

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



***Trabajo Fin de Grado***

**DISEÑO Y CARACTERIZACION DE UNA  
METASUPERFICIE BASADA EN FASE  
GEOMETRICA PARA LA REDUCCION DE LA  
RCS EN BANDA ANCHA**

**(Design and Characterization of a Geometric-  
Phase-Based Metasurface for Broadband RCS  
Reduction)**

Para acceder al Titulo de

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

Autor: Pablo Díaz González

Septiembre - 2025



# Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi familia, que siempre ha estado a mi lado en todo momento. Su apoyo y confianza han sido fundamentales para llegar hasta aquí, y este logro también es suyo.

También quiero dedicar unas palabras a mis amigos de Torrelavega, los de toda la vida, que me han acompañado en cada etapa. A ellos se suman los amigos que hice durante mi Erasmus en Turín, con quienes compartí una experiencia inolvidable y que, en algunos casos, he tenido la suerte de volver a encontrarme en Madrid y acogerme como si fuese uno más.

Por último, quiero agradecer a mi tutor de trabajo de fin de grado, Óscar Fernández, por su dedicación y orientación a lo largo del desarrollo de este trabajo, así como al conjunto de profesores que me han acompañado durante la carrera, transmitiéndome los conocimientos y la motivación necesarios para completar esta etapa.



# Resumen

En este trabajo se ha diseñado y optimizado una metasuperficie pasiva orientada a la reducción de la sección radar (RCS), buscando simultáneamente un ancho de banda amplio y un comportamiento robusto frente a incidencia oblicua. El proceso se ha desarrollado en varias iteraciones de simulación con CST Studio Suite, ajustando parámetros geométricos y evaluando la respuesta en amplitud y fase. Se han explorado además configuraciones basadas en fase geométrica de Pancharatnam–Berry y en patrones de codificación espacial (columnas, tablero de ajedrez, disposición aleatoria), con el objetivo de dispersar la energía reflejada y mejorar la estabilidad angular. Los resultados muestran que es posible alcanzar un diseño compacto, eficiente y con potencial aplicación en comunicaciones y en tecnologías de reducción de firma radar.

**Palabras clave:** Metasuperficies, RCS, reducción de firma radar, fase Pancharatnam–Berry, codificación espacial, incidencia oblicua, banda ancha.



# Abstract

This project presents the design and optimization of a passive metasurface aimed at reducing the radar cross section (RCS), while ensuring broadband operation and robustness under oblique incidence. The work has been carried out through several iterations in CST Studio Suite, tuning geometrical parameters and evaluating both amplitude and phase responses. Configurations based on Pancharatnam–Berry geometric phase and spatial coding patterns (columns, chessboard, random distribution) have been explored to achieve diffuse reflection and improved angular stability. The results demonstrate that a compact and efficient design can be obtained, laying the foundations for practical applications in communications and radar signature reduction.

**Keywords:** Metasurfaces, RCS, radar signature reduction, Pancharatnam–Berry phase, spatial coding, oblique incidence, broadband.



# Lista de acrónimos

- **RCS:** Radar Cross Section (Sección Transversal Radar).
- **RIS:** Reconfigurable Intelligent Surface (Superficie Inteligente Reconfigurable).
- **RAM:** Radar Absorbing Material (Material Absorbente de Radar).
- **EM:** Electromagnético/a.
- **PB:** Pancharatnam–Berry (fase geométrica).
- **GA:** Genetic Algorithm (Algoritmo Genético).
- **PSO:** Particle Swarm Optimization (Optimización por Enjambre de Partículas).
- **CP:** Circular Polarization (Polarización Circular).
- **RHCP:** Right-Hand Circular Polarization (Polarización Circular Derecha).
- **LHCP:** Left-Hand Circular Polarization (Polarización Circular Izquierda).
- **TE/TM:** Transverse Electric / Transverse Magnetic.
- **CST:** Computer Simulation Technology Studio Suite.
- **FEM:** Finite Element Method (Método de los Elementos Finitos).
- **SRR:** Split Ring Resonator (Resonador de Anillo Partido).
- **S-parameters:** Parámetros de dispersión ( $S_{ij}$ ).
- **X, Ku, Ka, K, S:** Denominaciones estándar de bandas de microondas.
- **IoT:** Internet of Things.
- **PCB:** Printed Circuit Board.
- **PEC:** Perfect Electric Conductor (Conductor Eléctrico Perfecto).
- **GHz:** Gigahertzios.



# Índice general

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                                             | <b>1</b>  |
| <b>2. Marco Teórico</b>                                            | <b>3</b>  |
| 2.1. Introducción                                                  | 3         |
| 2.2. Radar Cross Section, RCS                                      | 3         |
| 2.2.1. Técnicas clásicas de reducción de RCS                       | 4         |
| 2.3. Metasuperficies electromagnéticas para la reducción de la RCS | 5         |
| 2.4. Mecanismos de reducción de RCS por las metasuperficies        | 6         |
| 2.4.1. Absorción                                                   | 6         |
| 2.4.2. Reflexion anómala                                           | 6         |
| 2.4.3. Difusión                                                    | 7         |
| 2.4.4. Aplicaciones de la codificación para la RCS.                | 9         |
| 2.5. Diseño de metasuperficies: obtención y control de fase        | 9         |
| 2.5.1. Diseño Ad-hoc                                               | 9         |
| 2.5.2. Diseño por gradiente de fase                                | 10        |
| 2.6. Problemática y retos                                          | 10        |
| 2.6.1. Incidencia oblicua                                          | 10        |
| 2.6.2. Ancho de banda                                              | 11        |
| 2.6.3. Polarización                                                | 11        |
| <b>3. Metodología</b>                                              | <b>13</b> |
| 3.1. Herramientas utilizadas                                       | 13        |
| 3.1.1. CST Studio Suite                                            | 13        |
| 3.1.2. MATLAB                                                      | 14        |
| 3.2. Procedimiento general                                         | 15        |
| 3.3. Configuración de simulaciones en CST                          | 16        |
| 3.3.1. Geometría y condiciones de contorno                         | 16        |
| 3.3.2. Excitación en polarización circular (CP)                    | 16        |
| 3.3.3. Configuración de frecuencia                                 | 16        |
| 3.3.4. Simulaciones paramétricas e incidencia oblicua              | 17        |
| <b>4. Desarrollo del trabajo</b>                                   | <b>19</b> |
| 4.1. Diseño inicial de la celda unidad                             | 19        |
| 4.1.1. Parámetros de diseño iniciales                              | 19        |
| 4.1.2. Paremetros de diseño basicos                                | 19        |
| 4.1.3. Condiciones de contorno y entorno de simulación             | 20        |
| 4.1.4. Uso de la fase geométrica                                   | 20        |
| 4.1.5. Objetivos de la metasuperficie                              | 20        |
| 4.2. Proceso de optimización y figura inicial                      | 20        |
| 4.2.1. Optimización del parámetro $\beta$                          | 21        |
| 4.2.2. Optimización del parámetro g                                | 22        |
| 4.2.3. Optimización del parámetro L                                | 24        |
| 4.2.4. Optimización del parámetro L.diag                           | 25        |
| 4.2.5. Optimización del parámetro R                                | 27        |
| 4.2.6. Conclusiones de la primera iteración                        | 27        |
| 4.3. Segunda iteración de optimización                             | 28        |
| 4.3.1. Valores centrales y rangos refinados                        | 29        |
| 4.3.2. Optimización del parámetro $\beta$ – segunda iteración      | 30        |
| 4.3.3. Optimización del parámetro g – segunda iteración            | 31        |

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.4. Optimización del parámetro L – segunda iteración . . . . .                 | 33        |
| 4.3.5. Optimización del parámetro L <sub>diag</sub> – segunda iteración . . . . . | 34        |
| 4.3.6. Optimización del parámetro R – segunda iteración . . . . .                 | 36        |
| 4.3.7. Conclusiones de la segunda iteración . . . . .                             | 36        |
| 4.4. Tercera iteración de optimización . . . . .                                  | 38        |
| 4.4.1. Metodología de la tercera iteración . . . . .                              | 38        |
| 4.4.2. Comparación de parámetros clave . . . . .                                  | 39        |
| 4.5. Cuarta iteración de optimización . . . . .                                   | 40        |
| 4.6. Figura final . . . . .                                                       | 41        |
| 4.7. Comparación de codificaciones espaciales . . . . .                           | 43        |
| 4.7.1. Codificación en columnas . . . . .                                         | 43        |
| 4.7.2. Codificación tipo chessboard . . . . .                                     | 44        |
| 4.7.3. Comparación de RCS en incidencia normal . . . . .                          | 45        |
| 4.7.4. Comparación de RCS en incidencia oblicua . . . . .                         | 46        |
| <b>5. Líneas Futuras</b>                                                          | <b>47</b> |
| 5.1. Metasuperficies Reconfigurables (RIS) . . . . .                              | 47        |
| 5.2. Metasuperficies independientes de polarización . . . . .                     | 48        |
| 5.3. Metasuperficies de banda ancha . . . . .                                     | 48        |
| 5.4. Metasuperficies con codificación espacial . . . . .                          | 49        |
| <b>6. Conclusión</b>                                                              | <b>51</b> |
| <b>A. Simulaciones en CST Studio Suite</b>                                        | <b>53</b> |
| <b>B. Scripts en MATLAB</b>                                                       | <b>55</b> |
| B.1. SeparaParametros.m . . . . .                                                 | 55        |
| B.2. SPar_Individual.m . . . . .                                                  | 56        |
| B.3. SPar_12.m . . . . .                                                          | 57        |
| B.4. FaseDiffVSParam.m . . . . .                                                  | 59        |
| B.5. FaseDiffVSAngulo.m . . . . .                                                 | 61        |
| B.6. FaseDiffVSAngulo.m . . . . .                                                 | 63        |
| B.7. CartesianRCS.m . . . . .                                                     | 64        |
| B.8. RCSvsFreq.m . . . . .                                                        | 65        |
| <b>Bibliografía</b>                                                               | <b>66</b> |

