de un anillo individual, para ver que valores de los parámetros es más útil modificar.

En este **estudio paramétrico** se ha estudiado qué implica variar el grosor del anillo, el radio del anillo para un mismo grosor, la anchura de la celda, el grosor del gap, y el grosor del sustrato.

En el primer caso estudiaremos el **cambio de grosor en el anillo**, mantendremos la celda original de 10 mm de lado, el gap original de 0.6 mm, y un sustrato fijo. En cuanto a los radios r_2 valdrá 3.8 mm, mientras que r_1 variará desde 2 mm hasta 3.5 mm. En estos casos no tiene sentido poner imagen de la estructura porque al haber solo un anillo y cambiar constantemente, una imagen aislada no aporta nada de información. Veamos como resulta.

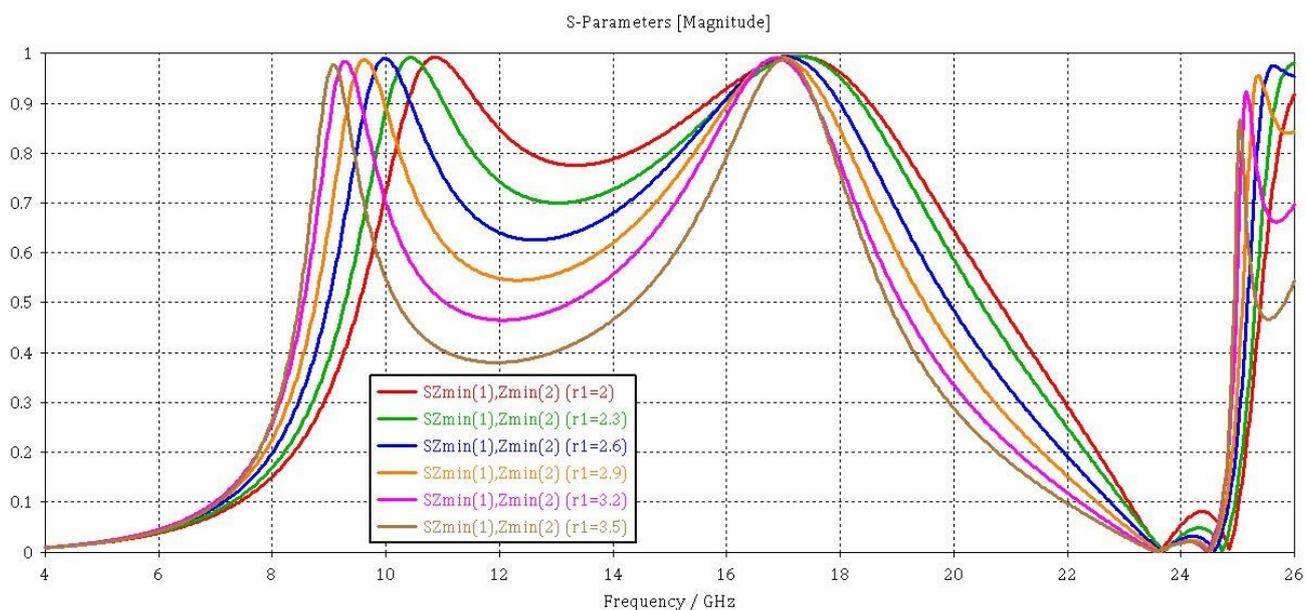


Figura 4.18: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de estudio paramétrico del valor de grosor del anillo.

En la Figura 4.18 podemos observar la evolución del coeficiente en función del grosor del anillo (r_2-r_1 ; con $r_2=3.8$ siempre), manteniendo el radio externo. Las conclusiones que sacamos son las siguientes, cuanto más grueso es el anillo; es decir, menor es r_1 , más juntos están los dos picos de máximo coeficiente de reflexión, pero menor pérdida de coeficiente hay entre ellos. Esto es conflictivo porque por una parte, si haces el anillo más ancho, ganas coeficiente de reflexión en el medio de la banda pero pierdes longitud de ancho de banda, y si por el contrario haces el anillo más estrecho, te ocurre lo contrario que tampoco es efectivo.

Continuemos al siguiente caso donde estudiaremos la **variación del radio del anillo** para un mismo grosor; de nuevo tendremos mismo gap y misma longitud de celda y sustrato, pero esta vez $r_2=(r_1+0.65)$ mm, mientras que $r_1=[1 \rightarrow 4]$ mm.

El resultado es el siguiente.

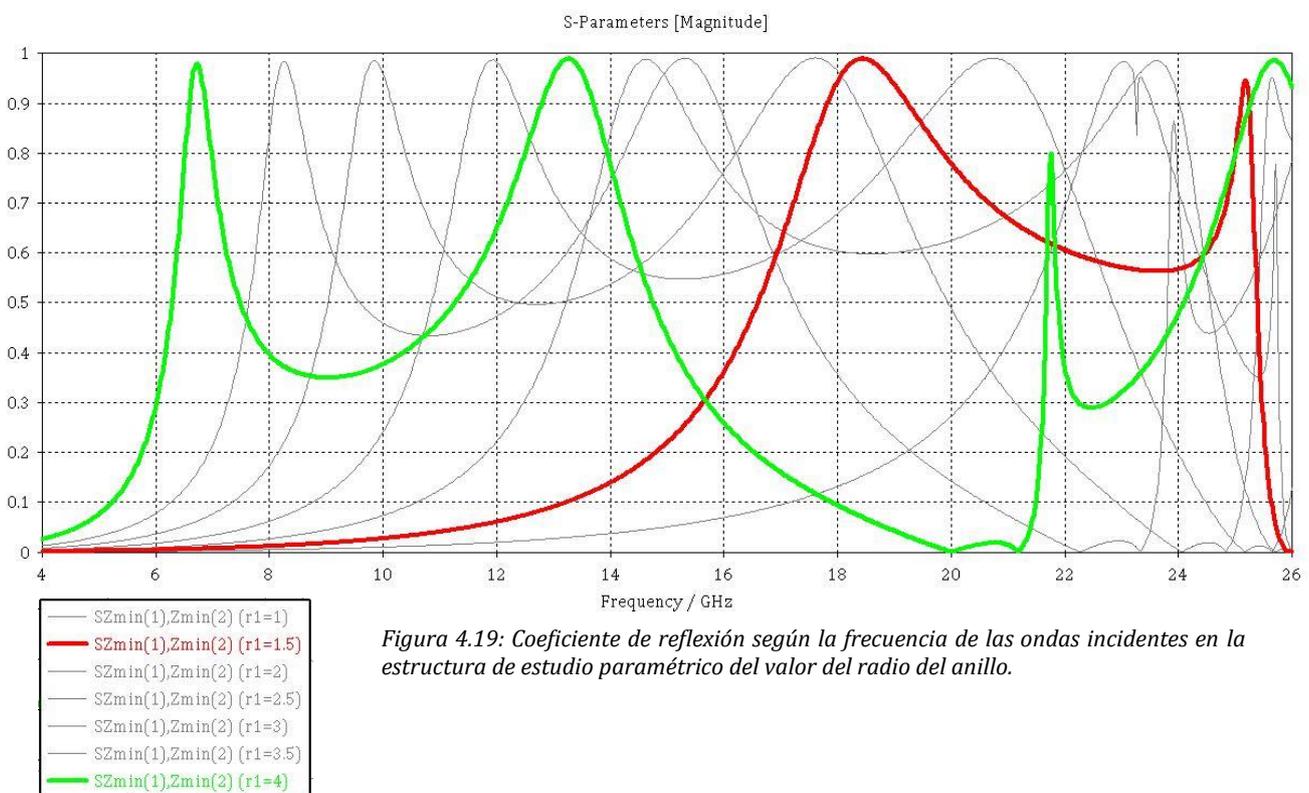


Figura 4.19: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de estudio paramétrico del valor del radio del anillo.

En este resultado de la Figura 4.19, he seleccionado dos de entre todas las funciones representadas, porque al ser tantas no se diferenciaban bien unas de otras, las que he dejado con color son las que manteniendo el mismo grosor del anillo, difieren en el radio siendo en un caso de 1.5 mm y en otro de 4 mm. No son los casos más alejados entre sí de los simulados pero si los que mejor se ven, ya que el caso de 1 mm se escapaba de la visual.

Lo que vemos aquí es, claramente, que el caso con el radio más grande está mucho más abajo en frecuencia y además posee un valle; como le hemos llamado en anteriores ocasiones, con un coeficiente de reflexión más bajo. En el caso contrario tenemos que el ejemplo del radio más pequeño está más alto en frecuencia, el valle está menos bajo en reflexión que el caso anterior y cabe resaltar que la silueta se va deformando pasado cierto punto. Se llega a una

frecuencia a partir de la cual el valle comienza a perder reflexión de nuevo y la silueta de los picos se comprime.

Este comportamiento tiene sentido si pensamos en que al mantener el grosor del anillo pero aumentando su radio, conseguimos un anillo con el mismo grosor pero con más área. Si relacionamos eso con la longitud de onda de las frecuencias donde tiene más reflexión, tiene sentido que a mayor área, más baje la banda en frecuencia.

Si tuviéramos que quedarnos con el mejor caso de entre los vistos en el barrido sería el de $r_1=2$ mm, que es el inmediatamente superior al caso en rojo, porque parece ser el límite donde la distancia entre picos es máxima y el valle lo más alto en reflexión, a partir de ese caso comienza la contracción y la pérdida de reflexión en el valle, que es lo que vemos en el caso rojo.

En el próximo caso del estudio paramétrico analizaremos el **cambio en la anchura de la celda unidad**, para lo cual mantendremos todos los demás parámetros fijos; sustrato, gap, $r_1=2.5$ mm y $r_2=3.8$ mm, mientras que el ancho de la celda variará desde 8 hasta 12 mm.

Obtenemos el siguiente resultado.

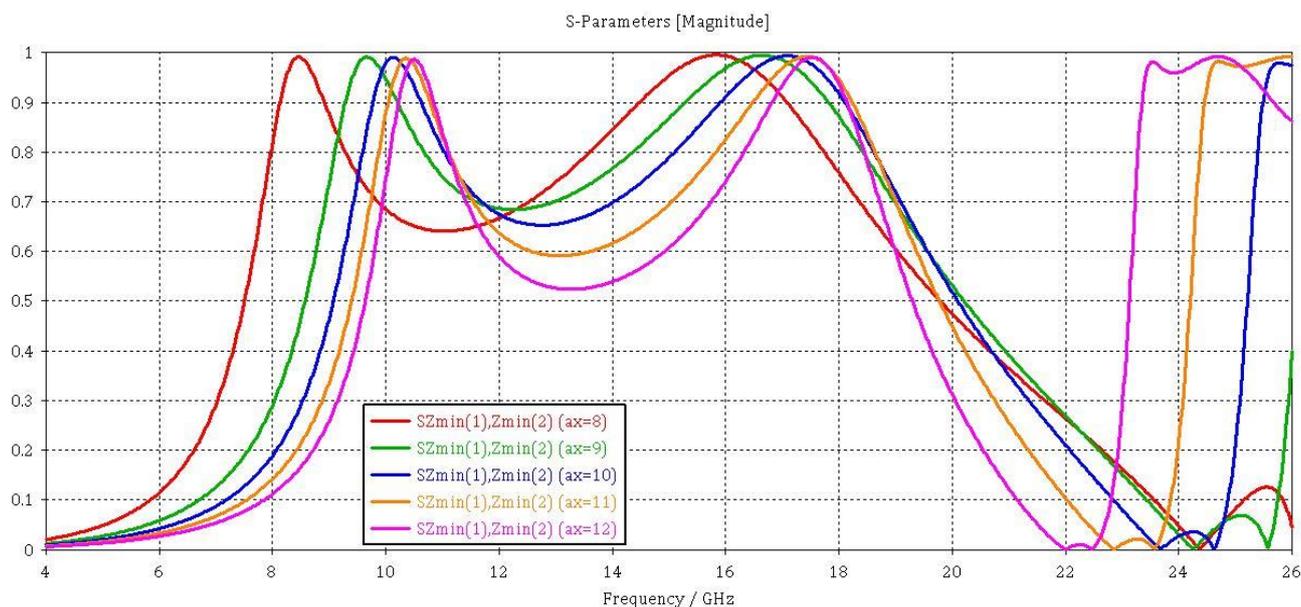


Figura 4.20: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de estudio paramétrico del valor de la anchura de la celda unidad.

Fijándonos en los resultados de la Figura 4.20, podemos darnos cuenta de cómo varían los resultados en función de las dimensiones de la celda unidad. Cuando tenemos una celda más grande la distancia entre picos es más pequeña; aunque no por mucha diferencia, y el valle tiene menos reflexión; esto si es más notable. Por otra parte cuando tenemos una celda más pequeña, los picos se van separando ligeramente mientras se desplazan hacia frecuencias más bajas, y el valle gana algo de reflexión también. Esto ocurre hasta cierto punto ya que por ejemplo al pasar de 9 mm de lado a 8 mm, la separación entre picos se hace algo más notable pero el valle comienza a perder reflexión de nuevo, algo similar al caso anterior donde estudiábamos las variaciones del radio del anillo.

Estas variaciones que ocurren al modificar la longitud de la celda, ocurren porque al hacer las celdas más grandes manteniendo el anillo igual, hace que la distancia entre los anillos de celdas adyacentes se aumente y por tanto pierdan la interacción entre ellos.

Si tuviéramos que quedarnos con algún valor de longitud de celda tras este análisis, me inclinaría por celdas más pequeñas, por lo explicado anteriormente.

En el siguiente caso haremos un estudio de la **variación de la longitud de los gaps del anillo**, donde mantendremos los valores de sustrato, longitud de celda en $a_x=a_y=10$, y de radios del anillo en $r_1=2.5$ mm y $r_2=3.8$ mm.

Este es el resultado.

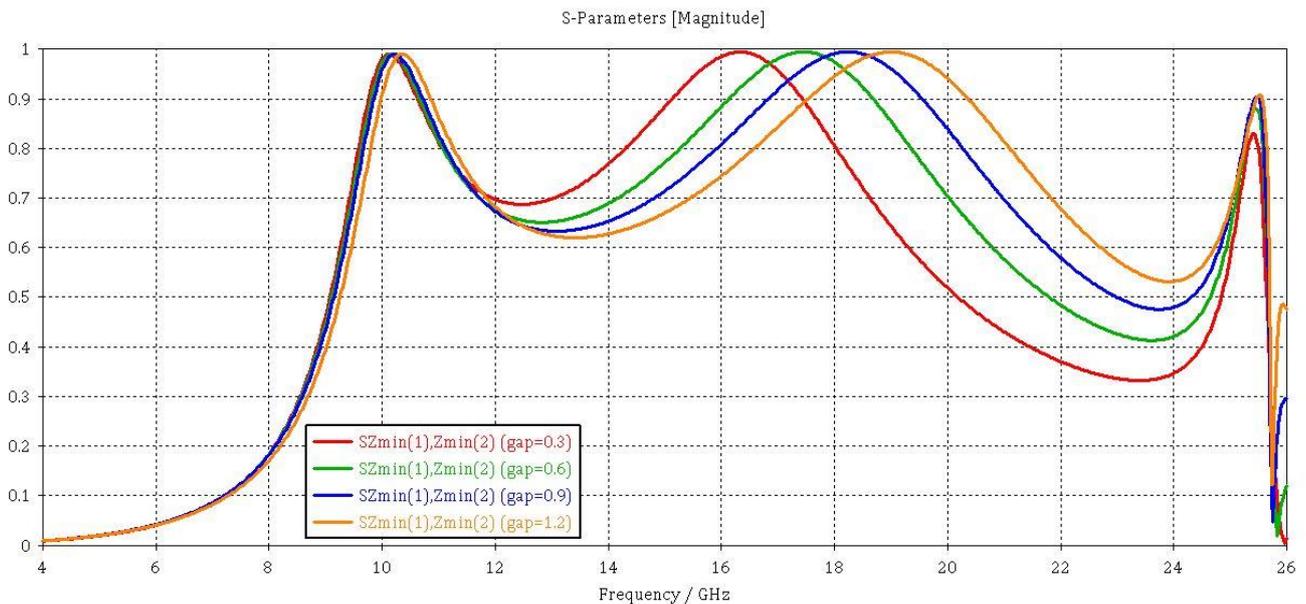


Figura 4.21: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de estudio paramétrico del valor de la longitud de los gaps del anillo.