# Índice de figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Representación esquemática de la RCS monoestática: la onda plana incide sobre el blanco y es reflejada hacia el radar emisor/receptor. . . . .                                                                                                                                           | 3  |
| 2.2. Comparación cualitativa de RCS según la geometría. La esfera dispersa más (alta RCS), el cubo en una dirección (media) y el avión furtivo muy poco (baja). . . . .                                                                                                                       | 4  |
| 2.3. Esquema de absorción de una onda plana por conos absorbentes sobre una superficie metálica. La flecha azul gruesa representa la onda incidente, mientras que las flechas grises más finas indican la energía disipándose en distintas direcciones, sin alcanzar el radar. . . . .        | 4  |
| 2.4. Comparación de RCS entre los aeroplanos B-2 y F117 . . . . .                                                                                                                                                                                                                             | 4  |
| 2.5. Esquema de comunicación asistida por <i>Reconfigurable Intelligent Surfaces</i> (RIS) . . . .                                                                                                                                                                                            | 5  |
| 2.6. Bandas de frecuencia X, Ku y Ka, junto con las zonas intermedias representadas en una misma línea. . . . .                                                                                                                                                                               | 6  |
| 2.7. Representación gráfica de la refracción anómala . . . . .                                                                                                                                                                                                                                | 7  |
| 2.8. Diseños de metasuperficies dieléctricas codificadas con diferente número de bits. . . .                                                                                                                                                                                                  | 8  |
| 2.9. Diseño de metasuperficie en patrón de tablero de ajedrez (1 bit: '0' y '1'). . . . .                                                                                                                                                                                                     | 8  |
| 2.10. Distribuciones aleatorias de bits en metasuperficies. . . . .                                                                                                                                                                                                                           | 8  |
| 2.12. Metasuperficie de Pancharatnam-Berry: Los elementos rotados ( $\phi = 60^\circ$ ) generan un gradiente de fase geométrico ( $\Delta\theta = 120^\circ$ ). Los arcos representan meta-átomos con retardos de fase progresivos, donde la rotación geométrica induce un desfase doble. . . | 10 |
| 3.1. Logo de el programa de simulación electromagnetica CST Studio Suite . . . . .                                                                                                                                                                                                            | 13 |
| 3.2. Menú de opciones del puerto en CST, donde podemos seleccionar la medición de polarización circular para usar el RCP y LCP como modos de excitación . . . . .                                                                                                                             | 14 |
| 3.3. Logo del programa MatLab . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                       | 15 |
| 4.1. Metasuperficie inicial simulada con los parametros de la tabla 4.2 . . . . .                                                                                                                                                                                                             | 21 |
| 4.2. Resultados del parámetro SZMax(1)SZmax(2) y SZMax(2)SZmax(2) de la figura inicial 4.1, y simulación RunID=1 . . . . .                                                                                                                                                                    | 21 |
| 4.3. Resultados del parametro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parametro beta . . . .                                                                                                                                                                                                 | 22 |
| 4.4. Resultados del parametro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parametro beta . . . .                                                                                                                                                                                                 | 22 |
| 4.5. Resultados del parametro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro g . . . .                                                                                                                                                                                                    | 23 |
| 4.6. Resultados del parametro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro g . . . .                                                                                                                                                                                                    | 24 |
| 4.7. Resultados del parámetro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro L . . . .                                                                                                                                                                                                    | 25 |
| 4.8. Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro L . . . .                                                                                                                                                                                                    | 25 |
| 4.9. Resultados del parámetro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro L.diag . . .                                                                                                                                                                                                 | 26 |
| 4.10. Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro L.diag . . .                                                                                                                                                                                                | 27 |
| 4.11. Resultados del parámetro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro R . . . .                                                                                                                                                                                                   | 28 |
| 4.12. Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro R . . . .                                                                                                                                                                                                   | 28 |
| 4.13. Comparación de la magnitud $ S $ para SZMax(1)ZMax(2) entre la Figura inicial (Fig 1) y la optimizada (Fig 2). . . . .                                                                                                                                                                  | 29 |
| 4.14. Comparación de la magnitud $ S $ para SZMax(2)ZMax(2) entre la Figura inicial (Fig 1) y la optimizada (Fig 2). . . . .                                                                                                                                                                  | 30 |
| 4.15. Resultados del parámetro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro beta en la segunda iteración . . . . .                                                                                                                                                                      | 31 |
| 4.16. Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro beta en la segunda iteración . . . . .                                                                                                                                                                      | 31 |
| 4.17. Resultados del parámetro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro g en la segunda iteración . . . . .                                                                                                                                                                         | 32 |

|                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.18. Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro g en la segunda iteración . . . . .                                                                                            | 33 |
| 4.19. Resultados del parámetro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro L en la segunda iteración . . . . .                                                                                            | 34 |
| 4.20. Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro L en la segunda iteración . . . . .                                                                                            | 34 |
| 4.21. Resultados del parámetro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro L <sub>diag</sub> en la segunda iteración . . . . .                                                                            | 35 |
| 4.22. Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro L <sub>diag</sub> en la segunda iteración . . . . .                                                                            | 36 |
| 4.23. Resultados del parámetro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro R en la segunda iteración . . . . .                                                                                            | 37 |
| 4.24. Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro R en la segunda iteración . . . . .                                                                                            | 37 |
| 4.25. Comparación de SZMax(2)ZMax(2) entre Fig. 2 y Fig. 3. . . . .                                                                                                                                              | 38 |
| 4.26. Comparación de SZMax(1)ZMax(2) entre Fig. 2 y Fig. 3. . . . .                                                                                                                                              | 38 |
| 4.27. Comparativa de SZMax(1)ZMax(2) entre la configuración mejorada y las obtenidas en la primera y segunda iteración. . . . .                                                                                  | 39 |
| 4.28. Comparativa de SZMax(2)ZMax(2) entre la configuración mejorada y las obtenidas en la primera y segunda iteración. . . . .                                                                                  | 40 |
| 4.29. Comparación del parámetro L frente a un ángulo de incidencia oblicua de 45°. . . . .                                                                                                                       | 41 |
| 4.30. Diseño final de la celda unidad optimizada en CST Studio. . . . .                                                                                                                                          | 42 |
| 4.31. Comparación de los parámetros S obtenidos para la celda optimizada final. . . . .                                                                                                                          | 42 |
| 4.32. Comparación de la diferencia de fase de la figura optimizada final frente a distintos ángulos de incidencia. . . . .                                                                                       | 43 |
| 4.33. Resultados de la codificación en columnas (N6M6). . . . .                                                                                                                                                  | 43 |
| 4.34. Corte en $\theta$ para la codificación en columnas a $f = 11,5$ GHz. Se aprecian dos haces principales simétricos y una fuerte reducción en la dirección normal. . . . .                                   | 44 |
| 4.35. Resultados de la codificación tipo chessboard (N6M6). . . . .                                                                                                                                              | 44 |
| 4.36. Corte en $\theta$ para la codificación tipo chessboard a $f = 11,5$ GHz. Se aprecian cuatro haces principales y una reducción significativa en la retrodispersión. . . . .                                 | 45 |
| 4.37. Comparación de RCS vs frecuencia en incidencia normal ( $\theta = 0^\circ$ ). Tanto la codificación en columnas como la tipo <i>chessboard</i> muestran reducciones significativas respecto a PEC. . . . . | 45 |
| 4.38. Comparación de RCS vs frecuencia bajo incidencia oblicua. . . . .                                                                                                                                          | 46 |

# Capítulo 1

## Introducción

La *Radar Cross Section* (RCS) es una magnitud que mide la potencia reflejada por un objeto cuando es iluminado por una onda electromagnética, en relación con la potencia de referencia dispersada por una superficie ideal. En términos prácticos, la RCS determina cuán detectable resulta un objeto para un radar. Reducirla es fundamental en múltiples escenarios, ya que permite disminuir la probabilidad de detección y mejorar la discreción de plataformas aéreas, navales o terrestres. Más allá del ámbito militar, la reducción de RCS también presenta aplicaciones en entornos civiles, como la mitigación de interferencias electromagnéticas en sistemas de comunicación o la mejora en la fiabilidad de enlaces inalámbricos en entornos saturados.

A lo largo de las últimas décadas, se han empleado diversas estrategias para reducir la RCS de diferentes estructuras. Una de las más extendidas es el uso de materiales absorbentes de radar (*Radar Absorbing Materials*, RAM), que disipan la energía incidente. No obstante, su efectividad suele estar limitada a bandas de frecuencia estrechas y requieren grosores considerables, lo que compromete su viabilidad práctica. Otra aproximación tradicional se basa en el diseño de geometrías furtivas o *stealth*, capaces de desviar la energía reflejada fuera del campo de visión del radar. Si bien resultan eficaces en determinados casos, estas configuraciones suelen afectar a la aerodinámica de aeronaves y a la funcionalidad estructural, además de no ser aplicables universalmente a todas las plataformas.

En los últimos años han surgido las metasuperficies como una solución innovadora para el control de ondas electromagnéticas. Estas estructuras bidimensionales, compuestas por celdas periódicas de tamaño sublongitud de onda, permiten manipular parámetros fundamentales de la onda reflejada, como su amplitud, fase y polarización. A diferencia de los materiales voluminosos o de las geometrías complejas, las metasuperficies ofrecen diseños ligeros, compactos y de fácil integración sobre superficies ya existentes. Estas características las convierten en una herramienta versátil para aplicaciones que van desde la mejora de la eficiencia en sistemas de comunicación hasta la reducción de la sección radar de diferentes plataformas. En este último ámbito, se han publicado numerosos trabajos que validan su capacidad para dispersar la energía incidente y lograr reducciones de RCS más estables y amplias en frecuencia que con técnicas convencionales.

El enfoque adoptado en este trabajo se basa en la fase geométrica o fase de Pancharatnam–Berry (PB), un mecanismo que permite controlar la fase de la onda reflejada mediante la rotación de los elementos de la celda, sin necesidad de modificar sus dimensiones físicas. Este principio resulta especialmente atractivo porque garantiza un comportamiento de fase estable frente a variaciones en frecuencia, lo que facilita alcanzar un ancho de banda más amplio. Además, el uso de la fase PB permite implementar configuraciones de codificación espacial en la metasuperficie, distribuyendo distintos estados de fase de forma controlada para dispersar la energía y reducir la detectabilidad del sistema bajo diferentes ángulos de incidencia.

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es diseñar y optimizar una metasuperficie pasiva orientada a la reducción de la sección radar (RCS). Se busca alcanzar un diseño que no solo sea efectivo en condiciones de incidencia normal, sino que también muestre un comportamiento robusto frente a ángulos de incidencia oblicuos. Asimismo, se persigue que el funcionamiento se mantenga en un rango de frecuencias amplio, de manera que la estructura presente un ancho de banda considerable. Dentro de este marco, también se exploran diferentes patrones de codificación espacial, como distribuciones en

columnas, configuraciones tipo tablero de ajedrez y disposiciones aleatorias, con el fin de dispersar la energía reflejada y mejorar la estabilidad angular.

Para alcanzar los objetivos planteados, se ha seguido una metodología basada en simulaciones numéricas y análisis iterativo de resultados. En primer lugar, se realizaron barridos paramétricos de las dimensiones principales de la celda unitaria en CST Studio Suite, variando parámetros geométricos como  $\beta$ ,  $g$ ,  $L$ ,  $L_{\text{diag}}$ ,  $R$ ,  $\alpha$  y  $\gamma$ . Los resultados de amplitud y fase obtenidos en estas simulaciones fueron posteriormente procesados en MATLAB, donde se analizaron magnitudes como el ancho de banda efectivo y la robustez frente a distintos ángulos de incidencia. El proceso de diseño se organizó en iteraciones sucesivas, comparando configuraciones y seleccionando aquellas que mostraban un mejor equilibrio entre reducción de RCS, estabilidad angular y amplitud de banda, hasta llegar a la propuesta final.

Este trabajo se organiza en varios capítulos que reflejan de forma ordenada el desarrollo del proyecto. En el Capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos, incluyendo la definición de la RCS, los mecanismos tradicionales de reducción, el concepto de metasuperficie y la fase geométrica de Pancharatnam–Berry. El Capítulo 3 describe la metodología empleada, detallando las herramientas de simulación utilizadas y el procedimiento de análisis. En el Capítulo 4 se expone el desarrollo del trabajo, presentando las distintas iteraciones de diseño, los resultados obtenidos y la figura final propuesta, así como la evaluación de las codificaciones espaciales implementadas. Finalmente, el Capítulo 5 recoge las posibles líneas futuras de investigación. El documento se completa con un apéndice donde se incluyen las tablas con el registro de todas las simulaciones realizadas.

## Capítulo 2

# Marco Teórico

### 2.1. Introducción

Durante este capítulo, se explicarán los conceptos principales que se deben conocer para entender este proyecto. Se comenzará con una explicación teórica de cuál es el problema a resolver, la Radar Cross Section, después se pondrán sobre la mesa las bases para poder mitigar este problema, como mecanismos de reducción; como métodos de diseño principales (Ad-hoc) y gradiente de fase. También se mencionará la problemática del proyecto y los retos; como pueden ser la incidencia oblicua, el ancho de banda y la polarización.

### 2.2. Radar Cross Section, RCS

Se define el Radar Cross Section (RCS), o Sección Transversal Radar, como la medida que cuantifica la detectabilidad de un objeto ante un sistema radar. En términos físicos, representa el área que capta la onda incidente y la refleja en la dirección de la fuente de emisión [1].

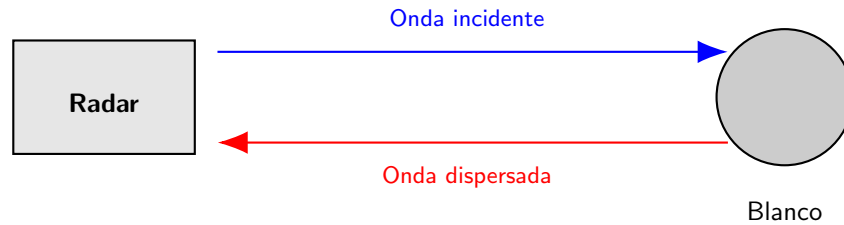


Figura 2.1: Representación esquemática de la RCS monoestática: la onda plana incide sobre el blanco y es reflejada hacia el radar emisor/receptor.

La RCS no depende de del tamaño del objeto, sino también de su forma, orientación, materiales y de la frecuencia y ángulo de incidencia. Esta propiedad es clave en aplicaciones militares, pero también tienen relevancia en escenarios comunes, como en la reducción de interferencias en entornos radar [1]. La ecuación clásica del RCS para un radar monoestático se define como:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{\|E_s\|^2}{\|E_i\|^2} \quad (2.1)$$

siendo  $E_s$  el campo dispersado,  $E_i$  el campo incidente y  $r$  es la distancia entre el radar y el objetivo. Esta expresión supone una onda plana incidente y un campo lejano [2].

La RCS no es un valor fijo, sino que varía según múltiples factores. Depende directamente de la frecuencia y el ángulo de la onda de radar, ya que estos determinan cómo interactúa la onda con el objeto. La polarización (TE/TM), la forma del blanco (su geometría y bordes) y las propiedades del material (como conductividad y permitividad) también modifican significativamente cómo se dispersa la señal. En esencia, la RCS representa la eficiencia con que un objeto refleja las ondas electromagnéticas hacia el radar, y esta capacidad cambia según las condiciones de iluminación y las características propias del objetivo.

Las metasuperficies ofrecen una alternativa moderna a los métodos tradicionales de reducción del RCS. En lugar de absorber la energía incidente, permiten modificar la fase de la onda reflejada localmente [3]. Esto posibilita redistribuir la energía reflejada en direcciones diferentes a la especular, evitando que regrese hacia el radar. Este principio se basa en generar una interferencia destructiva entre la onda reflejada por el objeto y la onda modificada por la metasuperficie:

$$\Gamma_{\text{Total}} = \Gamma_{\text{Objeto}} + \Gamma_{\text{MS}} \approx 0 \quad (2.2)$$

Para que esto sea efectivo, los elementos que componen la metasuperficie deben inducir un retardo de fase preciso en cada punto.

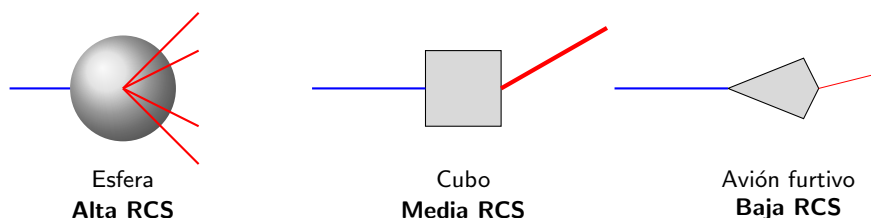


Figura 2.2: Comparación cualitativa de RCS según la geometría. La esfera dispersa más (alta RCS), el cubo en una dirección (media) y el avión furtivo muy poco (baja).

### 2.2.1. Técnicas clásicas de reducción de RCS

Antes de profundizar en las metasuperficies, conviene conocer las soluciones que se usaban anteriormente para reducir la firma radar. Básicamente, se dividen en tres enfoques.

Existen los llamados RAM, que son recubrimientos absorbentes en donde se convierte la energía del radar en calor dentro del material; la onda entra y gracias a la su construcción se disipa en forma de calor. Los típicos ejemplos son los piramidales hechos de espuma y son bastante buenos en la frecuencia de diseño, pero son a su vez de una banda bastante estrecha y ocupan bastante espacio.

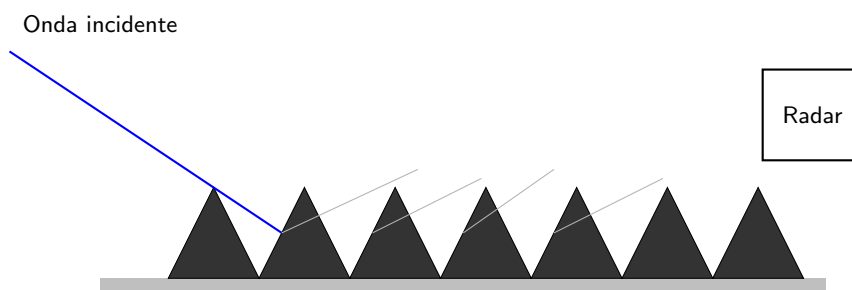


Figura 2.3: Esquema de absorción de una onda plana por conos absorbentes sobre una superficie metálica. La flecha azul gruesa representa la onda incidente, mientras que las flechas grises más finas indican la energía disipándose en distintas direcciones, sin alcanzar el radar.

En las geometrías stealth no se usan materiales diferentes, sino que jugaremos con los ángulos y la curvatura de los materiales con la intención de que el eco no vuelva al emisor. Hay algunas variantes como puede ser el F-117 para planos inclinados, o el B-2 para curvas suaves. Las principales ventajas son la ausencia de materiales extra, y que cubre más frecuencias; pero sin embargo puede empeorar la aerodinámica y la complicación para geometrías muy complejas [4].

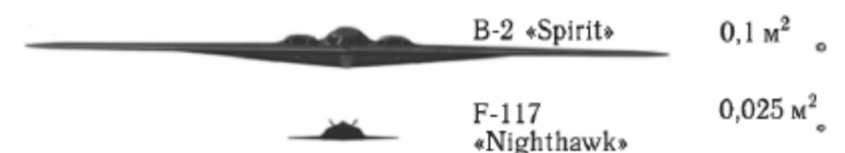


Figura 2.4: Comparación de RCS entre los aeroplanos B-2 y F117

## 2.3. Metasuperficies electromagnéticas para la reducción de la RCS

Las metasuperficies son estructuras bidimensionales compuestas por elementos resonantes, o también llamados metaátomos, que manipulan las ondas electromagnéticas. Se puede decir que estas superficies son una versión plana más pequeña de los metamateriales de tres dimensiones. [1] Las metasuperficies nos permiten un control de las ondas incidentes mediante la manipulación de la amplitud, la fase y/o polarización. Estas propiedades pueden utilizarse para diferentes aplicaciones como:

Por tanto, podemos encontrar tanto usos de metasuperficies conversores de polarización, absorción de ondas EM [3], o el caso de este trabajo, poder modificar la "Radar Cross Section" (RCS) de un "target" determinado mediante técnicas de cancelación de fase [2].

Este tipo de metasuperficies aporta ventajas frente a estructuras convencionales. Por ejemplo, los absorbentes tradicionales usados para la reducción radar son pesados y voluminosos mientras que las metasuperficies permiten redireccionar las ondas [3] con bajo peso y grosores subwavelength; o el caso de las "Reconfigurable Intelligent Surfaces" (RIS), que nos permiten un control de la fase de ondas reflejadas de una estación base permitiendo experimentar caminos alternativos que nos mejoran la señal recibida [4].

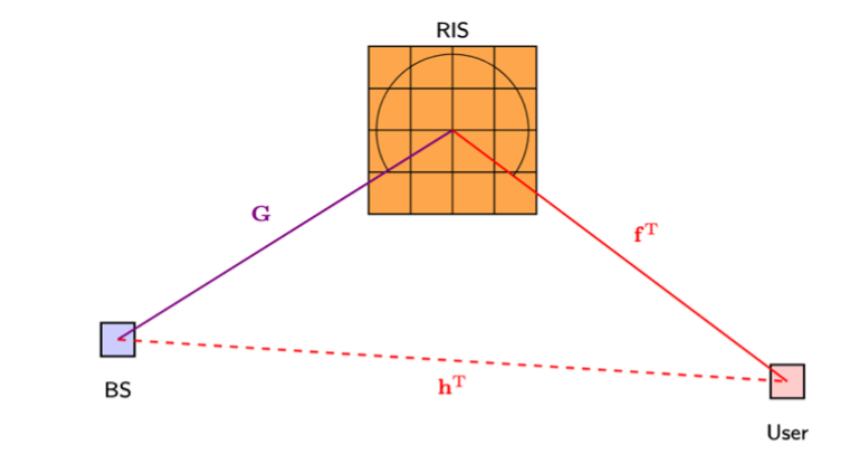


Figura 2.5: Esquema de comunicación asistida por *Reconfigurable Intelligent Surfaces* (RIS)

Las metasuperficies presentan varias ventajas frente a las soluciones tradicionales como las RAM o las geometrías stealth. Son ultradelgadas y ligeras, permiten un control direccional de la onda reflejada; permiten operación multibanda y bajo distintos ángulos de incidencia con el diseño adecuado [4].

Las metasuperficies han abierto una gran vía de aplicaciones gracias a la reducción de la RCS al ofrecer soluciones ligeras, delgadas y adaptables frente a métodos tradicionales como las mencionadas RAM o las geometrías stealth. Su capacidad de manipular ondas EM mediante estos diseños de sublongitud de onda las hace ideales para aplicaciones militares, aeronáuticas y navales donde el bajo perfil radar es crítico.

En aeronáutica militar estas estructuras pueden implementarse para minimizar la detectabilidad de las aeronaves frente a radares enemigos, principalmente en las bandas X, Ku y Ka. Algunos ejemplos de implementación en concreto pueden ser el uso de estas metasuperficies en las alas y los fuselajes de los aviones para dispersar o absorber las ondas incidentes o en las entradas de aire de los motores para reducir las reflexiones [referencias]. Como se ha mencionado antes la principal ventaja a estos métodos es el menor peso y grosor.