Como se pueden apreciar los resultados reflejados en la Figura 4.21, son bastante claros, y totalmente beneficiosos, ya que nos dan una posibilidad de aumentar el ancho de banda sin perder apenas reflexión en la zona del valle.

Para explicar mejor esto fijémonos en la imagen, donde con un gap del 0.6; por ejemplo, ya que es el valor que llevamos usando desde el principio, tenemos un determinado ancho de banda y un determinado coeficiente de reflexión en el valle. Pues si doblamos ese gap, conseguimos aumentar casi 2 GHz el ancho de banda a costa de perder unas centésimas de coeficiente de reflexión, y que al parecer, cada vez que hacemos el gap más grande se pierde menos reflexión.

Evidentemente de aquí sacamos la idea de que nos interesa poner un gap grande en nuestras estructuras.

Para finalizar con el estudio paramétrico analizaremos el **cambio en el grosor del sustrato**, donde los demás parámetros se mantendrán estables; gap, longitud de celda, y mismos radios de los anteriores casos.

Veamos cómo influye este parámetro.

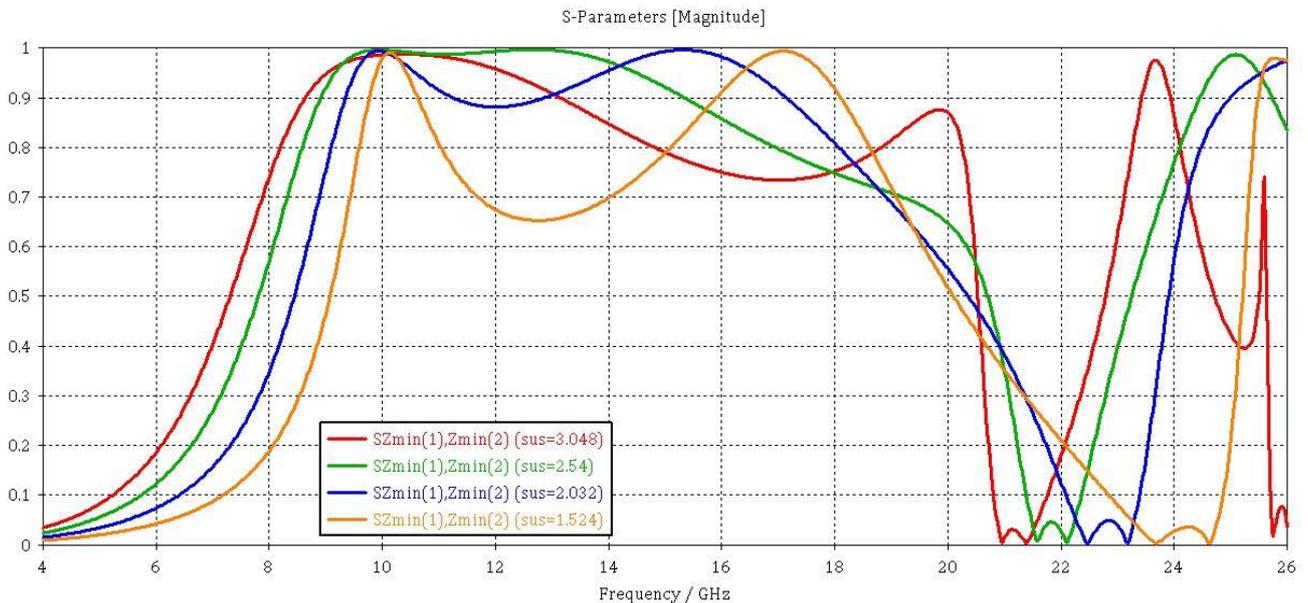


Figura 4.22: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de estudio paramétrico del valor de la grosor del sustrato.

Como se puede ver, el valor del grosor del sustrato varía desde los 120 mils (3.048 mm) que es el valor con el que hemos trabajado desde el principio, a los 60 mils (1.524 mm) que es el valor al que queremos reducir el sustrato por motivos de fabricación.

Es bastante visible en la Figura 4.22, que a medida que reducimos el grosor del sustrato, se van formando esos dos picos que inicialmente están juntos, y se forma ese valle que estropea el resultado del coeficiente de reflexión.

Esto es algo que ya se había podido suponer por lo ocurrido en las Figuras 4.14 y 4.17; donde únicamente cambiando el sustrato ocurría un suceso similar.

De momento nos centraremos en conseguir una estructura bicapa funcional, para lo cual usaremos un sustrato de 120 mils, posteriormente trataremos de modificar la estructura para reducirla a 60 mils.

Algo a tener en cuenta es que en la estructura original, de 3 capas, la distancia entre los anillos era mayor debido a que estaban posicionados en diferentes planos. Es posible que ese sea el motivo por el cual la estructura es tricapa, para obtener las propiedades de la suma de los dos anillos pero sin aproximarlos demasiado como para que se interfieran entre sí.

Teniendo este planteamiento de interferencia entre los dos anillos, nos limita mucho los parámetros que podemos modificar en base a los resultados del estudio paramétrico. Por ejemplo, si queremos separar los anillos, debemos hacer la celda más grande, o los anillos más estrechos, o con un radio lo más alejado posible del otro anillo; cosa que va en contra de las conclusiones sacadas del estudio paramétrico, por lo tanto, para mejorar la estructura se han realizado múltiples intentos haciendo pequeñas variaciones intentando encontrar el equilibrio entre los resultados del estudio paramétrico y la interferencia entre los dos anillos.

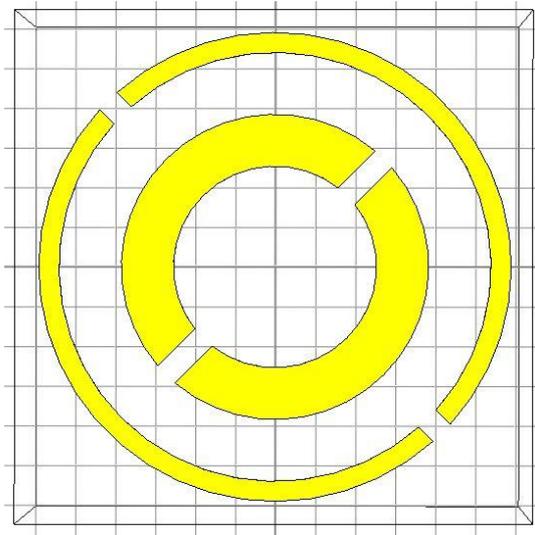


Figura 4.23: Vista frontal de la estructura de la segunda prueba intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.

Comenzaremos con el caso en la Figura 4.23, donde se han puesto los valores originales de los radios del anillo interior, mientras que se han ampliado los del anillo exterior para mantener esa distancia entre ellos; $r_1=2.5$ mm, $r_2=3.8$ mm, $r_3=5.35$ mm y $r_4=5.85$ mm, para ello he tenido que aumentar el tamaño de la celda unidad a $a_x=a_y=12.5$ mm.

Los resultados se pueden ver a continuación.

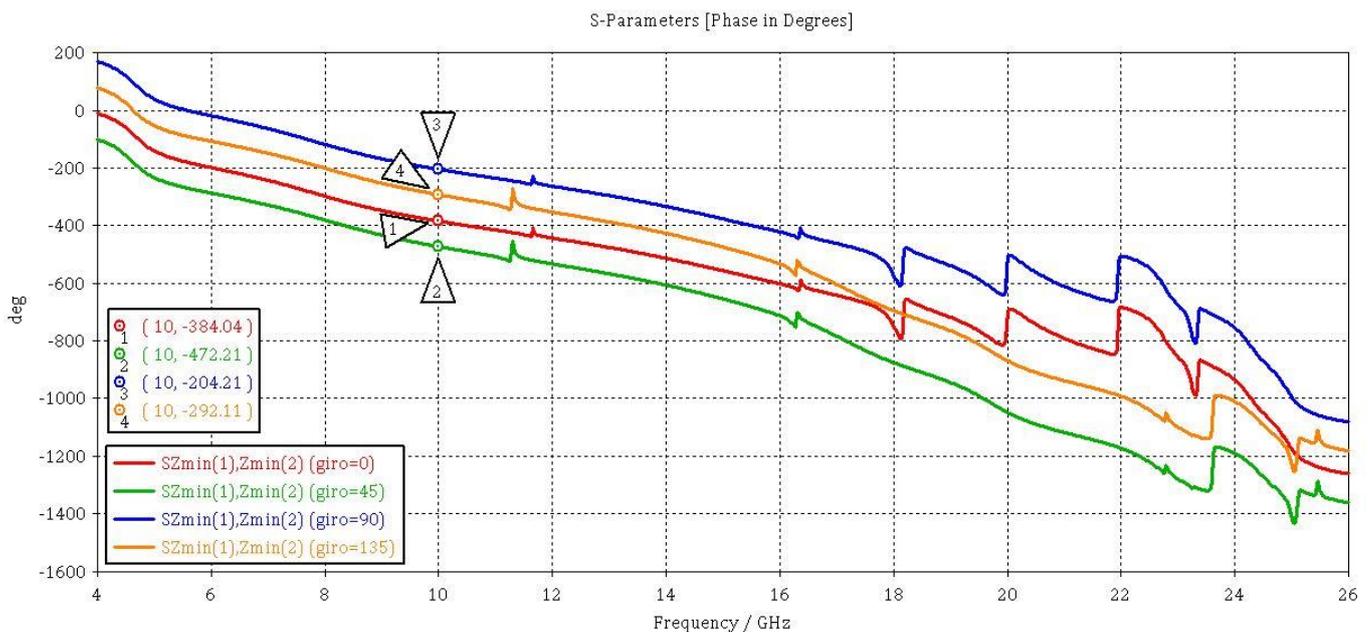


Figura 4.24: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de la segunda prueba con los dos anillos en el mismo plano.

Se puede apreciar en la Figura 4.24 como se mantiene la relación entre fases de forma más o menos constante hasta los 15 GHz aproximadamente, a partir de esa frecuencia de descontrola la relación, por lo cual el ancho de banda se verá limitado.

En cuanto al coeficiente de reflexión.

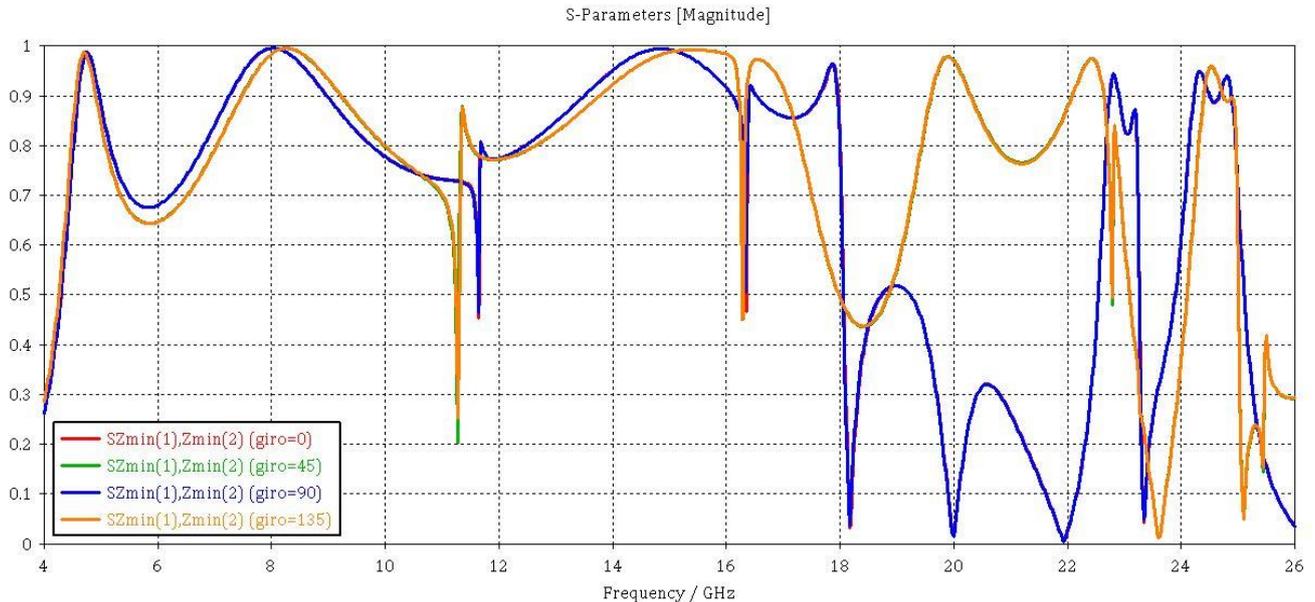


Figura 4.25: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de la segunda prueba con los dos anillos en el mismo plano.

Los resultados de la Figura 4.25 obtenidos en esta prueba no son nada satisfactorios, no solo no se ha conseguido mejorar el coeficiente de reflexión de la zona central de la banda, sino que se ha contraído la banda, reduciendo el límite superior de 18 GHz a 16 GHz, y también se ha empeorado en reflexión en el valle entre picos al principio de la banda. Como consecuencia de este resultado, podemos deducir que hacer más grande la celda para hacer el anillo exterior más grande en radios y así separarlos no es el camino correcto.

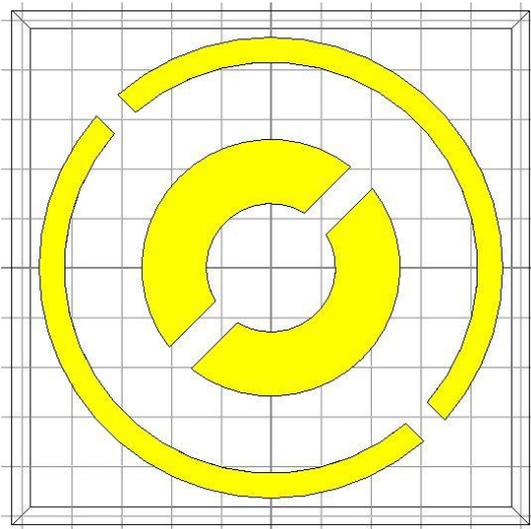


Figura 4.26: Vista frontal de la estructura de la tercera prueba intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.

En el siguiente intento, en la Figura 4.26 probaremos a reducir los radios del anillo interior manteniendo su grosor, y manteniendo los valores originales del anillo exterior y la celda;

$r_1=1.25$ mm, $r_2=2.55$ mm, $r_3=4.1$ mm, $r_4=4.6$ mm, y $a_x=a_y=10$ mm.