Otro posible uso es en el uso de vehículos navales dado que estos poseen grandes superficies metálicas que provocan grandes reflexiones de las señales radar. En estos casos se podría implementar el uso de estas estructuras para redirigir las reflexiones hacia el mar, o para absorber las frecuencias críticas como puede ser la banda S para los radares de búsqueda, como pueden ser las fragatas "Zumwalt"

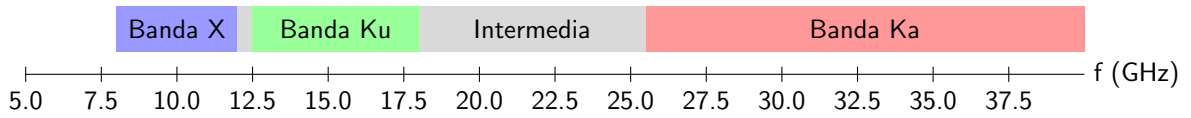


Figura 2.6: Bandas de frecuencia X, Ku y Ka, junto con las zonas intermedias representadas en una misma línea.

de los Estados Unidos de América que usen este tipo de estructuras. [Referencia] Actualmente las metasuperficies se utilizan en casos y proyectos reales como pueden ser:

- F-35 Lightning II: usa metasuperficies en los bordes de las alas y bahías de armamento para la dispersión controlada [5].
- Proyecto europeo “Miras”: uso de metasuperficies en satélites para reducir la RCS en bandas milimétricas. [6]

| Mecanismo         | Aplicación              | Ventajas                           |
|-------------------|-------------------------|------------------------------------|
| Reflexión anómala | Alas de avión           | No requiere materiales absorbentes |
| Absorción         | Recubrimiento de drones | Eficaz en banda ancha              |
| Difusión          | Casco de barcos         | Reduce picos de RCS                |

Tabla 2.1: Comparación de mecanismos de reducción de RCS

## 2.4. Mecanismos de reducción de RCS por las metasuperficies

### 2.4.1. Absorción

En las metasuperficies, la absorción se logra combinando resonadores diseñados para “encajar” la impedancia de la superficie con la del aire y maximizar las pérdidas internas. Así, la señal entrante no vuelve al radar, sino que se disipa dentro de la capa de la metaestructura.

Cada celda, por ejemplo, un anillo resonante, está diseñada para resonar a la frecuencia objetivo. Sobre un sustrato dieléctrico fino y con un plano de tierra posterior, se alcanza la condición de impedancia crítica ( $Z_{meta} \simeq Z_0$ ), de modo que ni se refleja ni se transmite: toda la energía se convierte en calor por pérdidas dieléctricas y óhmicas.

Las principales ventajas son el grosor, del orden de  $\lambda/10$  que es muy por debajo de los RAM tradicionales, la sintonización más sencilla mediante los cambios geométricos y la posibilidad de tener varias bandas de operación con gradientes de fase o diseños multi-resonantes. Sin embargo, las principales limitaciones son la dependencia angular en incidencias oblicuas, y las pérdidas no ideales dada la calidad del material (baja constante dieléctrica o alta conductividad).

### 2.4.2. Reflexión anómala

La ley de Snell clásica describe el comportamiento de las ondas al incidir sobre una interfaz plana entre dos medios homogéneos. En el caso de la reflexión, establece que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia con respecto a la normal a la superficie. Matemáticamente, se expresa como:

$$\theta_r = \theta_i \quad (2.3)$$

donde es  $\theta_i$  el ángulo de incidencia y  $\theta_r$  es el ángulo de reflexión. Esta igualdad se cumple bajo condiciones de medios homogéneos y superficies planas, como ocurre en materiales convencionales.

Sin embargo, cuando se introduce una metasuperficie sobre la interfaz, que impone una distribución espacial no uniforme de fase en la superficie, esta simetría angular puede romperse. Es en este contexto donde aparece la ley generalizada de Snell, que permite controlar la dirección de la onda reflejada a través del gradiente de fase introducido por la metasuperficie:

$$n_i \sin(\theta_i) - n_r \sin(\theta_r) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\Phi(x)}{dx} \quad (2.4)$$

La ley de Snell clásica es válida principalmente para interfaces planas y homogéneas donde no haya variaciones significativas en la superficie ni en el material, como pueden ser: agua a vidrio, aire a vidrio o entre dos dieléctricos. Si en esa interfaz se sitúa una metasuperficie cuyo coeficiente de reflexión presenta una cierta fase  $\Phi(x)$  la Ley de Snell pasa a presentar la forma (x): ley de generalizada de Snell.

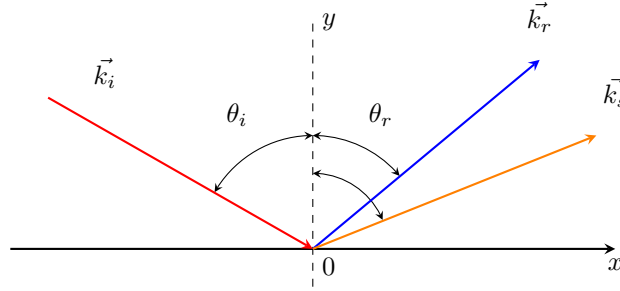


Figura 2.7: Representación gráfica de la refracción anómala

Esta formulación permite el control preciso de la dirección de propagación de la onda reflejada ajustando el gradiente de la distribución de fases de la metasuperficie. Este tipo de reflexión se denomina reflexión anómala y es extremadamente útil para aplicaciones como la redirección del haz (beamsteering) o la conformación de este (beamforming).

Para que esta compensación de fase sea efectiva, los metaátomos deben de estar espaciados a una distancia menor de la longitud de onda; deben de cubrir un rango de fase de 0 a  $2\pi$  con buena eficiencia; y se deben de minimizar las pérdidas y las reflexiones no deseadas.

Para que la compensación de fase funcione, los metaátomos deben de cumplir 3 condiciones clave:

- Distancia sub- $\lambda$ : deben estar separados menos de una longitud de onda para evitar lóbulos especulares indeseados.
- Cobertura  $0 - 2\pi$ : cada celda debe poder impartir fases en todo el rango con buena eficiencia.
- Pérdidas mínimas: para no “comer” energía útil ni generar reflejos secundarios.

Al imponer un gradiente de fase continuo sobre la superficie, el haz incidente se desvía de la dirección especular. En lugar de reflejarse de vuelta hacia el radar emisor, la mayor parte de la energía se concentra en un lóbulo fuera del eje, reduciendo así drásticamente el scattering reflejado en esa dirección y por ende la RCS en la dirección del radar.

Esta técnica permite superficies planas y ultrafinas con control direccional preciso del eco y sin necesidad de componentes activos, aunque su eficacia se limita a bandas estrechas y ángulos de incidencia cercanos a la normal, su eficiencia se ve reducida por las pérdidas en los resonadores y la complejidad de fabricar gradientes de fase continuos

### 2.4.3. Difusión

La codificación en metasuperficies representa un enfoque moderno y versátil para el control de la dispersión electromagnética. Mediante la manipulación de la fase a través de patrones en los metaátomos se consigue modificar la forma en que las ondas se reflejan, permitiendo aplicaciones avanzadas como la reducción de RCS, beamforming o multiplexación.

La codificación en metasuperficies puede entenderse como una cuantificación de la fase reflejada en diferentes niveles. La diferencia de fase en función del número de bits se define como:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{2^n} \quad (2.5)$$

siendo  $n$  el número de bits de codificación. Se distribuyen uniformemente en el intervalo de  $[0, 2\pi)$ . Por ejemplo, para 1 bit, la diferencia de fase es  $\Delta\Phi = \pi$ , para 2 bits,  $\Delta\Phi = \frac{\pi}{2}$ . Cada nivel de la fase es realizado mediante un metaátomo específico, y el diseño global se organiza mediante una tabla de búsqueda donde se escoge el metaátomo adecuado para cada celda según la fase deseada [7].

Además del número de bits, el patrón espacial con el que se distribuyen los elementos codificados en la metasuperficie también impacta directamente en de la reflexión. Entre los más utilizados están:

- Codificación en columnas: Se alternan niveles de fase por columnas, lo que genera un efecto de beam splitting hacia direcciones laterales simétricas. Es útil cuando se desea redirigir la energía lejos del eje de incidencia principal.

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |

(a) Diseño con 1 bit

|    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 00 | 01 | 10 | 11 | 00 | 01 | 10 | 11 |
| 00 | 01 | 10 | 11 | 00 | 01 | 10 | 11 |
| 00 | 01 | 10 | 11 | 00 | 01 | 10 | 11 |
| 00 | 01 | 10 | 11 | 00 | 01 | 10 | 11 |
| 00 | 01 | 10 | 11 | 00 | 01 | 10 | 11 |
| 00 | 01 | 10 | 11 | 00 | 01 | 10 | 11 |
| 00 | 01 | 10 | 11 | 00 | 01 | 10 | 11 |
| 00 | 01 | 10 | 11 | 00 | 01 | 10 | 11 |

(b) Diseño con 2 bits

Figura 2.8: Diseños de metasuperficies dieléctricas codificadas con diferente número de bits.

- Codificación tipo ajedrez (chessboard coding): Se alternan fases entre celdas adyacentes en una disposición en tablero de ajedrez, generando una dispersión difusa. Es una de las estrategias más comunes para reducir picos de RCS, especialmente en superficies planas y metasuperficies pasivas.

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |

Figura 2.9: Diseño de metasuperficie en patrón de tablero de ajedrez (1 bit: '0' y '1').

- Codificación aleatoria (random coding): Se asignan fases de forma pseudoaleatoria en la superficie. Este enfoque busca dispersar la energía reflejada en múltiples direcciones, logrando una firma radar muy atenuada y ampliamente distribuida. Es muy útil cuando se busca camuflaje electromagnético a múltiples ángulos de incidencia.

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |

(a) Distribución aleatoria de 1 bit (0 o 1)

|    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 10 | 00 | 10 | 01 | 11 | 10 | 00 | 11 |
| 11 | 10 | 00 | 00 | 11 | 10 | 10 | 00 |
| 10 | 11 | 01 | 00 | 01 | 11 | 00 | 10 |
| 10 | 01 | 01 | 11 | 10 | 00 | 00 | 01 |
| 11 | 00 | 11 | 10 | 01 | 00 | 00 | 00 |
| 01 | 10 | 10 | 00 | 01 | 00 | 11 | 01 |
| 11 | 10 | 11 | 01 | 00 | 01 | 11 | 11 |
| 01 | 01 | 00 | 01 | 00 | 11 | 01 | 10 |

(b) Distribución aleatoria de 2 bits (00, 01, 10, 11)

Figura 2.10: Distribuciones aleatorias de bits en metasuperficies.

Estas estrategias pueden aplicarse independientemente del número de bits, y en muchas publicaciones se exploran configuraciones híbridas (por ejemplo, 2-bit + ajedrez o 1-bit + aleatorio) para obtener resultados robustos en anchos de banda amplios [8] [9]

#### 2.4.4. Aplicaciones de la codificación para la RCS.

La codificación digital de fase en metasuperficies se ha demostrado como una estrategia eficaz para reducir la sección radar (RCS). Al introducir una distribución aleatoria de fases en la superficie, se logra dispersar la energía reflejada en múltiples direcciones, reduciendo así la energía reflejada hacia el radar. Por tanto, se rompe la simetría, por lo que la energía se desvía del eje incidente, se produce un efecto difuso donde la onda se distribuye en muchos lóbulos de baja intensidad; y se pueden diseñar metasuperficies multibanda con codificación escalada para cubrir distintos rangos de frecuencia [8].