Veamos como resulta esta variación

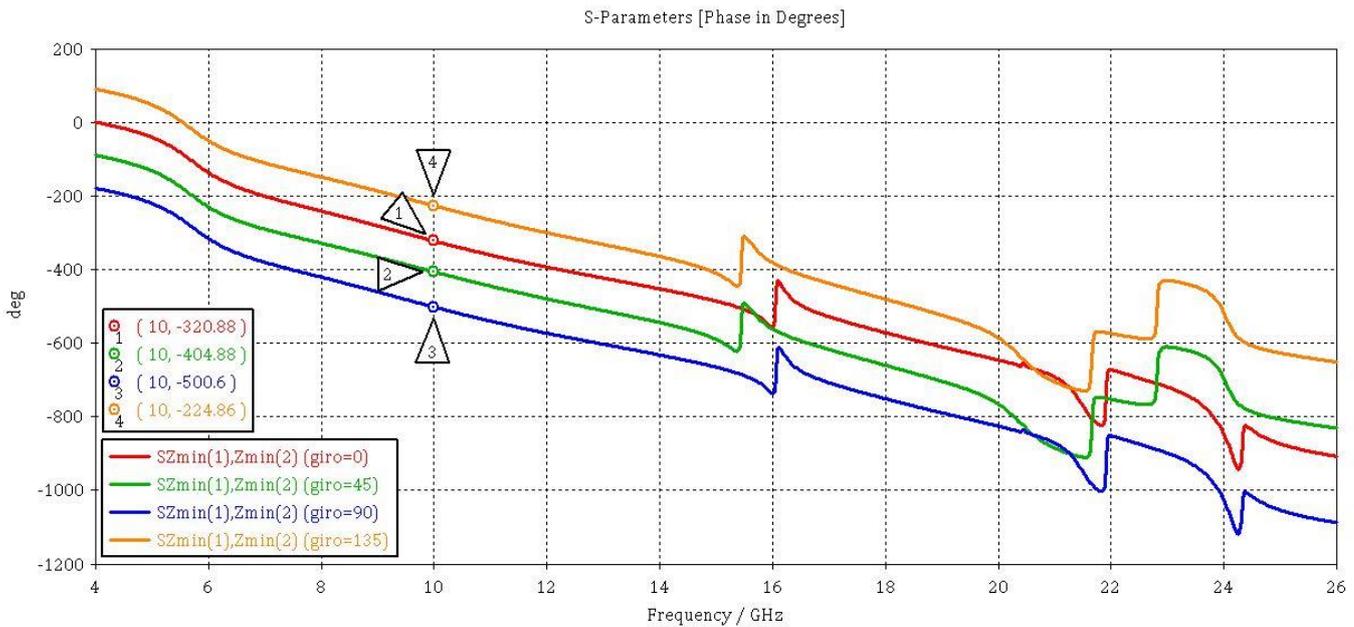


Figura 4.27: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de la tercera prueba con los dos anillos en el mismo plano.

En la Figura 4.27 podemos ver como lo que en simulaciones de casos anteriores eran unas fluctuaciones muy pequeñas se han convertido en unas molestas variaciones que impiden totalmente el uso de las frecuencias desde 15 a 16.5 GHz y eso es algo que ya es más difícil de obviar que en anteriores ocasiones. A pesar de ello, en la banda anterior se mantiene la relación correctamente, aunque el ancho de banda se ve seriamente reducido.

Veamos los resultados del coeficiente de reflexión.

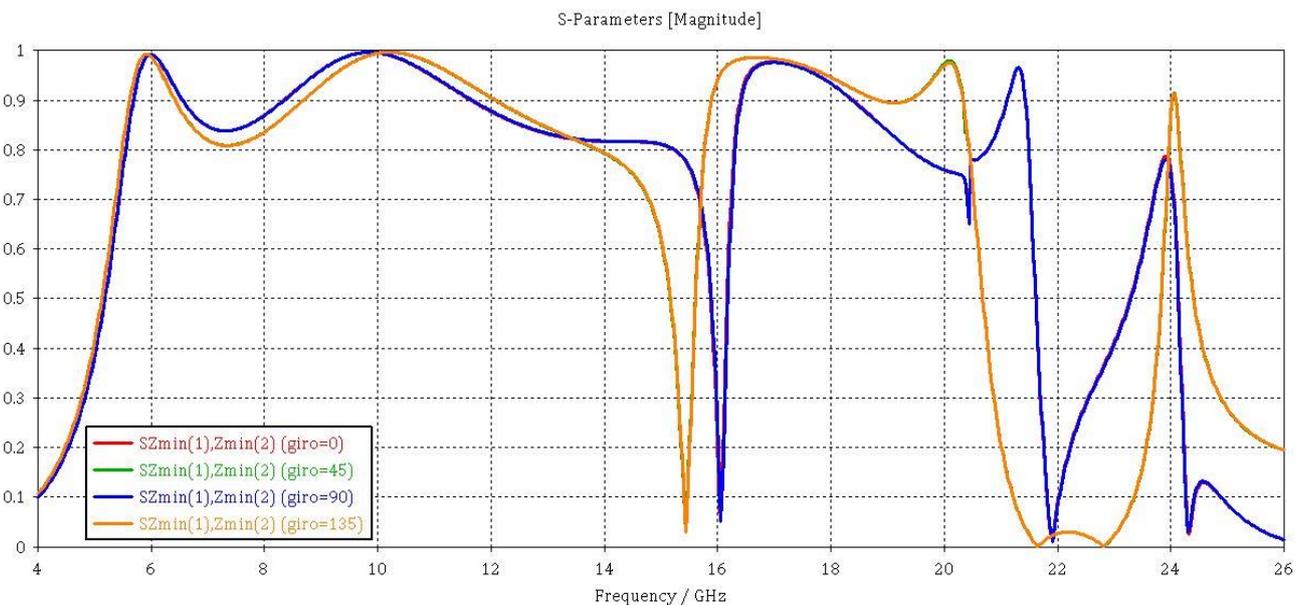
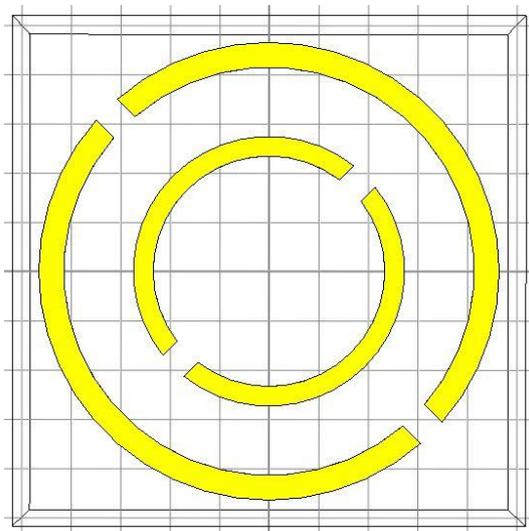


Figura 4.28: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de la tercera prueba con los dos anillos en el mismo plano.

Como era de esperar, en la Figura 4.28 vemos que en las mismas frecuencias donde encontrábamos las fluctuaciones en las fases, encontramos esas zonas de enorme pérdida de reflexión que esta vez ocupan mucha más frecuencia que en anteriores ocasiones por lo que nos impiden obviarlas. Sin embargo hemos conseguido mantener un coeficiente de reflexión adecuado en la primera parte de la banda, desde 5.5 GHz hasta 14 GHz sin caer por debajo del coeficiente de 0.8.

Este último avance nos deja dos vías de procedimiento; o seguimos intentando reducir las bajadas del coeficiente de la zona central de la banda, de forma que sea posible ignorarlas y de esta forma aprovechamos el máximo de reflexión que viene en las siguientes frecuencias para aumentar el ancho de banda lo más posible, o intentamos mejorar la zona de frecuencias bajas de la banda haciendo que esa zona, que no tiene ninguna fluctuación indebida, se estire en frecuencia y ganar así un ancho de banda considerable, dejando fuera del BW esas molestas caídas del coeficiente.



En este caso, en la Figura 4.29 lo que hacemos es fijar el radio interior del anillo interior, y variar el radio exterior del mismo anillo para ver cómo evolucionan los resultados.

Los valores serían $r_1=2.3$, $r_2=[2.7 \rightarrow 3.5]$, $r_3=4.1$, $r_4=4.6$, $a_x=a_y=10$; todo en mm.

Veamos únicamente los resultados del coeficiente de reflexión, ya que al tratarse de un caso de barrido, no es interesante estudiar la fase.

Figura 4.29: Vista frontal de la estructura de la primera prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.

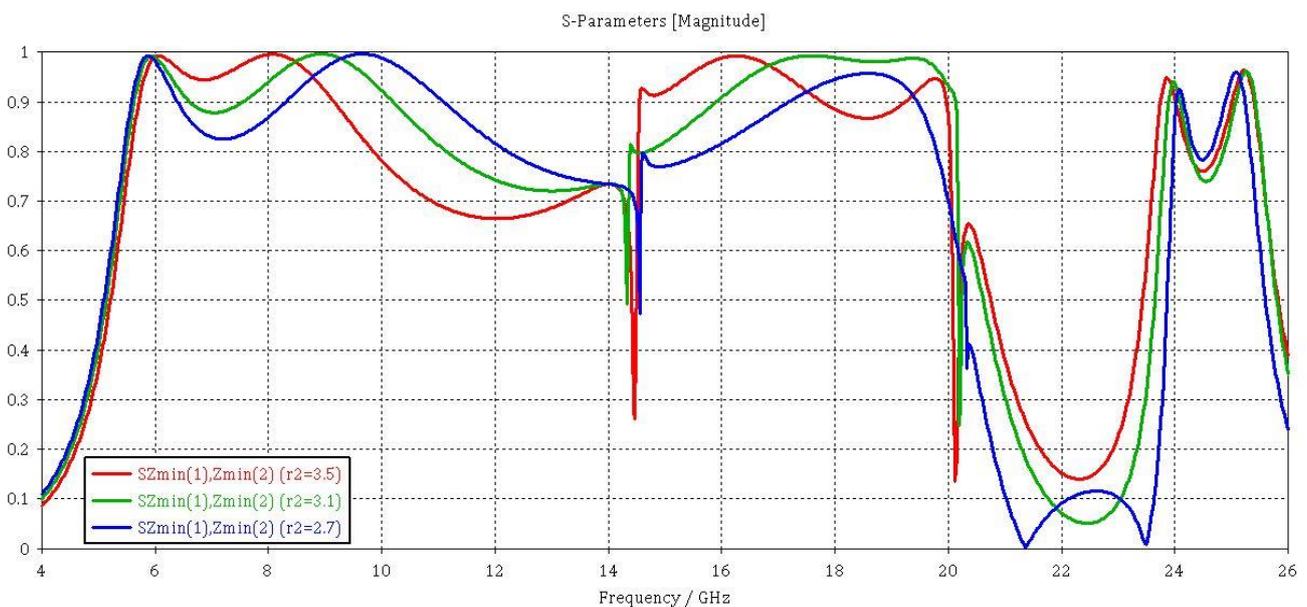
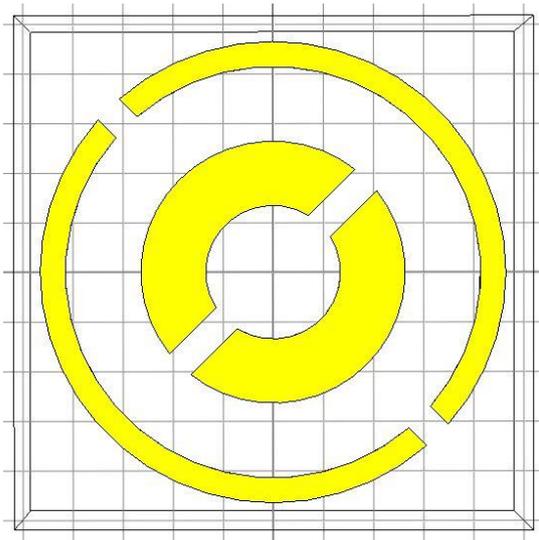


Figura 4.30: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en un elemento de la codificación de 2 bits de la estructura de la primera prueba de barrido con los dos anillos en el mismo plano.

No es mal resultado el obtenido en la Figura 4.30 con el valor de $r_2=2.7$ mm, ya que se consigue eliminar bastante bien la fluctuación de la zona central de la banda, sin embargo sigue teniendo un valor más bajo de lo que nos gustaría, pues el objetivo es conseguir un ancho de banda lo más amplio posible con un coeficiente de 0.9, y un BW más amplio todavía con un coeficiente mínimo de 0.8. Por lo tanto valores por debajo de 0.8 no son lo que queremos. Vamos a pasar a la última prueba de barrido que se hizo para intentar obtener un buen resultado con dos anillos.



En esta prueba de la Figura 4.31 lo que hemos hecho ha sido recuperar el grosor del anillo interior, e ir variando el radio de este anillo manteniendo ese grosor fijo.

Los valores son $r_1=(r_2-1.3)$, $r_2=[2.6 \rightarrow 3.8]$, $r_3=4.1$, $r_4=4.6$, $a_x=a_y=10$; todo en mm

Veamos los resultados del coeficiente de reflexión.

Figura 4.31: Vista frontal de la estructura de la segunda prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.

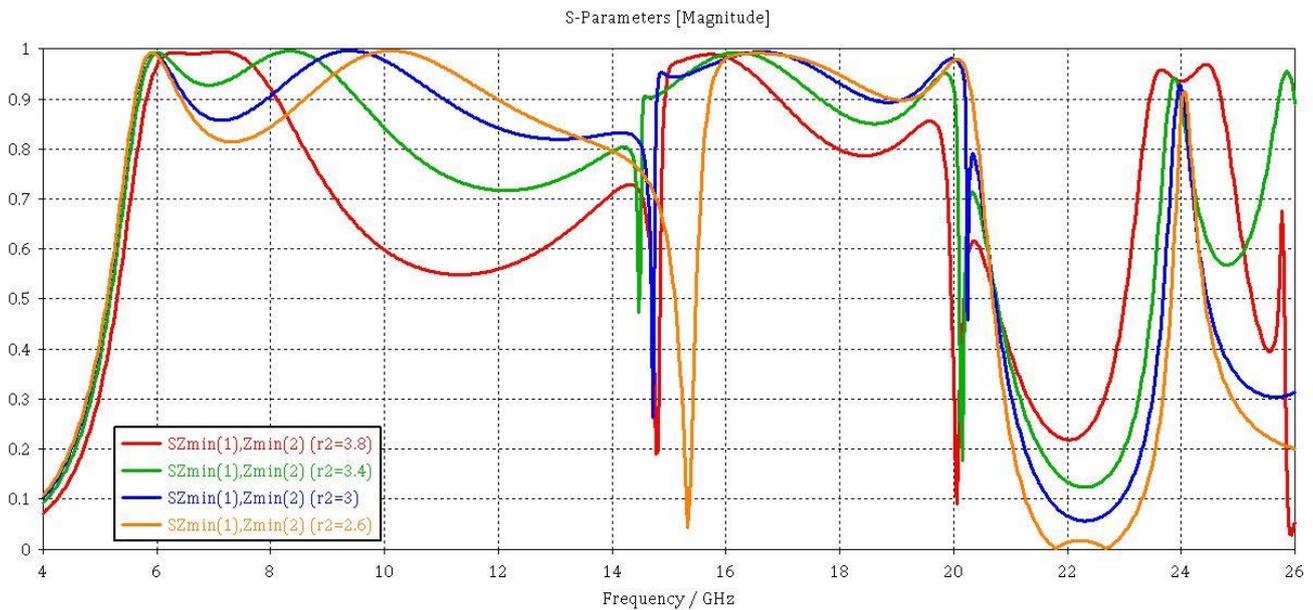


Figura 4.32: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en un elemento de la codificación de 2 bits de la estructura de la segunda prueba de barrido con los dos anillos en el mismo plano.

Como se puede ver en la Figura 4.32, el mejor resultado de los representados es el de color azul que se refiere a la estructura con unos valores de $r_1=1.7$ mm y $r_2=3$ mm. En este resultado el coeficiente se mantiene por encima de 0.8 en todo el ancho de banda salvo en la fluctuación, la cual se ha visto reducida en ancho de banda y ya solo ocupa desde 14.5 GHz hasta menos de 15 GHz, lo cual nos permite obviarla. De esta forma nos queda un ancho de banda total desde 5.5 hasta 20 GHz por encima de un coeficiente de 0.8, lo cual hacen 14.5 GHz de BW. No es para nada mal resultado, sin embargo habría que estudiarlo de forma independiente para ver su codificación de 2 bits, tanto en fase como en coeficiente de reflexión, ya que aquí únicamente estamos viendo un único elemento, y posteriormente analizar si es posible reducir el sustrato a la mitad (60 mils) y mantener el ancho de banda.