### 2.5. Diseño de metasuperficies: obtención y control de fase

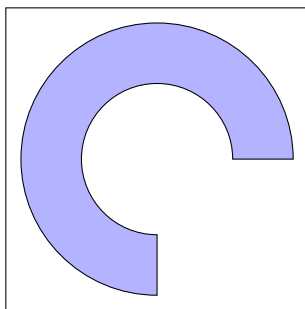
El diseño de las metasuperficies para reducir la RCS requiere combinar varios principios electromagnéticos, optimización numérica y técnicas de fabricación. Dependiendo de los objetivos que queramos para nuestra estructura; ancho de banda, ángulo de incidencia, polarización; se emplearan distintos metodologías. A continuación, se resumen los enfoques más utilizados en la literatura y la industria.

Las metasuperficies pasivas basadas en resonancias, aprovechan las propiedades electromagnéticas de las estructuras sublongitud de onda para manipular la fase, amplitud y polarización de las ondas incidentes. Este enfoque es ampliamente utilizado en aplicaciones de reducción de RCS debido a su simplicidad de diseño, bajo costo y facilidad de fabricación.

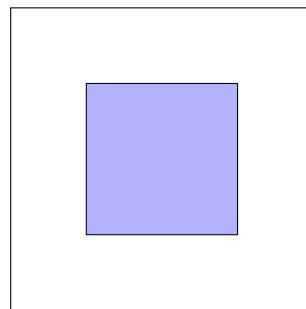
#### 2.5.1. Diseño Ad-hoc

Mediante este diseño, los metaátomos o elementos resonantes, actúan como antenas muy pequeñas que interactúan con el campo electromagnético, generando respuestas controladas. Entre los diseños más comunes se encuentran:

- - "Split-Ring Resonators" (SRRs): cuentan con una estructura de anillos metálicos con ranuras que generan resonancias magnéticas y eléctricas. Su aplicación en la RCS es la cancelación de fase al combinar SRRs y su principal ventaja es la alta sensibilidad a la polarización de la onda incidente.
- - Cruces de Jerusalem o "Jerusalem Cross": su estructura es una serie de dipolos cruzados con acoplamiento capacitivo inductivo. Su aplicación en la RCS es la posibilidad de tener mayor ancho de banda, que es su mayor ventaja comparado con los SRRs.
- - Parches metálicos o "Metal Patches": su diseño está basado en parches cuadrados o rectangulares impresos sobre el sustrato dieléctrico. Su aplicación en la RCS es el control de la fase mediante la variación de dimensiones del parche; y su mayor ventaja es la facilidad de la optimización para incidencia oblicua.



(a) Split-Ring Resonators



(b) Metal Patches

### 2.5.2. Diseño por gradiente de fase

El diseño por gradiente de fase se basa en imponer sobre la superficie un perfil continuo o discretizado de desfase que redirige el haz reflejado. Un mecanismo muy utilizado es la fase geométrica o fase Pancharatnam-Berry, en la cual cada celda de la metasuperficie se rota un ángulo  $\theta$  respecto a un eje de referencia. La variación de fase que experimenta la onda reflejada viene dada por:

$$\Phi_{PB} = \pm 2\theta \quad (2.6)$$

siendo el signo positivo o negativo según el sentido de la polarización circular incidente. Gracias a este método, la fase puede ajustarse en todo el rango  $0-2\pi$  sin modificar las dimensiones físicas de los metaátomos, lo que simplifica enormemente el diseño y la fabricación de patrones codificados.

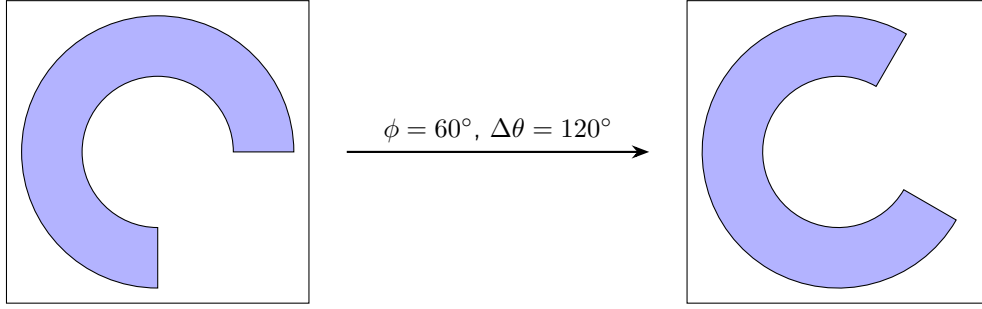


Figura 2.12: Metasuperficie de Pancharatnam-Berry: Los elementos rotados ( $\phi = 60^\circ$ ) generan un gradiente de fase geométrico ( $\Delta\theta = 120^\circ$ ). Los arcos representan meta-átomos con retardos de fase progresivos, donde la rotación geométrica induce un desfase doble.

La fase discretizada implementa el gradiente de fase a partir de un conjunto finito de metaátomos, cada uno optimizado para impartir una fase concreta; por ejemplo, una cuantificación de 2 bits ( $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ). Esto reduce unas pocas geometrías. No obstante, la cuantificación introduce un error de fase que genera lóbulos secundarios y provoca una ligera pérdida de eficiencia de la reflexión principal.

Ambos métodos permiten obtener superficies ultrafinas (del orden de  $\lambda/10$ ) capaces de “engañar” al radar desviando su eco con alta resolución angular y sin añadir volúmenes adicionales, convirtiéndolas en una solución de alto interés para aplicaciones donde el espacio y el peso son críticos.

## 2.6. Problemática y retos

Diseñar estas metasuperficies eficientes en la reducción del RCS implica superar ciertas limitaciones técnicas:

- Conseguir un rango de fase completo de 0 a  $2\pi$  con eficiencia de reflexión 90 %, manteniendo pérdidas por debajo del 10 %.
- Mantener un comportamiento estable en un rango de frecuencias amplio, ancho de banda.
- Diseñar estructuras que funcionen para ángulos de incidencia oblicuos.
- Conseguir que la respuesta sea insensible a la polarización de la onda incidente, si es necesario.

Estos aspectos imponen restricciones en la geometría y suelen abordarse mediante técnicas de optimización o combinaciones de elementos multibanda. Estos fundamentos permiten comprender por qué es posible reducir el RCS usando metasuperficies [10].

### 2.6.1. Incidencia oblicua

Un requisito indispensable para estas estructuras es la variación de las prestaciones en función del ángulo de incidencia de la onda. Por tanto, para conseguir que dicha reducción de la RCS se produzca correctamente y se mantenga en el dominio angular, se suelen seguir estos diseños:

- Geometrías recomendadas: desde un punto de vista de la onda incidente, se comporta claramente mejor un círculo, un parche metálico cuadrado o hexagonal, que la cruz de Jerusalem dada la proyección lateral desde dicho ángulo.
- Algoritmos de optimización: se pueden usar "Generic Algorithms" (GA), para explorar múltiples parámetros; o también "Particle Swarm Optimization" (PSO) para un ajuste más fino [10].

### 2.6.2. Ancho de banda

Uno de los principales problemas es la banda estrecha de estas metasuperficies, dado que las resonancias suelen ser estrechas en frecuencia; la solución pasa por el uso de metaátomos multibanda o el acoplamiento de modos.

### 2.6.3. Polarización

Otra limitación importante es la sensibilidad de la polarización, las metasuperficies basadas en fase Pancharatnam-Berry explotan la rotación de metaátomos para impartir un desfase de  $+2\theta$  a ondas de polarización circular, pero su rendimiento cae drásticamente con polarización lineal. Para que la metasuperficie responda igual tanto a polarización horizontal como vertical, basta con usar celdas con formas simétricas; por ejemplo, cruces o anillos, que devuelven prácticamente la misma fase con cualquiera de las dos polarizaciones. Así evitamos complicarnos con montajes híbridos y seguimos controlando bien el desfase sin perder eficacia.



## Capítulo 3

# Metodología

En este capítulo explico el procedimiento que he seguido para diseñar y analizar las metasuperficies propuestas. Tras haber entendido en el capítulo anterior los fundamentos teóricos y las distintas estrategias para reducir la RCS, tocaba aplicar todo eso a nivel práctico. El enfoque que he seguido se basa en combinar simulaciones electromagnéticas con análisis numérico posterior, intentando optimizar el diseño desde la base: empezando por la celda unidad y llegando hasta las codificaciones espaciales más complejas.

Para ello, he utilizado principalmente dos herramientas: por un lado, CST Studio Suite, con el que he modelado y simulado las distintas configuraciones en 3D, por otro lado, MATLAB, que me ha servido para procesar los datos, analizar amplitudes y diferencias de fase, y automatizar partes del proceso.

A lo largo de esta parte explico cómo he organizado el flujo de trabajo, cómo están configuradas las simulaciones en CST, qué parámetros se han estudiado y qué criterios se han seguido para seleccionar las configuraciones más prometedoras. Todo esto con la idea de que el diseño sea robusto, que funcione bien bajo incidencia oblicua, y que mantenga una respuesta en fase adecuada para poder aplicar diferentes codificaciones.

### 3.1. Herramientas utilizadas

Para llevar a cabo este trabajo, se han empleado herramientas de simulación electromagnética y análisis numérico que permiten evaluar el comportamiento de estructuras complejas sin necesidad de fabricar prototipos físicos en las fases iniciales. En particular, se ha utilizado el software CST Studio Suite para el modelado y simulación electromagnética de las celdas unidad y codificaciones espaciales, así como MATLAB para el postprocesado de resultados, análisis de fase y automatización de tareas repetitivas. A continuación, se describe el papel de cada herramienta en el flujo de trabajo de diseño y validación.

#### 3.1.1. CST Studio Suite

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado CST Studio Suite, una herramienta tridimensional de simulación electromagnética ampliamente reconocida en entornos académicos e industriales. Este software, desarrollado por Dassault Systèmes, permite modelar y analizar dispositivos en alta frecuencia mediante diferentes métodos numéricos.



Figura 3.1: Logo de el programa de simulación electromagnetica CST Studio Suite

En este caso, se ha empleado principalmente el *solver* en el dominio de la frecuencia, basado en el Método de los Elementos Finitos (FEM), que permite obtener la respuesta compleja (módulo y fase) del coeficiente de reflexión  $S_{11}$  para cada frecuencia simulada.

Dado que las metasuperficies utilizadas en este estudio son pasivas y se colocan sobre un plano metálico, la transmisión es nula, por lo que el análisis se centra en los coeficientes de reflexión, particularmente en los parámetros  $S_{ii}(A, B)$ . Estos permiten estudiar la conversión de polarización de la onda incidente (A) en la reflejada (B), distinguiendo entre polarización lineal y circular. En el caso de estructuras simétricas con fase geométrica, se verifica que una onda de polarización circular derecha (RCP) se refleje como izquierda (LCP), siendo este fenómeno clave para las codificaciones PB.