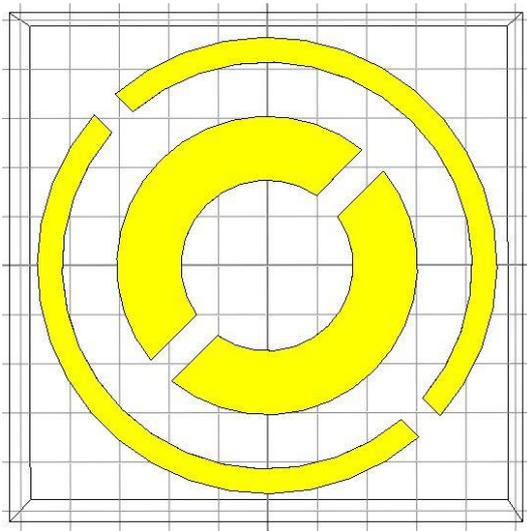


Figura 4.33: Vista frontal de la estructura del mejor caso de la segunda prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.

En ese caso de la Figura 4.33, tenemos los valores de los parámetros que mejor resultado nos han dado hasta el momento;

Los valores son $r_1=1.7$, $r_2=3$, $r_3=4.1$, $r_4=4.6$, $a_x=a_y=10$; todo en mm.

Veamos los resultados.

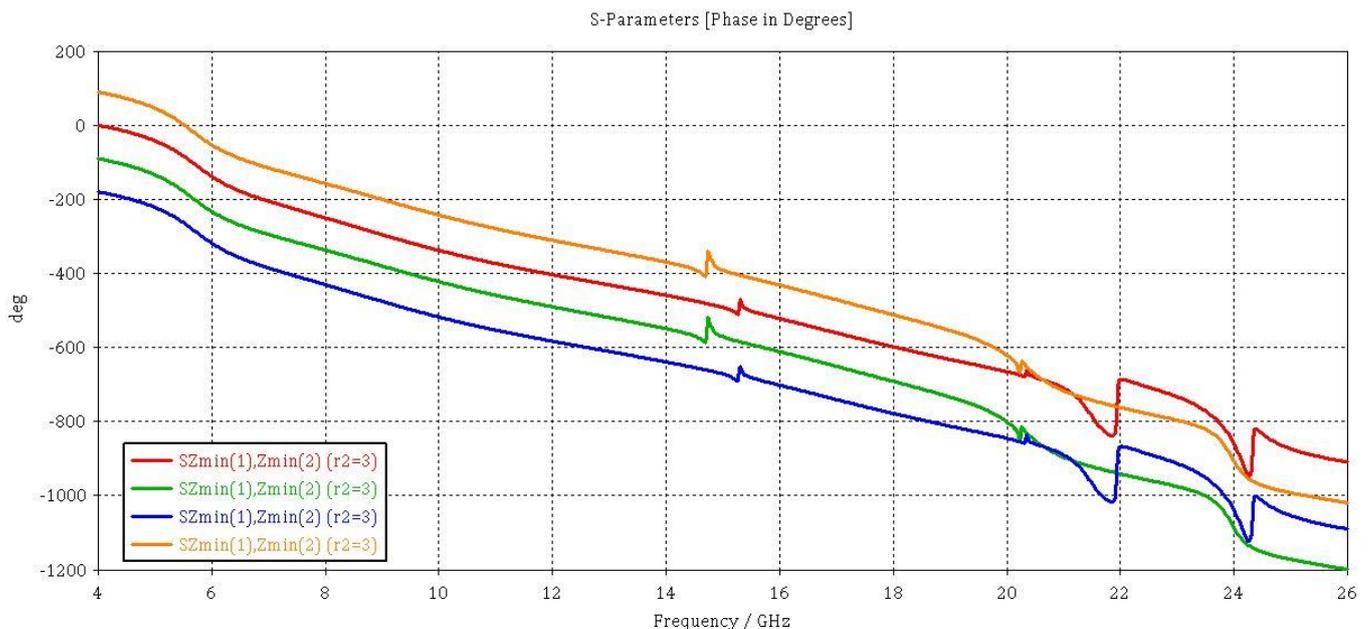


Figura 4.34: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura del mejor caso de la segunda prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.

El resultado mostrado en la Figura 4.34 es bastante correcto, con un ancho de banda que llega hasta la frecuencia de 19 GHz aproximadamente, aunque posee las fluctuaciones en torno a la frecuencia de 15 GHz que son bastante molestas, ya que estropean la continuidad de la banda.

Por otra parte tenemos el resultado del coeficiente de reflexión.

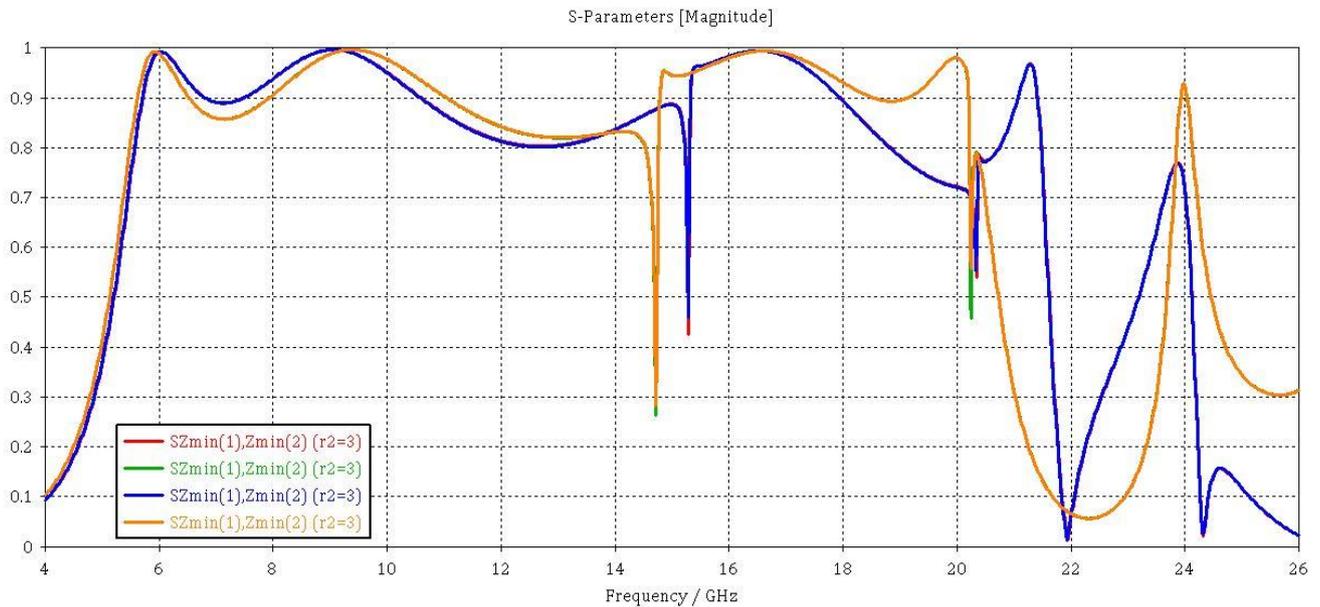


Figura 4.35: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en un elemento de la codificación de 2 bits de la estructura del mejor caso de la segunda prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.

En el resultado de la Figura 4.35, vemos como se presenta un ancho de banda bastante bueno de 13.5 GHz; desde 5.5 GHz hasta 19 GHz, aunque presenta la misma fluctuación que llevamos arrastrando desde la estructura inicial que es realmente molesta porque supone que en esos dos pequeños rangos de frecuencia, la estructura no funcionaría correctamente.

Aparte de eso, hemos logrado reducir el número de capas de tres a dos, mejorando el ancho de banda por encima del coeficiente de 0.8 en 3.5 GHz. Es cierto que esta estructura está diseñada sobre un sustrato de 120 mils, y por motivos de fabricación tenemos como objetivo reducirlo a la mitad. Por desgracia al reducir el grosor de su sustrato a la mitad, es bastante obvio que perderemos el ancho de banda que hemos conseguido. De todas formas lo comprobaremos a continuación.

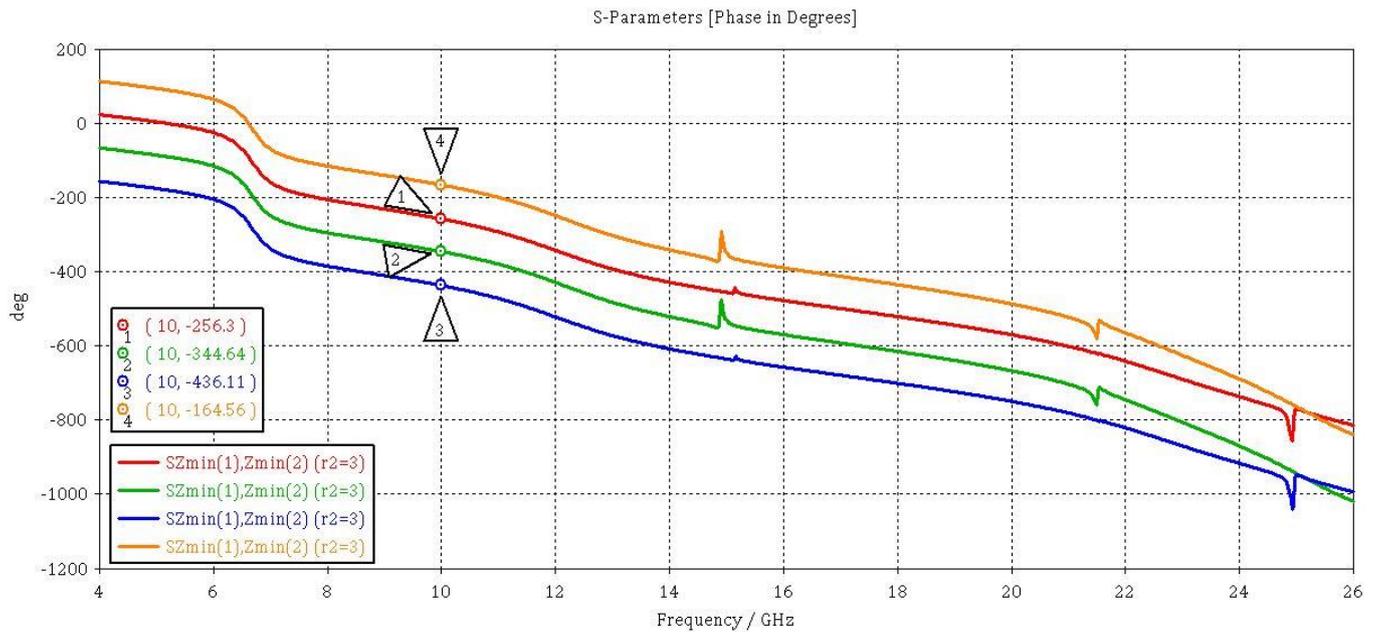


Figura 4.36: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura del mejor caso de la segunda prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano con un sustrato de 60 mils.

Se puede ver en el resultado de la Figura 4.36 que la relación entre fases se mantiene bastante estable a lo largo de la banda estudiada, salvo otra vez por la fluctuación.

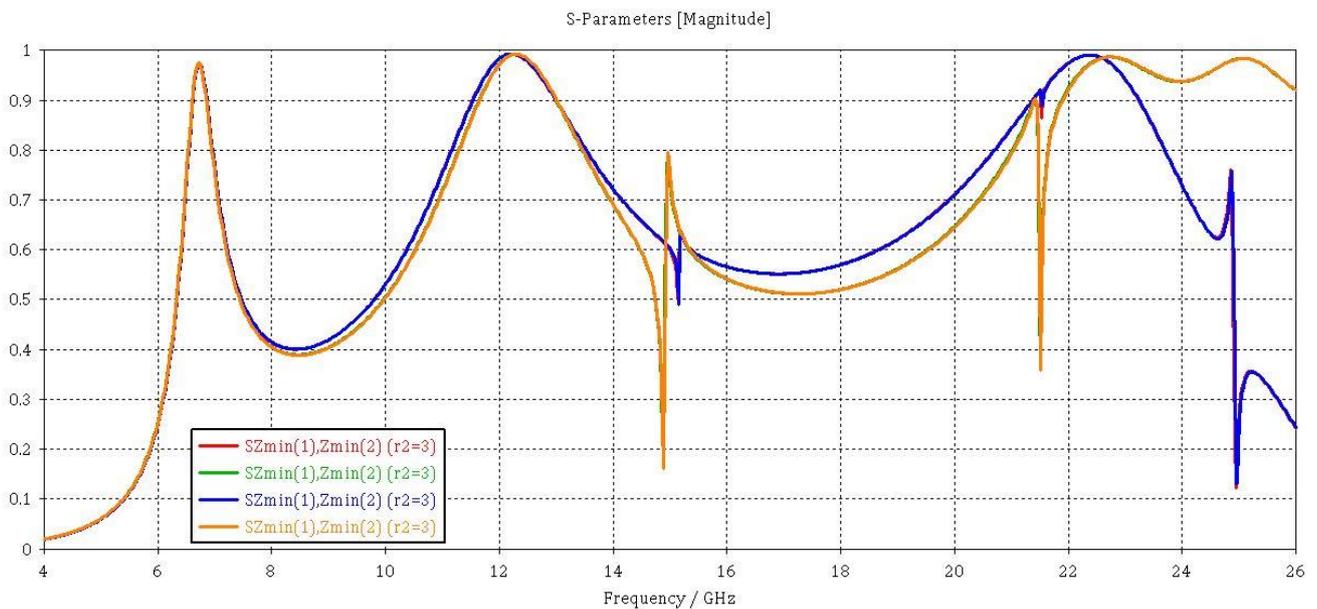
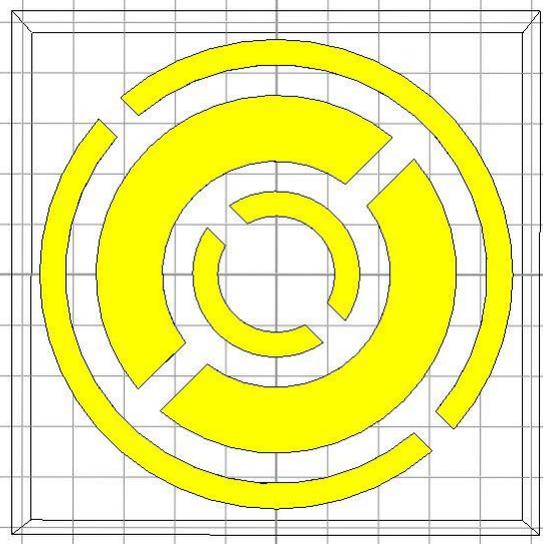


Figura 4.37: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en un elemento de la codificación de 2 bits de la estructura del mejor caso de la segunda prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano con sustrato de 60 mils.

En este resultado de la Figura 4.37 vemos como efectivamente la estructura ha perdido toda la reflexión que habíamos conseguido, al reducir el sustrato a la mitad, por lo que no nos conformamos con esta estructura y vamos a tratar de diseñar otra que cumpla los objetivos.

Cabe añadir que se hicieron algunos intentos de mejorar los resultados de la estructura de dos anillos en el mismo plano añadiendo un tercer anillo pero no tuvo buenos resultados.



En este caso de la Figura 4.38 los valores de radios son los siguientes; $r_1=2.2$, $r_2=3.5$, $r_3=4.1$, $r_4=4.6$, $r_5=1.6$, $r_6=1.1$, con $a_x=a_y=10$; todo en mm.

La idea de este nuevo anillo era generar un nuevo pico de reflexión en la zona media de la banda.

Veamos los resultados.

Figura 4.38: Vista frontal de la estructura intentando colocar tres anillos en el mismo plano.