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado CST Studio Suite, una herramienta tridimensional de simulación electromagnética ampliamente reconocida en entornos académicos e industriales. Este software, desarrollado por Dassault Systèmes, permite modelar y analizar dispositivos en alta frecuencia mediante diferentes métodos numéricos. En este caso, se ha empleado principalmente el *solver* en el dominio de la frecuencia, basado en el Método de los Elementos Finitos (FEM), que permite obtener la respuesta compleja (módulo y fase) del coeficiente de reflexión  $S_{11}$  para cada frecuencia simulada. Dado que las metasuperficies utilizadas en este estudio son pasivas y se colocan sobre un plano metálico, la transmisión es nula, por lo que el análisis se centra en los coeficientes de reflexión, particularmente en los parámetros  $S_{ii}(A, B)$ . Estos permiten estudiar la conversión de polarización de la onda incidente (A) en la reflejada (B), distinguiendo entre polarización lineal y circular. En el caso de estructuras simétricas con fase geométrica, se verifica que una onda de polarización circular derecha (RCP) se refleje como izquierda (LCP), siendo este fenómeno clave para las codificaciones PB.

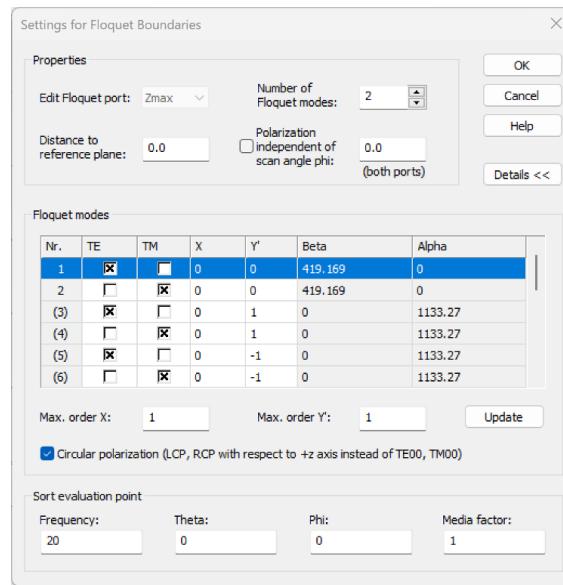


Figura 3.2: Menú de opciones del puerto en CST, donde podemos seleccionar la medición de polarización circular para usar el RCP y LCP como modos de excitación

CST permite definir modelos paramétricos y realizar barridos automáticos para explorar la influencia de parámetros geométricos en la respuesta electromagnética. Además, su interfaz facilita la monitorización de magnitudes como los parámetros S, la densidad de corriente superficial o la fase reflejada, fundamentales para el diseño iterativo y optimización de metasuperficies codificadas.

### 3.1.2. MATLAB

Además de las simulaciones realizadas en CST, el uso de MATLAB ha sido fundamental para el postprocesado de los resultados y para agilizar el análisis de amplitud, fase y diferencias de comportamiento entre distintas configuraciones. Dada la gran cantidad de datos generados por los barridos paramétricos en CST, se desarrollaron varios scripts personalizados que permiten automatizar tareas que, de otra forma, serían manuales y muy tediosas.



Figura 3.3: Logo del programa MatLab

Estos scripts han sido utilizados principalmente para:

- Importar los ficheros de resultados exportados desde CST, tanto para análisis de polarización lineal como circular.
- Desempaquetar la fase (*unwrapping*) para visualizar correctamente las diferencias entre configuraciones con rotaciones angulares.
- Calcular automáticamente la diferencia de fase entre elementos y verificar si se cumplen los saltos esperados para codificaciones de 1, 2 o más bits.
- Establecer criterios de selección basados en umbrales de amplitud, por ejemplo,  $|S_{ii}| > 0,9$ , para asegurar una buena eficiencia de reflexión.
- Representar gráficas que muestran la evolución del ancho de banda según las configuraciones, la variación angular (incidencia oblicua) o la robustez de fase en diferentes condiciones.
- Evaluar la relación entre el ángulo de rotación del metaatomo y la fase reflejada, para validar que se sigue correctamente el modelo de fase geométrica (Pancharatnam–Berry).

El uso de MATLAB ha sido, por tanto, una parte imprescindible del flujo de trabajo, permitiendo no solo interpretar los resultados de CST, sino también optimizar el diseño de forma rápida y fiable.

## 3.2. Procedimiento general

El proceso que he seguido para diseñar y evaluar la metasuperficie se puede dividir en varias etapas, todas orientadas a comprobar si una determinada estructura es válida para aplicar una codificación discreta de fase y, además, si mantiene buen comportamiento en frecuencia y frente a distintos ángulos de incidencia.

Primero se diseña una celda unidad en CST de forma paramétrica, permitiendo ajustar fácilmente los valores geométricos clave (radio, separación, grosor, etc.). Esta celda se simula bajo incidencia normal y con distintas polarizaciones (lineal y circular) para poder obtener los parámetros de reflexión ( $S_{ii}$ ) y extraer tanto el módulo como la fase de la onda reflejada.

Después, se realiza un análisis más detallado del comportamiento en fase. Se comparan distintas configuraciones del metaatomo (por ejemplo, con rotaciones de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , etc.) para ver si la diferencia de fase entre ellas se ajusta a los valores teóricos (ej.  $\Delta\phi = 90^\circ$ ,  $180^\circ$ ). Este análisis es clave para saber cuántos bits reales se pueden usar en una futura codificación.

Además, se evalúa también la amplitud de la reflexión en cada configuración. Si el módulo cae por debajo de cierto umbral (por ejemplo,  $|S_{ii}| < 0,9$ ), se descarta esa configuración como válida, ya que no reflejaría la señal con suficiente eficiencia.

Una vez seleccionados los estados de fase adecuados, se estudia cómo cambia la respuesta electromagnética cuando se varía el ángulo de incidencia. Este análisis se hace tanto en CST como posteriormente en MATLAB, y sirve para ver si el diseño sigue siendo válido bajo incidencia oblicua (por ejemplo, hasta  $30^\circ$ ).

Por último, se implementan distintas codificaciones espaciales (columnas, chessboard, aleatoria, etc.) combinando los bits previamente obtenidos. Estas estructuras más grandes se simulan de nuevo en CST para analizar su efecto sobre la dispersión y la reducción de RCS. Así se puede comparar cuál de ellas es más efectiva según el criterio que se quiera optimizar (ancho de banda, robustez angular, difusión del frente de onda, etc.).

### 3.3. Configuración de simulaciones en CST

Todas las simulaciones del proyecto se han realizado utilizando CST Studio Suite, empleando el solver en el dominio de la frecuencia, basado en el método de los elementos finitos (FEM). Este tipo de simulación permite obtener la respuesta electromagnética de estructuras tridimensionales en amplitud y fase, extrayendo los parámetros de reflexión  $S_{ij}$  a lo largo de un rango de frecuencias. Esto es esencial para analizar tanto el comportamiento resonante de cada celda como su capacidad de manipular la fase de la onda reflejada, especialmente en configuraciones con fase geométrica.

#### 3.3.1. Geometría y condiciones de contorno

El diseño se basa en una celda unidad colocada sobre un plano de masa ideal (Perfect Electric Conductor, PEC) y soportada por un sustrato dieléctrico tipo Rogers 4003C, con permitividad relativa  $\epsilon_r = 3,55$  y tangente de pérdidas  $\tan \delta = 0,0027$ . Este entorno asegura que toda la energía incidente sea reflejada, permitiendo centrarse en el estudio del módulo y la fase del campo reflejado.

Las condiciones de contorno en los ejes  $X$  y  $Y$  se han configurado como periódicas (Unit Cell Boundary Conditions), simulando una estructura infinita en el plano transversal mediante la repetición de la celda. En la dirección  $Z$  se colocan los puertos de excitación ( $Z_{min}$  y  $Z_{max}$ ), a través de los cuales se excita la estructura mediante una onda electromagnética incidente.

#### 3.3.2. Excitación en polarización circular (CP)

Todas las simulaciones se han realizado bajo excitación en polarización circular, descartando el análisis en polarización lineal. CST permite implementar este tipo de excitación directamente mediante la configuración de los puertos y el solver.

En primer lugar, se añaden dos puertos planos (waveguide ports) en las caras  $Z_{min}$  y  $Z_{max}$  del dominio de simulación. En las propiedades del puerto, se activa la casilla Circular Polarization. En ese mismo menú puede seleccionarse el sentido de la polarización: Right-Hand Circular Polarization (RHCP) o Left-Hand Circular Polarization (LHCP).

Posteriormente, en el menú del solver de CST (dentro de Frequency Domain Solver Settings), se debe activar la casilla Use Circular Polarization. Esta opción permite al motor de simulación calcular directamente los modos rotacionales y los parámetros  $S_{ij}$  correspondientes.

Una vez realizada la simulación, se accede al postprocesado de resultados, donde CST proporciona los parámetros de dispersión en función de los puertos y modos definidos. En el caso de polarización circular, estos aparecen nombrados como:

- $S_{Z_{max}(1)Z_{max}(1)}$ : componente reflejada en el mismo modo (por ejemplo, RHCP  $\rightarrow$  RHCP).
- $S_{Z_{max}(1)Z_{max}(2)}$ : conversión de modo (por ejemplo, RHCP  $\rightarrow$  LHCP).
- $S_{Z_{min}(2)Z_{min}(1)}$ : respuesta desde el otro puerto ( $Z_{min}$ ), si está activado.

Por convención, si el puerto de entrada está en  $Z_{max}$  y se excita el modo (1), entonces:

- $S_{Z_{max}(1)Z_{max}(1)}$  representa  $S_{RR}$ .
- $S_{Z_{max}(1)Z_{max}(2)}$  representa  $S_{RL}$ .

En estructuras que operan mediante fase geométrica (Pancharatnam-Berry), el parámetro más relevante es normalmente  $S_{Z_{max}(1)Z_{max}(2)}$ , ya que refleja la conversión de helicidad con modulación de fase asociada a la rotación de la celda unidad.

#### 3.3.3. Configuración de frecuencia

Se ha definido un rango de frecuencias amplio, desde 5 GHz hasta 20 GHz, con el objetivo de cubrir por completo las bandas X y Ku. Esto permite evaluar si la estructura mantiene una buena amplitud de reflexión y una variación de fase adecuada en un intervalo suficientemente extenso como para ser considerada de banda ancha.

#### 3.3.4. Simulaciones paramétricas e incidencia oblicua

Además de la configuración nominal, se han realizado múltiples simulaciones variando ciertos parámetros geométricos mediante la herramienta de barrido paramétrico (*Parameter Sweep*), disponible en CST. Esta funcionalidad permite automatizar el análisis de diferentes configuraciones y estudiar el efecto de dichas variaciones en la respuesta electromagnética.

Del mismo modo, también se han llevado a cabo simulaciones bajo incidencia oblicua, ajustando el ángulo de llegada de la onda plana mediante el menú *Wave Vector Settings*. Esto permite verificar si el comportamiento de la celda se mantiene bajo condiciones de incidencia no normal.

Los detalles y resultados obtenidos en estos estudios se presentan y analizan en profundidad en el Capítulo 4. En particular, se mostrará cómo la metodología descrita permite optimizar los parámetros geométricos más influyentes y comprobar la robustez del diseño bajo distintas condiciones de incidencia. De esta forma, la presente sección constituye la base para interpretar y justificar las configuraciones finales seleccionadas.