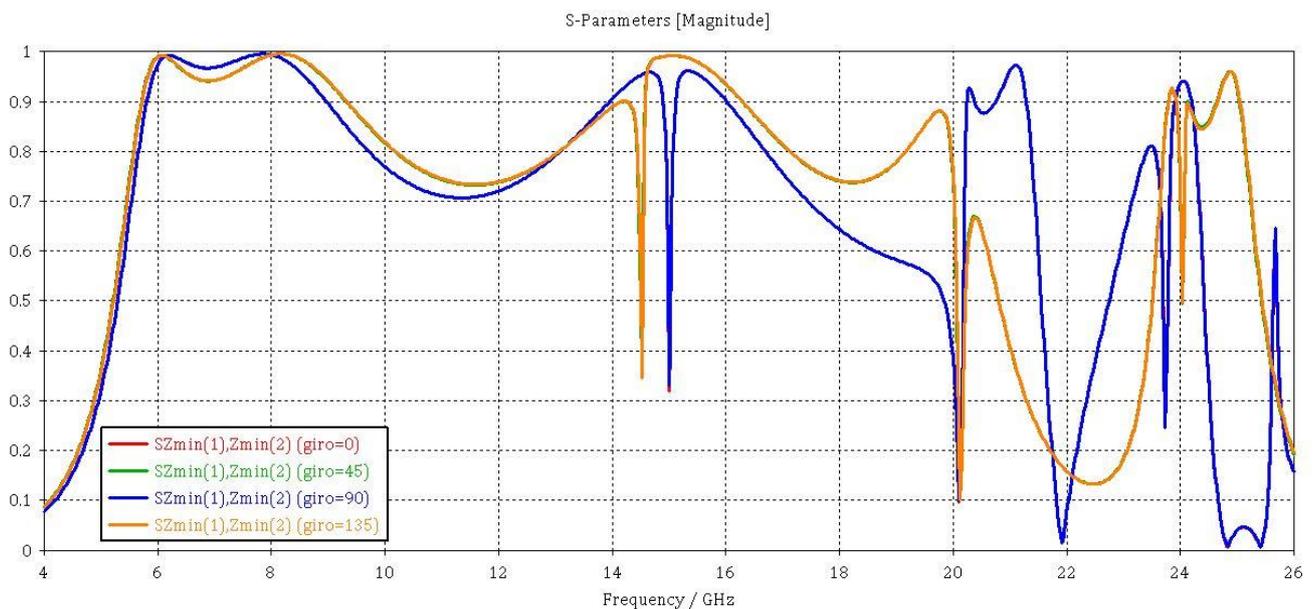


Figura 4.39: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura con tres anillos en el mismo plano.

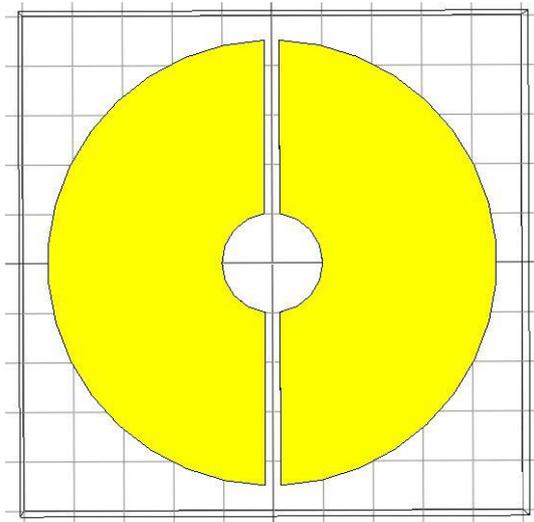
Como se puede apreciar en la Figura 4.39, el resultado no mejora lo obtenido en previas pruebas. Aunque se consigue mejorar la reflexión en la zona donde sufrimos la fluctuación, nos vemos obligados a juntar más de lo óptimo los anillos originales para hacer hueco para el tercer anillo, lo cual hace que la interferencia entre ellos vuelva a ocasionarse y estropee los avances anteriores. Se puede apreciar esto en la zona inicial de la banda donde volvemos a tener los dos máximos muy juntos y las frecuencias inmediatamente posteriores sufren la caída del coeficiente de la misma forma que ya experimentaba en las primeras pruebas, además, tras pasar la fluctuación, la reflexión cae mucho más rápido que en los otros casos,

limitando el ancho de banda mucho antes. La conclusión es que no es una buena estructura, y es mejor la obtenida con los dos anillos.

Cuando estudiamos como se comportaban los anillos interior y exterior por separado de forma aislada, vimos que en el caso del anillo interior; que estaba situado sobre el sustrato doble, partíamos de un buen resultado en el coeficiente de reflexión, así que decidimos investigar este camino para ver si podíamos obtener un mejor resultado que con dos anillos. Además, el procedimiento anterior sirvió para mejorar la forma de proceder esta vez, y se decidió comenzar por un estudio paramétrico que sirva de guía para saber que implica modificar cada parámetro de una forma concreta y así encontrar de forma más fácil y rápida el camino para avanzar.

Tras los resultados de la estructura de dos anillos, vamos a intentar modelar una estructura bicapa que este formada por un único anillo, con un ancho de banda mejor de lo que hemos obtenido hasta ahora, y con un sustrato de 60 mils, gracias a las conclusiones sacadas del estudio paramétrico.

Comencemos por el primer intento



Para comenzar por algún sitio, en la Figura 4.40 primero modelamos un anillo con radio pequeño pero muy grueso, en función del resultado podemos variar unos valores u otros para mejorar el coeficiente.

Los valores son; $a_x=a_y=10$ mm, $r_1=1$ mm, $r_2=4.5$ mm y $gap=0.3$ mm.

A continuación vemos el resultado.

Figura 4.40: Vista frontal de la estructura de la primera prueba intentando modelar un anillo sobre un sustrato de 60 mils con un buen ancho de banda.

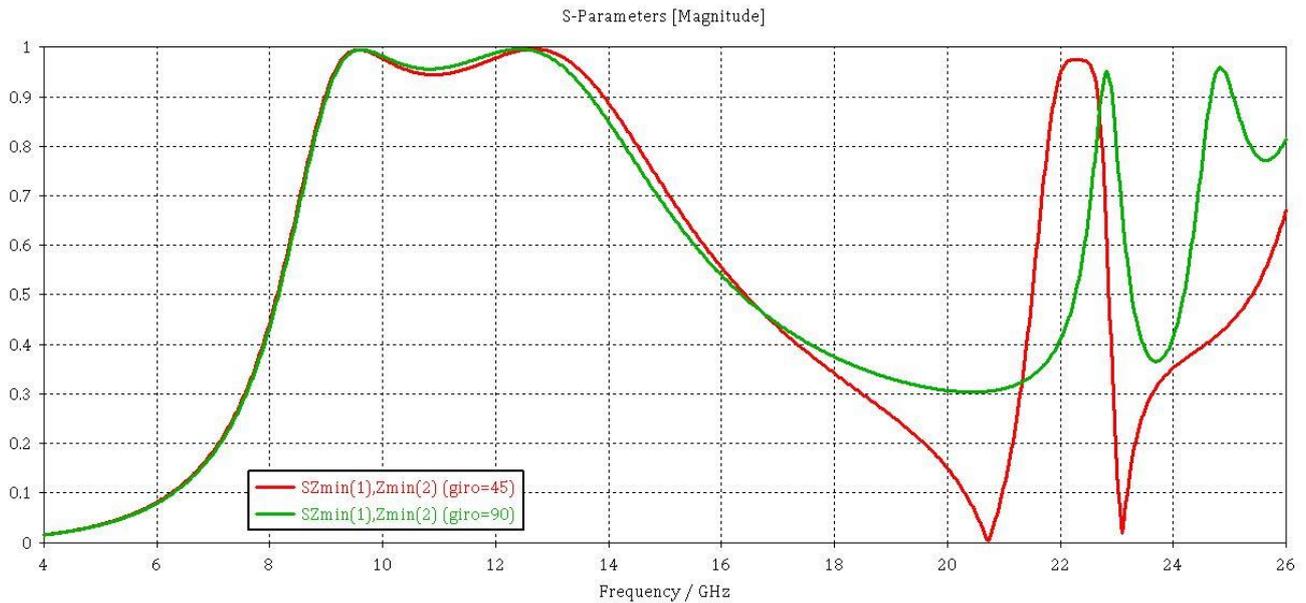


Figura 4.41: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de la primera prueba de un anillo sobre sustrato de 60 mils.

Cabe aclarar que se ha estado simulado únicamente dos elementos a partir de este momento porque como se puede apreciar en los resultados previos, los elementos restantes se solapan entre sí, motivo por el cual, para ahorrar tiempo en las simulaciones, contando con estos dos elementos únicamente nos vale.

Tampoco parece necesario estudiar la relación entre fases ya que se suele mantener esa relación en todas las estructuras gracias a la fase geométrica, como llevamos viendo desde el principio, por ende, únicamente estudiaremos este aspecto cuando tengamos una estructura que cumpla nuestras expectativas en coeficiente de reflexión.

En la Figura 4.41 podemos ver los resultados, donde nos encontramos una clara zona por encima de un coeficiente de 0.9, por desgracia es únicamente de 5 GHz de ancho de banda, veamos si podemos mejorarlo variando algunos parámetros en la siguiente prueba.

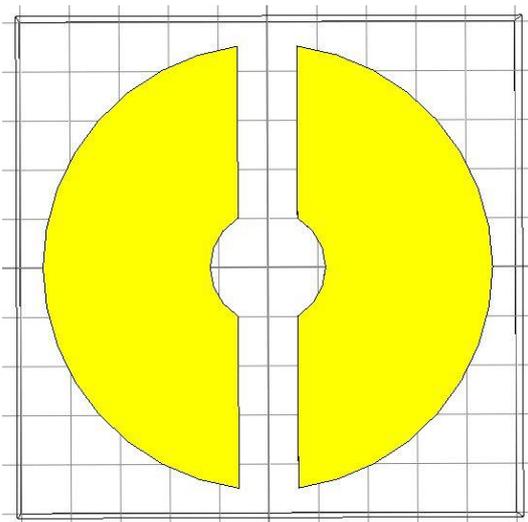


Figura 4.42: Vista frontal de la estructura de la segunda prueba intentando modelar un anillo sobre un sustrato de 60 mils con un buen ancho de banda.

Como se puede ver en este caso de la Figura 4.42 lo que hemos hecho ha sido aumentar el gap para ver si podemos aumentar el ancho de banda a costa de perder algo de reflexión en el valle.

Lo único que cambiamos aquí es el gap, cuyo nuevo valor es 1.2 mm, el resto se mantiene, $a_x=a_y=10$ mm, $r_1=1$ mm y $r_2=4.5$ mm.

El resultado es el siguiente.

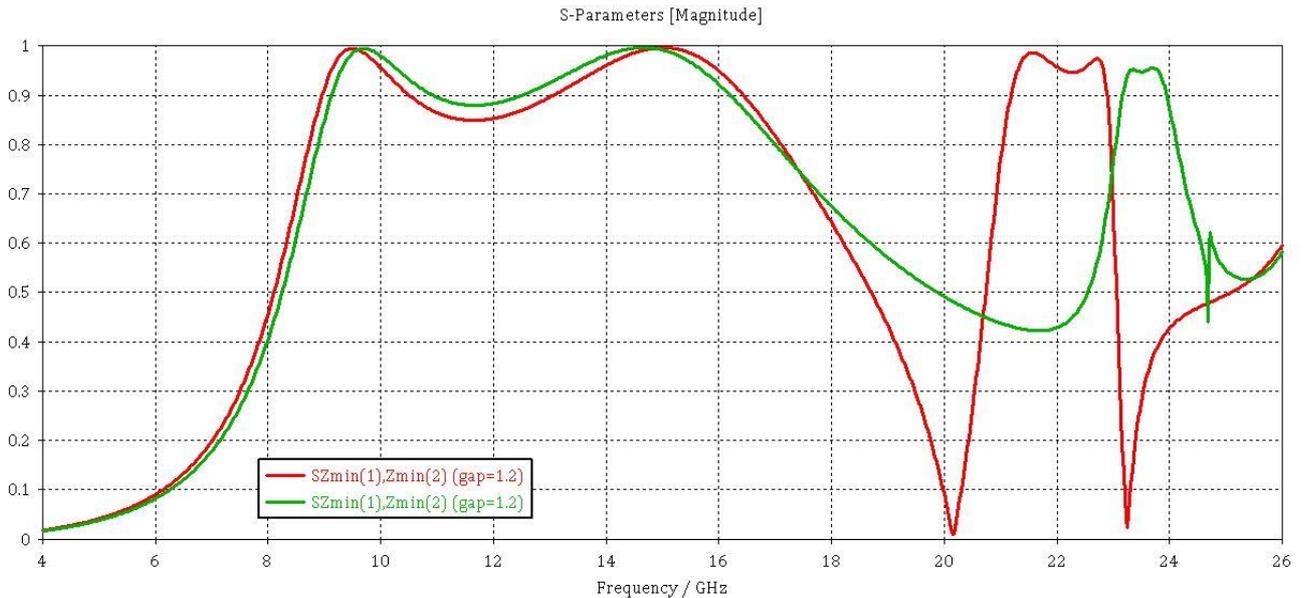


Figura 4.43: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de la segunda prueba de un anillo sobre sustrato de 60 mils.

Si nos fijamos en la Figura 4.43, vemos como el ancho de banda se ha hecho mayor, a costa de perder algo de reflexión en la zona intermedia, por debajo de un coeficiente de 0.9. El ancho de banda por encima de un coeficiente de 0.8 ha pasado de unos 5.5 GHz en la Figura 4.41 a unos 8.5 GHz. La mejora es notable sin embargo sigue sin ser lo que buscamos, es mejorable.

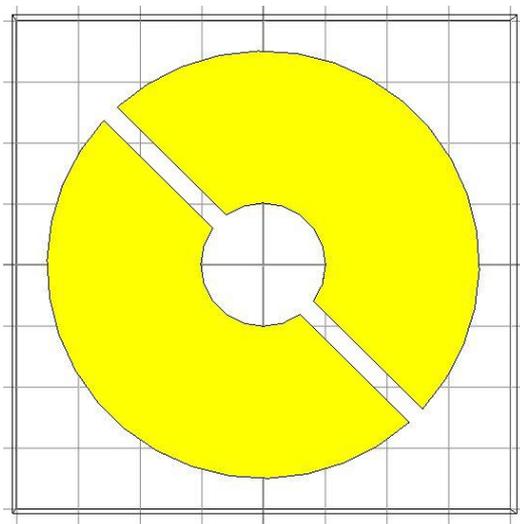


Figura 4.44: Vista frontal de la estructura de la tercera prueba intentando modelar un anillo sobre un sustrato de 60 mils con un buen ancho de banda.

En este caso de la figura 4.44 hacemos varias modificaciones, primero reducimos el tamaño de la celda a $a_x=a_y=8$ mm. Después hacemos un barrido del radio interior $r_1=[1 \rightarrow 3]$ y del gap $=[0.3 \rightarrow 2.1]$, manteniendo el radio exterior $r_2=3.5$, todo ello en mm.

En este caso como se hace un barrido de dos valores independientes, no podemos representar todos los resultados a la vez porque sería un caos visual. Por eso hemos representado los resultados en dos casos separados, uno donde se ven las variaciones del gap para el mejor valor del radio, y otro donde se ven las variaciones del radio para el mejor valor del gap.

Veamos primero el caso donde se hace un barrido del gap, tomando el mejor caso de radio ($r_1=1$ mm).

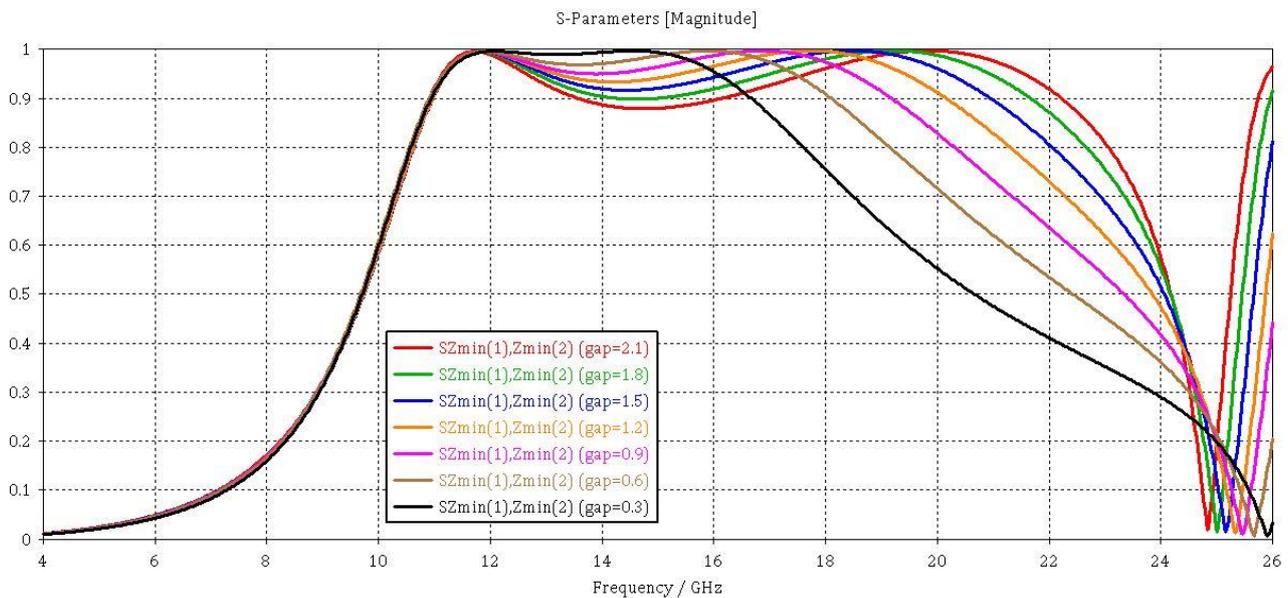


Figura 4.45: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de la tercera prueba de un anillo sobre sustrato de 60 mils. Variación del gap, manteniendo $r_1=1$ mm.

En estos resultados que vemos en la Figura 4.45, donde el radio interno del anillo está fijado en 1 mm, vemos como la variación del gap ayuda a mejorar el ancho de banda, a costa de perder un poco de coeficiente de reflexión en la zona media como en el caso anterior. En el mejor de los casos, con el gap de 2.1 mm conseguimos un ancho de banda de 11 GHz aproximadamente aunque bajando un poco por debajo del coeficiente de 0.9 en la zona media.

Veamos el resultado con este valor de gap fijo en 2.1 mm y un barrido del r_1 .

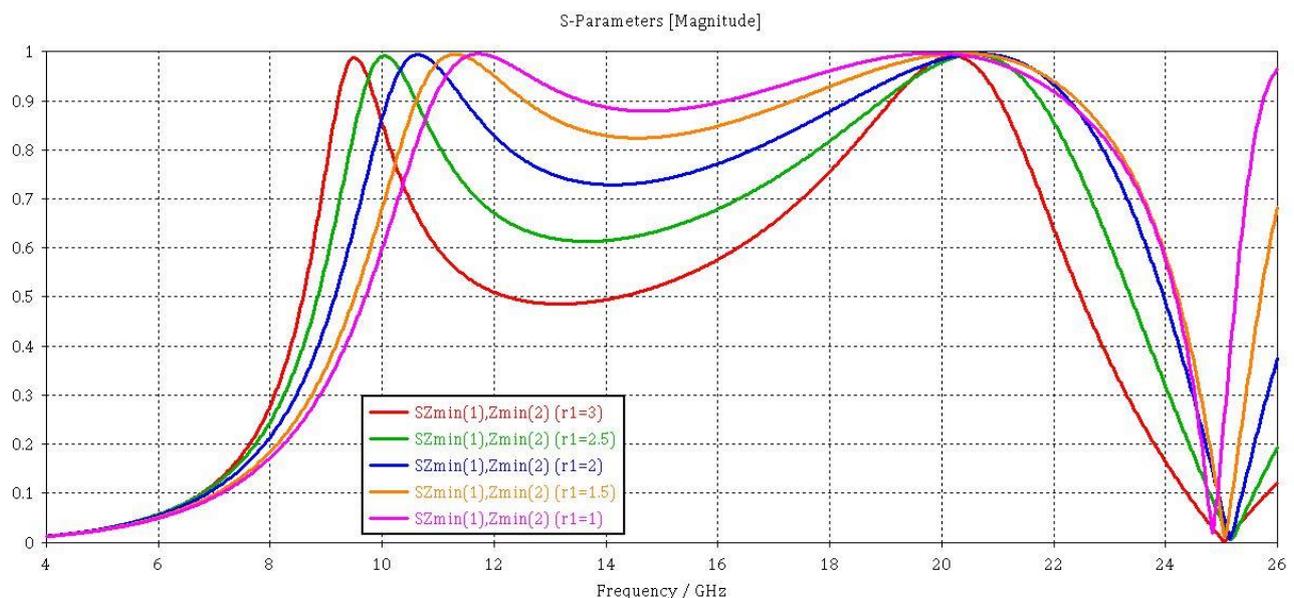


Figura 4.46: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de la tercera prueba de un anillo sobre sustrato de 60 mils. Variación de r_1 , manteniendo gap=2.1 mm.

En estos resultados de la Figura 4.46 se ve claramente que no es beneficioso aumentar r_1 aumentando así el radio del anillo pero haciéndolo más estrecho a su vez, ya que r_2 es un valor fijo en este caso.

Cabe decir también que el haber reducido el tamaño de la celda unidad de 10 mm de lado a 8 mm, junto con reducir el valor del radio exterior del anillo de 4.5 mm a 3.5 mm, se ha traducido en una separación de picos mayor, con una pérdida de coeficiente en el valle menor, de forma que podemos decir que han sido unas mejoras importantes.

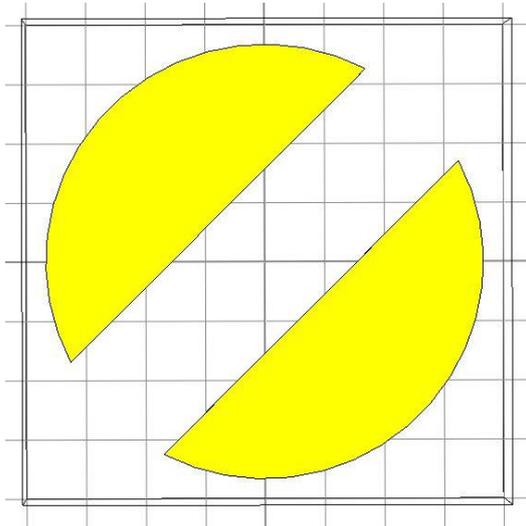


Figura 4.47: Vista frontal de la estructura de la final modelando un anillo sobre un sustrato de 60 mils con un buen ancho de banda.

Sin embargo, tras ver como resultaban estas últimas estructuras, en la Figura 4.47 se me ocurre quitar el radio interior y simplemente convertir el anillo en un círculo separado por un gap de lado a lado de la estructura y ver como resulta. Tras ver el resultado y hacerle unos ligeros retoques, elegí la estructura final y la simulé junto con el resto de elementos de la codificación de 2 bits para ver el resultado final, tanto del coeficiente de reflexión como de la relación entre fases.

En esta estructura los valores de los parámetros son; $a_x=a_y=8$ mm, $r_2=3.5$ mm, $gap=2.2$ mm y grosor sustrato = 60 mils = 1.524 mm.

Veamos los resultados.

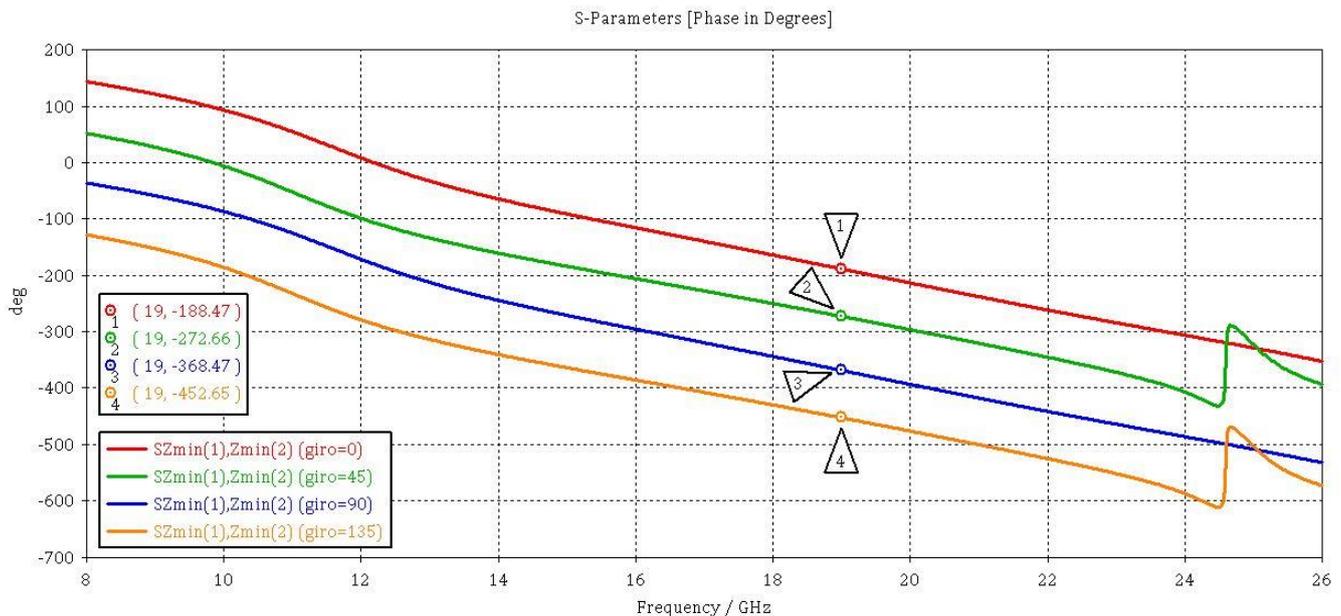


Figura 4.48: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura final de un anillo sobre un sustrato de 60 mils.

En estos resultados de la Figura 4.48 vemos como la relación entre fases de los elementos es constante a lo largo de las frecuencias. Puede que sufra un leve desajuste entre las frecuencias de 10 y 12 GHz pero nada tan elevado como para causar problemas.

Veamos ahora la reflexión.

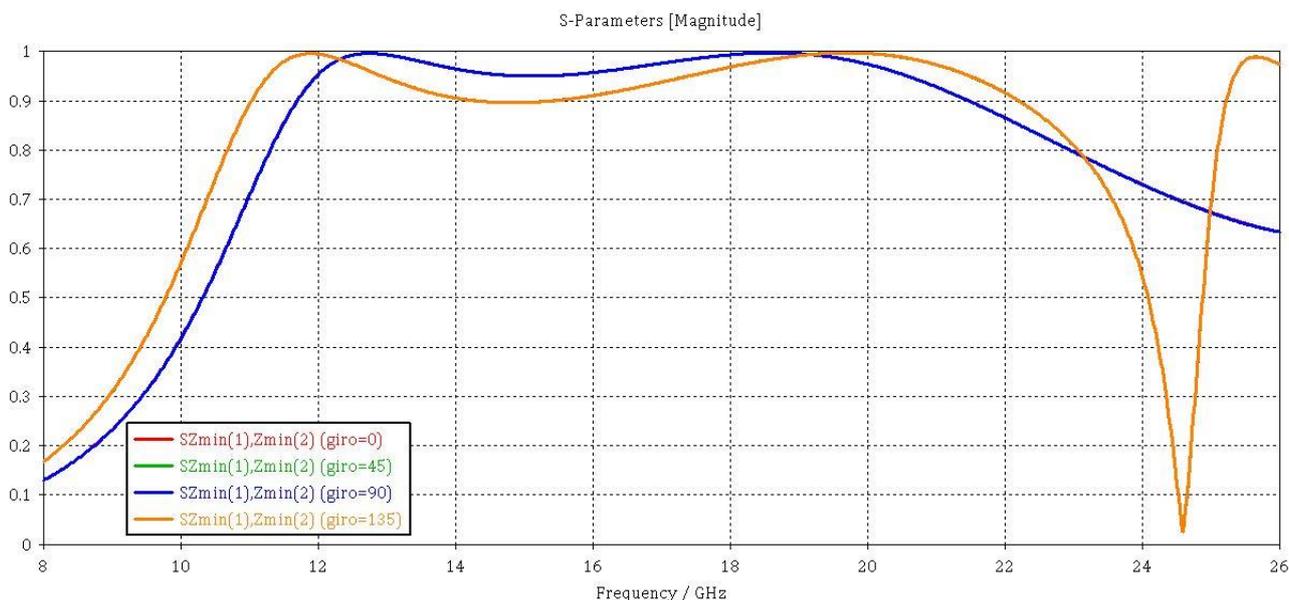


Figura 4.49: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura final de un anillo sobre sustrato de 60 mils.

Finalmente, en la Figura 4.49, podemos observar la estructura final que nos proporciona el mayor ancho de banda conseguido por encima de un coeficiente de 0.9. Si es cierto que los elementos obtenidos con un giro de 0° y de 90° limitan el ancho de banda más de lo que lo hacen los otros dos elementos, que justamente eran con los que hemos estado trabajando.

Sin embargo, aunque nos estropean un poco el BW, no es un resultado para nada malo, ya que la estructura original, cuyos resultados de reflexión están en la Figura 4.5, tiene un ancho de banda por encima de un coeficiente de 0.9, de 8 GHz, y además posee esa fluctuación que no tienen en cuenta pero que hace peor el resultado.

Y si tenemos en cuenta el ancho de banda con un coeficiente de reflexión mínimo de 0.8, el ancho de banda conseguido es de 12 GHz, mientras que el original era de 10 GHz.

Luego entonces, hemos superado ese resultado inicial y mejorado el ancho de banda en 2 GHz, además del número de elementos; de 2 anillos a 1, el número de capas; de 3 capas a 2, y el tamaño del sustrato, de 120 mils a 60 mils. Sin duda es un resultado muy satisfactorio.

4.5 Evolución a estructura Conmutable

Tras haber conseguido pasar la estructura original a dos capas, tanto la variante de dos anillos como la de un único anillo; aunque se trata más bien de dos semicírculos, y además haber conseguido reducir el sustrato de 120 mils a 60 mils, poco podemos hacer para mejorar más la estructura.

El único camino viable que tenemos es intentar hacer estas estructuras reconfigurables de alguna manera, y la única que teníamos a nuestro alcance era con el uso de diodos PIN. Como la estructura final de un anillo no es viable hacerla conmutable con diodos PIN, decidimos probar a hacer conmutable la estructura inicial.

Para ello, lo que hacemos es modelar unos pequeños diodos con forma de un cortocircuito en las posiciones donde es posible que haya un gap menos en una posición, donde supondremos que el diodo esta polarizado en inversa, y por tanto será un circuito abierto que conformará el gap.