## Capítulo 4

# Desarrollo del trabajo

Antes de profundizar en el análisis cuantitativo, este capítulo recoge el proceso completo de desarrollo de la metasuperficie propuesta, desde el diseño inicial de la celda unidad hasta la evaluación de su rendimiento en configuraciones espaciales complejas. Se parte de una geometría base, cuyos parámetros se optimizan en función de criterios de amplitud y control de fase, siguiendo el principio de fase geométrica de Pancharatnam–Berry para garantizar una manipulación eficiente de la onda reflejada. A continuación, se presenta la figura final seleccionada y se analiza su comportamiento tanto en incidencia normal como en condiciones de incidencia oblicua, evaluando la estabilidad angular y el ancho de banda operativo. Finalmente, se estudia la respuesta global de la metasuperficie al aplicar distintas codificaciones espaciales, como distribuciones en columnas o tipo *chessboard*, con el fin de determinar su potencial de reducción de la sección radar equivalente (RCS) en escenarios prácticos.

### 4.1. Diseño inicial de la celda unidad

Para esta estructura lo que he intentado es mediante la revisión bibliográfica de todos los artículos y publicaciones sobre este tipo de metasuperficies, pues encontré un formato de celda de con forma de N que me pareció bastante llamativo principalmente por sus prestaciones sobre la incidencia oblicua y quise intentar desarrollar un poco mas la idea.

#### 4.1.1. Parámetros de diseño iniciales

Esta metasuperficie se diseña teniendo en cuenta primero los parámetros básicos como pueden ser los siguientes:

- $h$ : grosor del sustrato.
- $a_x$  o  $a_y$ : tamaños verticales o horizontales de la celda unidad.
- $t$ : grosor de la línea de *Perfect Electric Conductor*.

#### 4.1.2. Parametros de diseño basicos

Luego posteriormente diseñare de modo inicial mi celda unidad como se muestra en la figura iinicial y uso los parametros de diseño que se indican:

- $g$ : grosor de la línea de la metasuperficie.
- $L$ : longitud del segmento central de la metasuperficie.
- $L_{diag}$ : longitud del segmento diagonal de la metasuperficie.
- $\beta$ : ángulo entre el segmento  $L$  y  $L_{diag}$ .
- $R$ : radio de curvatura de la corona circular contigua a  $L_{diag}$ .

Gracias a esos principales parámetros podremos definir correctamente la celda unidad óptima para este proyecto. Pero cuando decimos óptima, tenemos que saber en que nos referimos concretamente, este caso es principalmente en tres factores. El primero es el parámetro de reflexión, en nuestro caso el  $SZ_{Max2ZMax1}$  que tomando como valor aceptable el  $SZ_{Max2ZMax1} > 0,9$  pues asumimos eso como una transmisión correcta. El segundo de ellos es la diferencia de fase entre celdas unidad, es decir que

aparte de esa condición de amplitud cumpla también una diferencia de fase concreta, por ejemplo como hemos explicado en el capítulo 2, para una estructura de 1 bit codificable deben de ser  $180^\circ$ , por tanto si asumimos a su vez aceptable el valor de  $180^\circ \pm 30^\circ$  pues diremos que cumple con las condiciones. Por ultimo, y la consecuencia de ambos es el ancho de banda; esto es el rango de frecuencias contiguas operativas, donde por tanto tendre que tanto la diferencia de fase como la amplitud son aceptables. Matemáticamente se puede definir el ancho de banda como:

$$\text{Ancho de banda} = \{SZ_{\text{Max}}Z_{\text{Max1}} > 0,9\} \cap \{\Delta\phi = 180^\circ \pm 30^\circ\} \quad (4.1)$$

#### 4.1.3. Condiciones de contorno y entorno de simulación

Para la simulación de esta superficie hemos usado el simulador basado en el domino de la frecuencia, en este caso hemos usado desde 5GHZ hasta 20GHZ lo que cubre las bandas X y Ku; las mas utilizadas en los sistemas RADAR. También mediante el ajuste de tanto los puertos como el *solver* usaremos polarización circular y estudiaremos tanto RCP como LCP.

#### 4.1.4. Uso de la fase geométrica

Para obtener las dos diferentes metasuperficies, lo que tenemos que hacer es correctamente usar la fase geométrica para obtener la segunda figura con la que podamos comparar tanto la amplitud como la diferencia de fase.

En este caso al usar la fase geométrica con la polarización circular pues tenemos ya cumplida la primera parte de la amplitud, ya que mediante el giro sobre si mismo de esa figura en el sustrato,  $\alpha(\alpha)$ , obtenemos una diferencia de fase proporcional al doble de ese giro; manteniendo por tanto la amplitud de nuestra superficie. por tanto aplicando un giro de  $\alpha(\alpha) = 90^\circ$  obtenemos una diferencia de fase de  $180^\circ$ . Conseguido esto ya tenemos una estructura de 1 bit codificable.

#### 4.1.5. Objetivos de la metasuperficie

Por tanto, lo que debemos de obtener variaciones de nuestra figura inicial para obtener mejor respuesta en amplitud en el parámetro  $SZ_{\text{Max}}Z_{\text{Max1}}$ , después tiene que cumplir también la diferencia de fase y todo eso conjunto forma el ancho de banda, lo que define la calidad de la metasuperficie para poder compararlas entre si y comprobar cual es la mejor de todas.

### 4.2. Proceso de optimización y figura inicial

Partiendo de la base de la figura en 4.1, tenemos unos resultados obtenidos representados en la figura 4.2. Observando estos resultados tenemos que intentar mediante el barrido paramétrico *Parameter Sweep*, para poder obtener la figura óptima tanto en diferencia de fase como amplitud.

| $\beta$    | $g$    | $L$  | $L_{diag}$ | $R$  |
|------------|--------|------|------------|------|
| $45^\circ$ | 0.4 mm | 3 mm | 2 mm       | 1 mm |

Tabla 4.1: Valores de los parámetros de simulación inicial para la metasuperficie

Obteniendo ya unos valores de amplitud decentes, lo que tenemos que comprobar es que sean los óptimos solo cambiando el diseño basado en estos parámetros. Por tanto lo que hacemos para su estudio final es tomar unos valores 'centrales' y hacer un barrido paramétrico diferente por cada parámetro característico con estos valores para ver su respuesta en frecuencia, sabiendo que mediante la incidencia normal la fase geométrica hace que la diferencia de fase entre superficies sea constante.

Por tanto, lo que tenemos es un total de 5 simulaciones con unos pasos grandes que después refinaremos para ver cual es la mejor medida posible. Como primeros barridos usaremos los siguientes:

- Barrido del angulo entre brazos,  $\beta$ .
- Barrido del grosor,  $g$ .
- Barrido de la longitud del segmento central,  $L$ .
- Barrido de la longitud del segmento diagonal,  $L_{diag}$ .

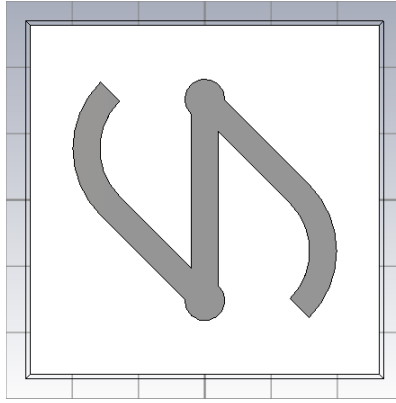


Figura 4.1: Metasuperficie inicial simulada con los parametros de la tabla 4.2

- Barrido del radio de curvatura,  $R$ .

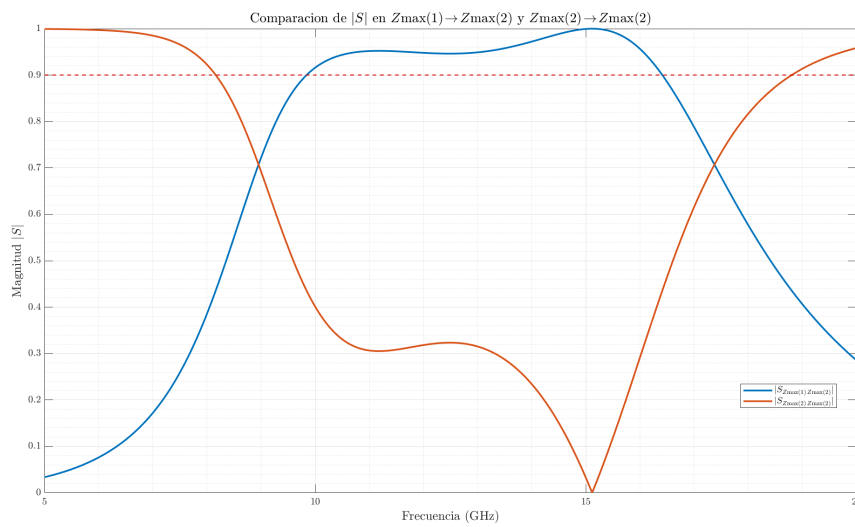


Figura 4.2: Resultados del parámetro SZMax(1)SZmax(2) y SZMax(2)SZmax(2) de la figura inicial 4.1, y simulación RunID=1

#### 4.2.1. Optimización del parámetro $\beta$

Para esta optimización debemos de hacer una selección de los valores a estudiar para poder escoger el valor de  $\beta$  optimo. Por tanto, lo que haremos es usando los valores centrales de la tabla 4.2 para todos los demás parámetros, mientras tanto usaremos los siguientes valores para ver con un step mas grande primero sobre que zona se sitúan los valores óptimos.

$$\beta \in \{15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ\} \quad (4.2)$$

Lo que resulta que en mi Result Navigator, tenga un total de 5 primeras simulaciones comparativas con los valores de la siguiente tabla: Según podemos ver en estas simulaciones, podemos ob-

| RunID | $\beta$    | $g$    | $L$  | $L_{diag}$ | $R$  |
|-------|------------|--------|------|------------|------|
| 2     | $15^\circ$ | 0.4 mm | 3 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 3     | $30^\circ$ | 0.4 mm | 3 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 1     | $45^\circ$ | 0.4 mm | 3 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 4     | $60^\circ$ | 0.4 mm | 3 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 5     | $75^\circ$ | 0.4 mm | 3 mm | 2 mm       | 1 mm |

Tabla 4.2: Primeras simulaciones realizadas para la optimización del parámetro  $\beta$

servar que en cuanto a respuesta en amplitud del parámetro SZMax(1)ZMax(2) y su relación con el

SZMax(2)ZMax(2). Lo que nos deja claro que por lo menos para este valor de los parámetros no optimizados hasta el momento,  $g, L, L_{diag}, R, 15^\circ$  y  $75^\circ$  no son configuraciones validas ya que tenemos que para el caso de  $15^\circ$  se juntan con el segmento central, y para  $75^\circ$  se sale de largo de la superficie de la celda unidad; pero seguiremos simulándolos ya que igual con otras dimensiones de  $L$  o  $L_{diag}$  si se adaptan a mi celda unidad.