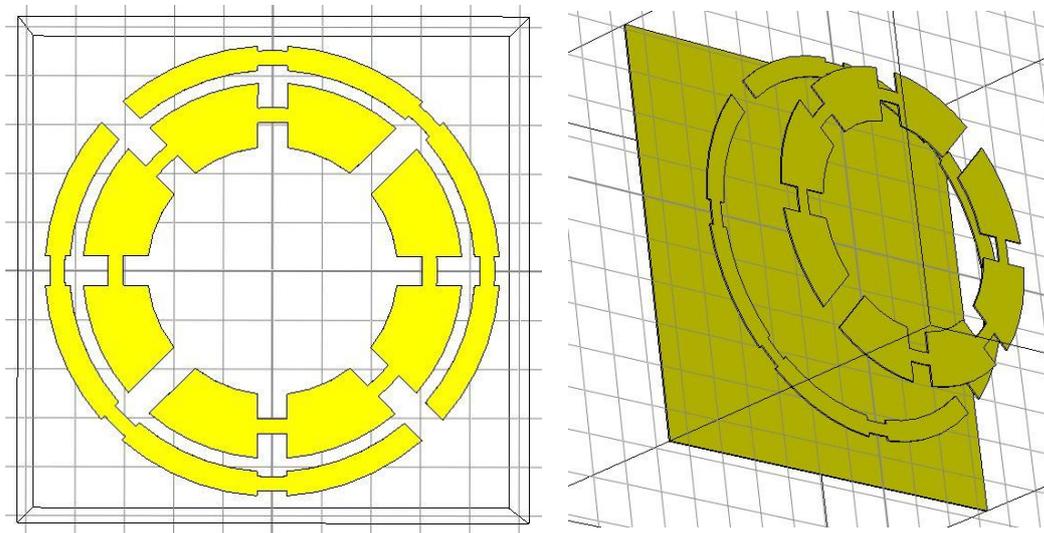


Figura 4.50: Representación de la estructura inicial modelada con diodos para hacerla conmutable. A la izquierda vista frontal y a la derecha vista diagonal para percibir la profundidad.

En la estructura que se puede ver en la Figura 4.50, las dimensiones de los parámetros son las siguientes; $r_1=2.5$, $r_2=3.8$, $r_3=4.1$, $r_4=4.6$, $\text{gap}=0.6$, $\text{sus}=3.048$, $a_x=a_y=10$; todo ello en mm.

Cabe añadir que el grosor de los cortocircuitos que conforman los diodos es de 0.3 mm.

Veamos si se mantienen los resultados originales.

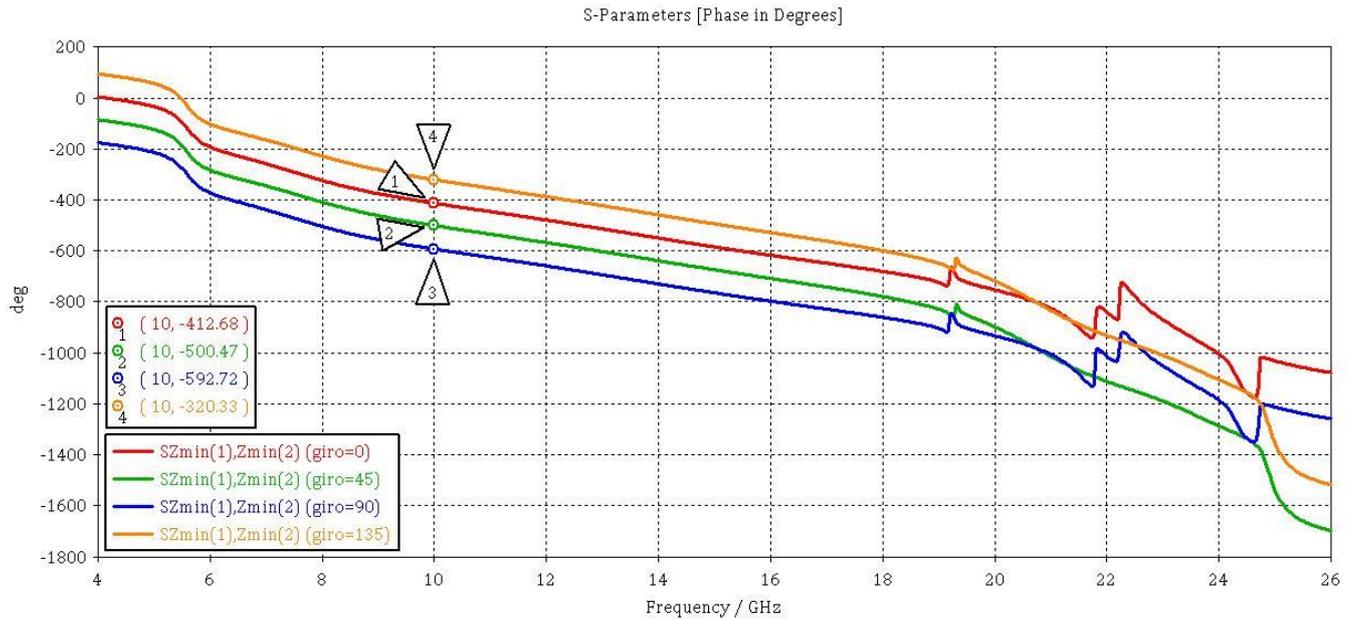


Figura 4.51: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura inicial modelada con diodos para hacerla conmutable.

En los resultados de la Figura 4.51, vemos una buena relación entre fases de los distintos elementos de la codificación a lo largo de un ancho de banda extenso, donde a partir de los 18 GHz la relación se pierde.

Veamos el coeficiente de reflexión.

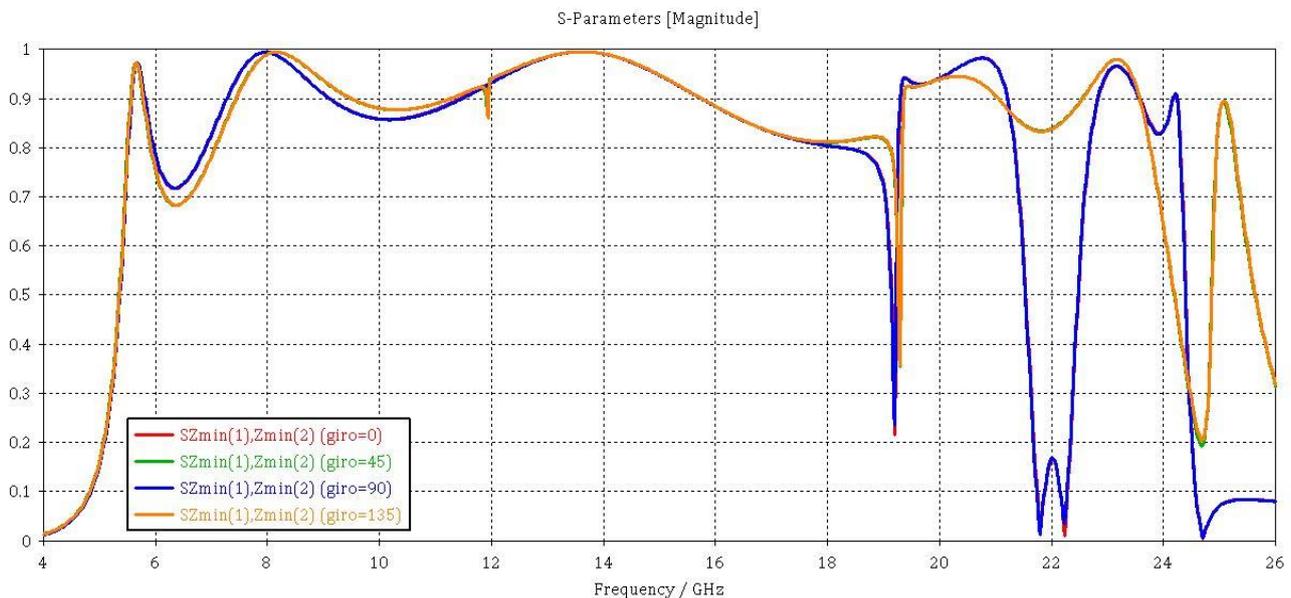


Figura 4.52: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura inicial modelada con diodos para hacerla conmutable.

El resultado es muy satisfactorio, en la Figura 4.52 se ve que el ancho de banda por encima de un coeficiente de 0.8 es de al menos 11 GHz, donde además se ha eliminado la fluctuación sufrida en la zona central de la banda que tanto problema ha dado en el proceso de reducción a dos capas.

Además el ancho de banda coincide con el de la relación de fases, por lo tanto todo está correcto.

Como estructura adicional que se comprobó por si pudiera ser interesante aplicarla, se hizo un estudio de la estructura inicial pero en lugar de colocar dos gaps en cada anillo, se probó a poner cuatro de forma equidistante de esta forma.

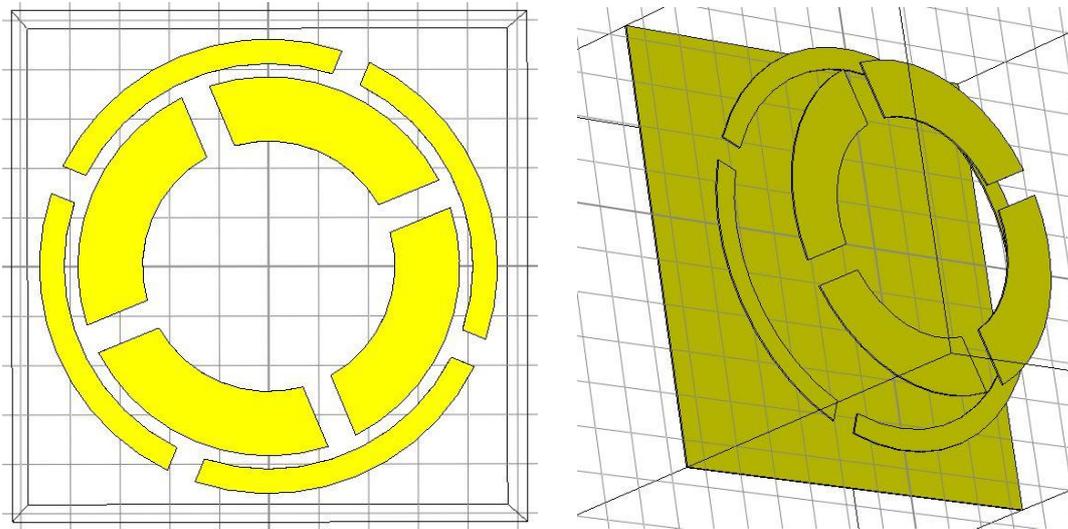


Figura 4.53: Representación de la estructura inicial modelada con 4 gaps. A la izquierda vista frontal y a la derecha vista diagonal para percibir la profundidad.

Las dimensiones de los parámetros en el caso de la Figura 4.53 son las mismas que en anterior caso pero sin diodos.

Veamos los resultados.

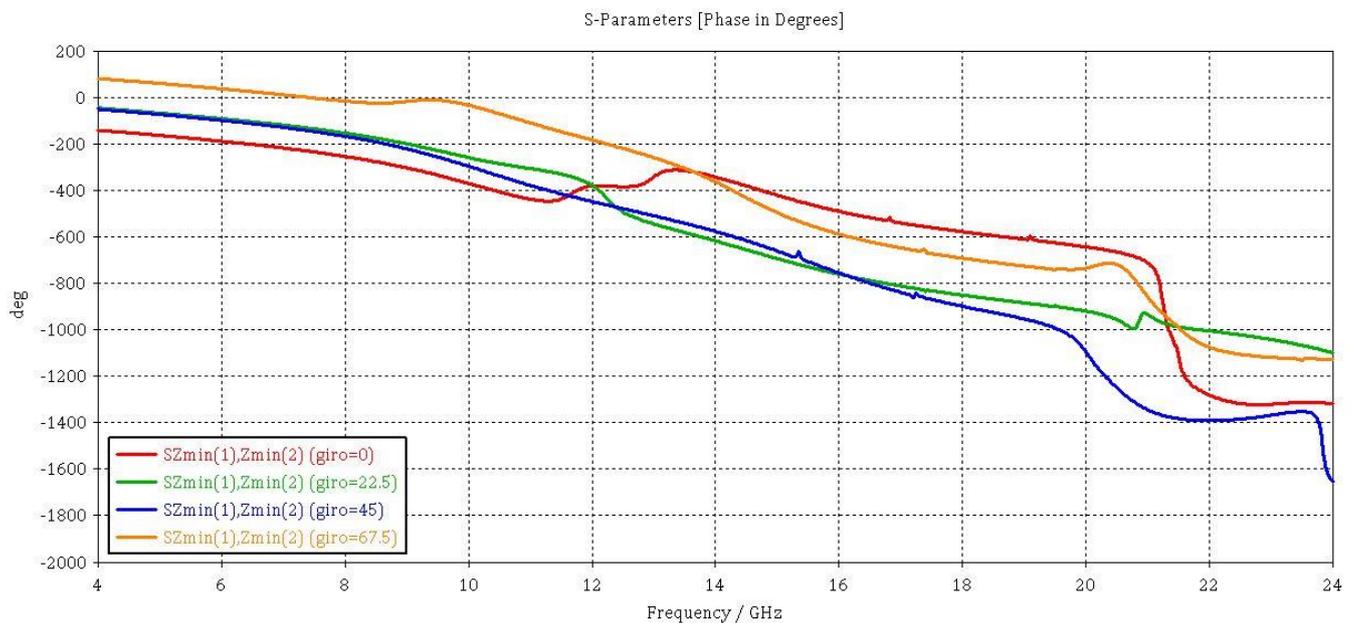


Figura 4.54: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura inicial modelada con 4 gaps.

El resultado es totalmente inesperado, y es que en la Figura 4.54, se ve como la relación entre fases es totalmente inexistente en el ancho de banda en el que trabajamos.

Una razón por la que creemos que puede pasar esto es que al poner los nuevos gaps, reducimos la longitud de cada segmento del anillo en más de la mitad, formando cuatro segmentos donde antes había dos, y encima los nuevos gaps se apropian cierto espacio.

Esto hace que varíe el área de cada segmento y su longitud, lo cual ya hemos mencionado, afecta físicamente a la forma de comportarse de los metamateriales, y en este caso lleva a un completo desastre.

No vale la pena incluir el resultado del coeficiente de reflexión, no solamente por el resultado en fase; que ya inhabilita su viabilidad, sino porque ese resultado tampoco es válido, con un coeficiente de 0 en toda la banda.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado que son los metamateriales y las metasuperficies, se han tratado alguna de sus propiedades más interesantes y en consecuencia algunos de sus usos que más interés despiertan en los investigadores de hoy en día.

La propiedad más notoria de los metamateriales es la refracción negativa; con aplicaciones como la compensación de fase o la lente de Pendry o perfecta. Sin embargo, hay otra serie de propiedades más útiles en el campo en el que trabajamos en este proyecto como es la reflexión anómala, donde una metasuperficie con variación gradual de fase puede dar lugar a una reflexión no especular y controlada, siguiendo la ley generalizada de Snell. Esta propiedad abre un abanico de opciones a los investigadores de estos materiales, entre las que encontramos usos de reducción de la sección radar de objetos, o la reflexión inteligente para alcanzar zonas donde las ondas no llegan por reflexión habitual.

De entre esos usos, el trabajo se ha centrado en las estructuras metamateriales para reflexión anómala que son útiles para la ocultación de objetos ante dispositivos de detección por ondas electromagnéticas. La caracterización electromagnética de estas estructuras se ha realizado usando CST Studio Suite®, un software comercial de simulación electromagnética 3D de alto rendimiento. El proceso de análisis ha partido de una estructura inicial publicada en un artículo científico. Ha partir de esta estructura se han seguido diferentes líneas de evolución de la misma para conseguir mejorar sus propiedades.

En primer lugar se ha buscado la aplicabilidad de la estructura para que sea útil en diferentes aplicaciones, entre las que podemos encontrar estructuras codificables, estructuras de reflexión anómala, metasuperficies para Scattering difuso. A partir de la fase geométrica o de Pancharatnam-Berry se han conseguido diferentes estados de la celda unidad que permiten obtener un amplio abanico de fases en el coeficiente de reflexión.

En segundo lugar se ha mejorado sus dimensiones reduciendo las capas de la estructura, lo cual permite una fabricación más fácil. Además, la estructura desarrollada es más compacta, tanto en dimensiones de la celda como en grosor (un 50% mas fina).

En paralelo con la mejora de las dimensiones se ha tratado de mejorar el ancho de banda consiguiendo un aumento del 20%. Además, esta mejora elimina imperfecciones dentro de la banda con respecto a la estructura original (gap de absorción a 12.5 GHz).

Finalmente se ha evolucionado la estructura inicial para convertirla en una estructura conmutable mediante la inserción de diodos PIN. Gracias a la polarización en directa o inversa de los diodos se consigue obtener los diferentes estados de celda unidad para una estructura con codificación de 2 bits.

A la conclusión de este trabajo son muchas las líneas de desarrollo que quedan abiertas y se pueden plantear como líneas futuras.

Por una parte, se abre la posibilidad de diseñar una estructura RIS, dado que gracias a la fase geométrica es posible conseguir prácticamente cualquier fase en el coeficiente de reflexión.

Por otra parte, también se plantea como línea futura la simulación y fabricación de diseños complejos, como el patrón de ajedrez o algún otro patrón optimizado, que integren estas celdas unidad y contrastar si en la práctica los resultados coincidían con los simulados

Referencias

- [1] Askari, M.; Hutchins, D. A.; Thomas, P. J. et al. «Additive Manufacturing of Metamaterials: A Review». Additive Manufacturing, vol. 36, diciembre de 2020, p. 101562. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101562>.
- [2] Ali, A.; Mitra, A.; Aïssa, B. «Metamaterials and Metasurfaces: A Review from the Perspectives of Materials, Mechanisms and Advanced Metadevices». Nanomaterials, vol. 12, 2022, p. 1027. <https://doi.org/10.3390/nano12061027>
- [3] Sánchez, I. «Estudio numérico de la propagación de ondas electromagnéticas en metamateriales doblemente negativos». TFG en Física, facultad de ciencias de la Universidad de Valladolid. 2018. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/32059>
- [4] «Los metamateriales y sus aplicaciones en defensa» Sistemas de Observación y Prospectiva tecnológica, Ministerio de Defensa, Marzo 2011. https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/m/o/monografia_sopt_9.pdf
- [5] Represa, J. B.; Grande, A.; Barba, I. et al. «Metamateriales con índice de refracción negativo: una nueva frontera en Electromagnetismo». Ediciones Universidad de Valladolid, Revista de ciencias, n.º 1, 2013, pp. 15-20. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/11464>.
- [6] Li, A.; Singh, S.; and Sievenpiper, D. «Metasurfaces and their applications» Nanophotonics, vol. 7, n.º 6, 2018, pp. 989-1011. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0120>
- [7] Dolling, G.; Wegener, M.; Linden, S.; and Hormann, C., «Photorealistic images of objects in effective negative-index materials». Opt. Express, vol. 14, 2006, pp. 1842-1849 <https://doi.org/10.1364/OE.14.001842>
- [8] Cui, T.; Qi, M.; Wan, X. et al. «Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials». Light Sci Appl, vol. 3, 2014, e218. <https://doi.org/10.1038/lsa.2014.99>
- [9] Wu, H.; Liu, S.; Wan, X. et al. «Controlling Energy Radiations of Electromagnetic Waves via Frequency Coding Metamaterials». Adv. Sci., vol. 4, 2017, p. 1700098. <https://doi.org/10.1002/advs.201700098>.

- [10] Wong, A. M. H.; Eleftheriades, G. V. «Perfect Anomalous Reflection with a Bipartite Huygens' Metasurface». *Phys. Rev. X*, vol. 8, n.º 1, febrero de 2018, p. 011036. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.8.011036>.
- [11] Han, X.; Xu, H.; Chang, Y. et al., «Multiple Diffuse Coding Metasurface of Independent Polarization for RCS Reduction», in *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 162313-162321. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3021650>.
- [12] Joy, V.; Dileep, A.; Abhilash, P.V. et al. «Metasurfaces for Stealth Applications: A Comprehensive Review». *J. Electron. Mater.*, vol. 50, (2021), pp. 3129–3148. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-08927-3>
- [13] Costa, F and Borgese, M. «Electromagnetic Model of Reflective Intelligent Surfaces», in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, 2021, pp. 1577-1589. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3092217>.
- [14] Xu, Q.; Su, X.; Zhang, X. et al. «Mechanically reprogrammable Pancharatnam–Berry metasurface for microwaves». *Advanced Photonics*, vol. 4, n.º 01, febrero de 2022, p. 016002. <https://doi.org/10.1117/1.AP.4.1.016002>.
- [15] Saikia, M.; Ghosh, S. and Srivastava, K.V. «Switchable reflective metamaterial polarisation rotator». *Electron. Lett.*, vol. 52, 2016, pp. 1030-1032. <https://doi.org/10.1049/el.2016.0742>
- [16] Zhu, W. M.; Liu, A. Q.; Zhang, X. M. et al. «Switchable Magnetic Metamaterials Using Micromachining Processes». *Adv. Mater.*, vol. 23, 2011, pp. 1792-1796. <https://doi.org/10.1002/adma.201004341>
- [17] Yang, S.; Zhang, K.; Ding, X. et al. «Tailoring the scattering properties of coding metamaterials based on machine learning». *EPJ Applied Metamaterials*, vol. 8, 2021, p. 15. <https://doi.org/10.1051/epjam/2021006>.

Índice de Figuras

Figura 1.1: Diagrama esquemático de los meta-átomos (celdas unidad) en comparación con la longitud de onda activa del metamaterial [1].	5
Figura 1.2: . Concepto de invisibilidad: las ondas (líneas negras) «rodean» el objeto a ocultar (esfera interior) gracias al metamaterial que lo recubre (esfera exterior). La figura de la izquierda es una representación de este concepto en dos dimensiones y la figura de la derecha lo representa en tres dimensiones [4]......	6
Figura 1.3: Metasuperficie de alta impedancia para supresión de ondas superficiales. (A) Vista superior de la superficie de alta impedancia. (B) Vista lateral de la superficie de alta impedancia con vista ampliada de la celda unidad de resonancia [6]......	7
Figura 2.1: Grafismo de la clasificación de metamateriales en función de su permitividad (ϵ) y permeabilidad (μ) [2]......	8
Figura 2.2: Primera imagen; trazado de rayos de una varilla de metal en un vaso vacío. Segunda imagen; mismo escenario, pero el vaso está lleno de agua normal, $n = 1.3$, lo que lleva a la refracción ordinaria. Tercera imagen; el agua se sustituye por "agua" con un índice de refracción ficticio de $n = -1,3$ [7]......	9
Figura 2.3: Esquema donde se puede ver un ejemplo de compensación de fase al traspasar una lámina de un material DNG justo después de una de material DPS [3]	10
Figura 2.4: Lente plana de Pendry: una lámina de metamaterial (en este caso con $n = -1$) que enfoca los rayos de una fuente en dos puntos, uno interno y otro externo [5]......	11
Figura 2.5: Representación gráfica de una reflexión anómala sobre una metasuperficie: El rayo incidente representado en rojo, con un ángulo de incidencia θ_i , el cual es diferente del ángulo de reflexión θ_r del rayo reflejado de forma anómala, representado en verde. El rayo que cabría esperarse en una reflexión común está representado en negro discontinuo [10].	12
Figura 2.6: Distribución 3D del campo de Scattering. a) y b) sobre una placa metálica, c) y d) sobre una estructura metamaterial de reflexión difusa [11]......	13
Figura 2.7: Metasuperficie digital de 1 bit. (a) La metasuperficie digital de 1 bit se compone de sólo dos tipos de celda unidad: '0' y '1'. (b) Una celda unidad de parche metálico cuadrado (recuadro) para conformar los elementos '0' y '1' y las respuestas de fase correspondientes en un rango de frecuencias. c) y d) Dos metasuperficies de codificación periódica de 1 bit para modificar la dispersión de haces según las secuencias de codificación de elementos '0' y '1': (c) código 010101.../010101... y (d) código 010101.../ 101010.... [8]	14

Figura 2.8: Comparación de los campos de Scattering en respuesta a una misma onda EM (10.5 GHz) entre metamateriales con codificación de 1 bit (a y b) y 2 bits (c y d) [9].....15

Figura 2.9: Respuesta de fase PB. (a) La porción superior del metaátomo de PB es un par de Espirales de Arquímedes con los mismos parámetros geométricos: radio interior (1,9 mm), radio exterior (4,3 mm), altura (0,035 mm), ancho (0,4 mm) y número de vueltas (dos vueltas). Las esferas rosa y azul representan esquemáticamente la resolución de control de fase PB y los gradientes de variación para la polarización circular de derechas (Rrr) y de izquierdas (Rll), respectivamente. b), c) Amplitudes medidas de Rrr y Rll, respectivamente. d), e) Fase de PB medida en respuesta de Rrr y Rll, respectivamente, frente a diferentes ángulos de rotación [14].....16

Figura 2.10: Geometría de una estructura metamaterial absorbente conmutable. a) Vista frontal y vista lateral. b) y c) Diagrama de corriente [15].....18

Figura 2.11: a) Vista general del metamaterial magnético conmutable. b) Cada celda unidad consiste en dos semi-anillos cuadrados separados por un espacio de los cuales uno es móvil y el otro está fijo. En el estado de anillo abierto, la celda unidad tiene la forma "[]". La celda unidad se puede cambiar a c) el estado de anillo cerrado con la forma rectangular "[]" y d) el estado de contacto posterior con la forma "I" transformando toda la división móvil de semi-anillos al mismo tiempo. En e) vemos como es la estructura móvil ampliada [16].....19

Figura 2.12: a) Vista general de la metasuperficie PB reprogramable. b) Mecanismo de giro independiente de cada celda unidad que permite controlar la fase PB de cada una, en el caso de este estudio [14] cada celda puede alternar entre 28 fases diferentes.....19

Figura 2.13: Visual de como la superficie inteligente de reflexión permite sortear el obstáculo y que las ondas alcancen la antena receptora [13].20

Figura 3.1: Barra de herramientas del software CST Studio Suite.....22

Figura 3.2: Árbol de navegación.....23

Figura 3.3: Ejemplo de leyenda que se encontrará en resultados de simulaciones.23

Figura 3.4: Estructura inicial; (a) primer elemento '0', (b) segundo elemento '1', (c) diferencia de fase entre los elementos de 180°.25

Figura 4.1: Representación de la estructura inicial modelada en CST. A la izquierda vista frontal, a la derecha vista diagonal para apreciar la profundidad de las 3 capas.....27

Figura 4.2: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 1 bit de la estructura inicial.28

Figura 4.3: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 1 bit de la estructura inicial.....	29
Figura 4.4: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura inicial.	30
Figura 4.5: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura inicial.....	31
Figura 4.6: A la izquierda estructura vista de frente con un giro de 135° , lo que provoca los mismos resultados en coeficiente de reflexión que el giro de 45° . A la derecha la estructura vista de frente con un giro de 0° , lo que provoca los mismos resultados en coeficiente de reflexión que el giro de 90°	31
Figura 4.7: Vista frontal de cada anillo por separado, en la misma profundidad de capa que la estructura original. En la izquierda en anillo interior, en la derecha el anillo exterior.	33
Figura 4.8: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits del anillo interior de la estructura inicial, para su estudio en aislamiento.	33
Figura 4.9: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits del anillo interior de la estructura inicial, para su estudio en aislamiento.....	34
Figura 4.10: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits del anillo exterior de la estructura inicial, para su estudio en aislamiento.	35
Figura 4.11: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits del anillo exterior de la estructura inicial, para su estudio en aislamiento.....	35
Figura 4.12: Prueba directa de los dos anillos en el mismo plano con doble sustrato. A la izquierda vista frontal, y a la derecha vista diagonal para apreciar la profundidad.....	36
Figura 4.13: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de prueba con los dos anillos en el mismo plano y sustrato doble.....	37
Figura 4.14: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de prueba con los dos anillos en el mismo plano y sustrato doble.....	37

Figura 4.15: Prueba directa de los dos anillos en el mismo plano con sustrato simple. A la izquierda vista frontal de la estructura, y a la derecha vista diagonal para apreciar la profundidad.....	38
Figura 4.16: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de prueba con los dos anillos en el mismo plano y sustrato simple.....	39
Figura 4.17: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de prueba con los dos anillos en el mismo plano y sustrato simple.	39
Figura 4.18: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de estudio paramétrico del valor de grosor del anillo.	40
Figura 4.19: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de estudio paramétrico del valor del radio del anillo.....	41
Figura 4.20: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de estudio paramétrico del valor de la anchura de la celda unidad.	42
Figura 4.21: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de estudio paramétrico del valor de la longitud de los gaps del anillo.	43
Figura 4.22: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de estudio paramétrico del valor de la grosor del sustrato.	44
Figura 4.23: Vista frontal de la estructura de la segunda prueba intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.....	45
Figura 4.24: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de la segunda prueba con los dos anillos en el mismo plano.....	45
Figura 4.25: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de la segunda prueba con los dos anillos en el mismo plano.....	46
Figura 4.26: Vista frontal de la estructura de la tercera prueba intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.....	46

Figura 4.27: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de la tercera prueba con los dos anillos en el mismo plano.....	47
Figura 4.28: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura de la tercera prueba con los dos anillos en el mismo plano.....	47
Figura 4.29: Vista frontal de la estructura de la primera prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.....	48
Figura 4.30: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en un elemento de la codificación de 2 bits de la estructura de la primera prueba de barrido con los dos anillos en el mismo plano.....	48
Figura 4.31: Vista frontal de la estructura de la segunda prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.....	49
Figura 4.32: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en un elemento de la codificación de 2 bits de la estructura de la segunda prueba de barrido con los dos anillos en el mismo plano.....	49
Figura 4.33: Vista frontal de la estructura del mejor caso de la segunda prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.....	50
Figura 4.34: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura del mejor caso de la segunda prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.....	50
Figura 4.35: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en un elemento de la codificación de 2 bits de la estructura del mejor caso de la segunda prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano.	51
Figura 4.36: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura del mejor caso de la segunda prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano con un sustrato de 60 mils.....	51
Figura 4.37: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en un elemento de la codificación de 2 bits de la estructura del mejor caso de la segunda prueba de barrido intentando colocar los dos anillos en el mismo plano con sustrato de 60 mils..	52
Figura 4.38: Vista frontal de la estructura intentando colocar tres anillos en el mismo plano.	53

Figura 4.39: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura con tres anillos en el mismo plano.	53
Figura 4.40: Vista frontal de la estructura de la primera prueba intentando modelar un anillo sobre un sustrato de 60 mils con un buen ancho de banda.	54
Figura 4.41: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de la primera prueba de un anillo sobre sustrato de 60 mils.....	55
Figura 4.42: Vista frontal de la estructura de la segunda prueba intentando modelar un anillo sobre un sustrato de 60 mils con un buen ancho de banda.	55
Figura 4.43: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de la segunda prueba de un anillo sobre sustrato de 60 mils.....	56
Figura 4.44: Vista frontal de la estructura de la tercera prueba intentando modelar un anillo sobre un sustrato de 60 mils con un buen ancho de banda.	56
Figura 4.45: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de la tercera prueba de un anillo sobre sustrato de 60 mils. Variación del gap, manteniendo $r_1=1$ mm.....	57
Figura 4.46: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en la estructura de la tercera prueba de un anillo sobre sustrato de 60 mils. Variación de r_1 , manteniendo gap=2.1 mm.	57
Figura 4.47: Vista frontal de la estructura de la final modelando un anillo sobre un sustrato de 60 mils con un buen ancho de banda.	58
Figura 4.48: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura final de un anillo sobre un sustrato de 60 mils. ...	58
Figura 4.49: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura final de un anillo sobre sustrato de 60 mils.	59
Figura 4.50: Representación de la estructura inicial modelada con diodos para hacerla conmutable. A la izquierda vista frontal y a la derecha vista diagonal para percibir la profundidad.....	60

Figura 4.51: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura inicial modelada con diodos para hacerla conmutable.....61

Figura 4.52: Coeficiente de reflexión según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura inicial modelada con diodos para hacerla conmutable.....61

Figura 4.53: Representación de la estructura inicial modelada con 4 gaps. A la izquierda vista frontal y a la derecha vista diagonal para percibir la profundidad.62

Figura 4.54: Fase reflejada según la frecuencia de las ondas incidentes en los elementos de la codificación de 2 bits de la estructura inicial modelada con 4 gaps.62