Por tanto ya analizando los datos obtenidos mediante la exportación en ASCII y postprocesados en MatLab para una simple visualización conjunta mostrada en la figura 4.3 y 4.4, nos damos cuenta que los dos mejores casos son tanto  $45^\circ$  y  $60^\circ$  y que empeora bastante la respuesta en los  $75^\circ$ . Por tanto sabemos que tendremos que volver a simular otra vez en ese rango de  $45^\circ$  a  $60^\circ$  y de ahí ver como evoluciona la respuesta, ya que seguramente el mejor caso no sea  $60^\circ$  y por tanto intentare combinar esta simulación a continuación para poder ahorra el tiempo.

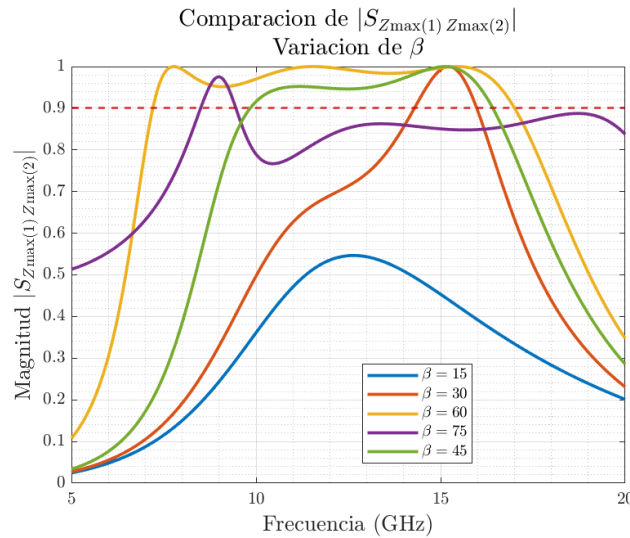


Figura 4.3: Resultados del parametro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parametro beta

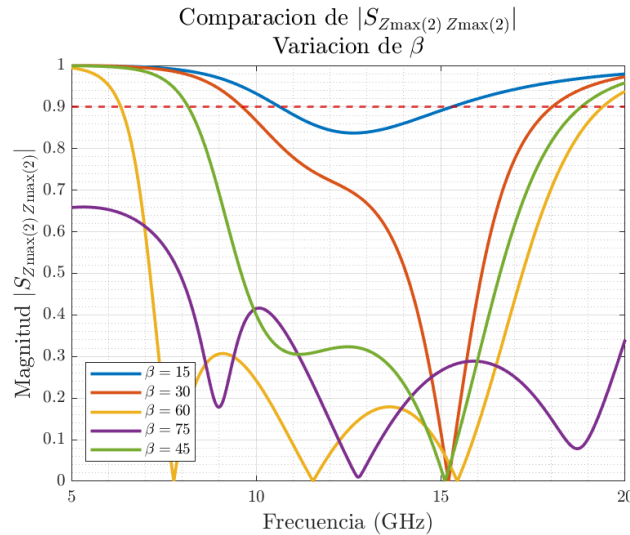


Figura 4.4: Resultados del parametro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parametro beta

#### 4.2.2. Optimización del parámetro $g$

Para esta optimización voy a centrarme en el parámetro  $g$ , manteniendo fijos el resto de parámetros en los valores centrales indicados en la tabla 4.3. La idea es hacer un primer barrido con pasos relativamente grandes para tener una idea de en qué zona pueden estar los valores que mejor funcionan. En este caso, voy a simular desde 0.2 mm hasta 1.0 mm con un paso de 0.2 mm.

$$g \in \{0,2 \text{ mm}, 0,4 \text{ mm}, 0,6 \text{ mm}, 0,8 \text{ mm}, 1,0 \text{ mm}\} \quad (4.3)$$

Esto me dará un total de cinco simulaciones iniciales en el Result Navigator, con las configuraciones que aparecen en la siguiente tabla:

| RunID | $\beta$    | $g$    | $L$  | $L_{diag}$ | $R$  |
|-------|------------|--------|------|------------|------|
| 6     | $45^\circ$ | 0.2 mm | 3 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 1     | $45^\circ$ | 0.4 mm | 3 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 7     | $45^\circ$ | 0.6 mm | 3 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 8     | $45^\circ$ | 0.8 mm | 3 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 9     | $45^\circ$ | 1.0 mm | 3 mm | 2 mm       | 1 mm |

Tabla 4.3: Primeras simulaciones realizadas para la optimización del parámetro  $g$

En este primer barrido lo que me interesa es ver cómo cambia la respuesta en amplitud de  $S_{Z_{\max}(1)Z_{\max}(2)}$  y su relación con  $S_{Z_{\max}(2)Z_{\max}(2)}$  cuando modifico  $g$ , dejando el resto de parámetros como están. Esto me permitirá descartar rangos que no aporten buenos resultados o que den problemas a nivel de geometría, y así centrarme después en un ajuste más fino sobre la zona que mejor se comporte.

Con los resultados que se muestran en la figura 4.5, podemos darnos cuenta de que para el parámetro  $S_{Z_{\max}(1)Z_{\max}(2)}$  se nota que aunque la respuesta es mucho mejor en el caso de un grosor  $g=0,2$ , lo que nos interesa es llegar a ese umbral del 0.9 y poder usarla en mas ancho de banda, por lo que intentando aprovechar las configuraciones optimizadas de los otros parámetros se considera aprovechar el intervalo de  $g=0,4$  y  $g=0,6$ .

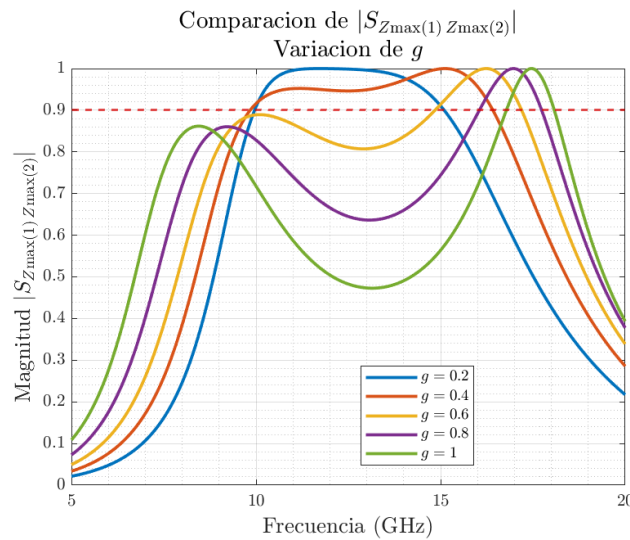


Figura 4.5: Resultados del parametro  $S_{Z_{\max}(1)Z_{\max}(2)}$  para la optimización del parámetro  $g$

Para el caso del parámetro  $S_{Z_{\max}(2)Z_{\max}(2)}$  vemos en la figura 4.6 que tenemos el caso de que es más sensible a los cambios de grosor y por tanto cuando hacemos la simulación RunID=9, con  $g=1\text{mm}$ . Por tanto podemos ver que es el  $g=0,2\text{mm}$  y el  $g=0,4\text{mm}$ ; por el tema anteriormente mencionado, vemos que debemos de aprovechar el ancho de banda simulando entre  $g=0,4\text{mm}$  y  $g=0,6\text{mm}$

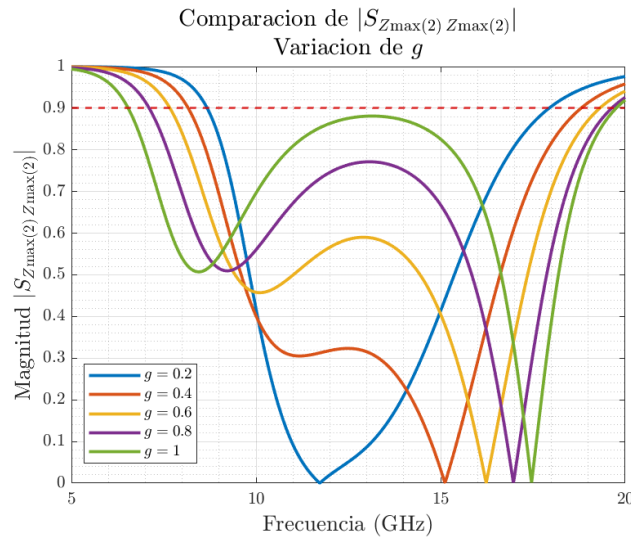


Figura 4.6: Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro  $g$

### 4.2.3. Optimización del parámetro $L$

En este caso voy a optimizar el parámetro  $L$ , manteniendo el resto de parámetros fijos en sus valores centrales (tabla 4.4). Igual que antes, voy a hacer un primer barrido con pasos amplios para localizar rápido la zona donde se obtienen mejores resultados. En concreto, voy a simular desde 1.0 mm hasta 4.0 mm con un paso de 0.5 mm.

$$L \in \{1,0 \text{ mm}, 1,5 \text{ mm}, 2,0 \text{ mm}, 2,5 \text{ mm}, 3,0 \text{ mm}, 3,5 \text{ mm}, 4,0 \text{ mm}, 4,5 \text{ mm}, 5,0 \text{ mm}\} \quad (4.4)$$

Esto me dará un total de siete simulaciones iniciales, cuyas configuraciones se resumen en la siguiente tabla:

| RunID | $\beta$ | $g$    | $L$    | $L_{diag}$ | $R$  |
|-------|---------|--------|--------|------------|------|
| 10    | 45°     | 0.4 mm | 1.0 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 11    | 45°     | 0.4 mm | 1.5 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 12    | 45°     | 0.4 mm | 2.0 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 13    | 45°     | 0.4 mm | 2.5 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 1     | 45°     | 0.4 mm | 3.0 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 14    | 45°     | 0.4 mm | 3.5 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 15    | 45°     | 0.4 mm | 4.0 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 16    | 45°     | 0.4 mm | 4.0 mm | 2 mm       | 1 mm |
| 17    | 45°     | 0.4 mm | 4.0 mm | 2 mm       | 1 mm |

Tabla 4.4: Primeras simulaciones realizadas para la optimización del parámetro  $L$

En este barrido voy a fijarme especialmente en cómo varía la amplitud de SZMax(1)ZMax(2) y su relación con SZMax(2)ZMax(2) al cambiar  $L$ , con el resto de parámetros constantes. Esto me ayudará a ver qué longitudes no funcionan bien (por ejemplo, si producen resonancias no deseadas o caídas bruscas en amplitud) y a quedarme con un rango reducido para el ajuste final.

Viendo ya los datos exportados, se aprecia que hay varios casos bastante similares tanto en amplitud como en ancho de banda, por lo que para el parámetro SZMax(1)ZMax(2) lo más razonable es centrar el estudio en dos tramos concretos: un primer intervalo “principal” desde  $L = 2.5$  mm hasta  $L = 3.5$  mm, y un segundo intervalo más reducido a modo de comprobación, desde  $L = 4.0$  mm hasta  $L = 4.5$  mm. En ambos casos se empleará un paso de 0.5 mm para no generar un número excesivo de simulaciones. De este modo, se cubren las longitudes que, a priori, ofrecen un rendimiento estable y se descartan aquellas con comportamientos claramente peores.

Ahora, analizando los resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2), se observa que la respuesta más favorable sigue apareciendo en  $L = 4.5$  mm; sin embargo, es necesario tener en cuenta que una longitud

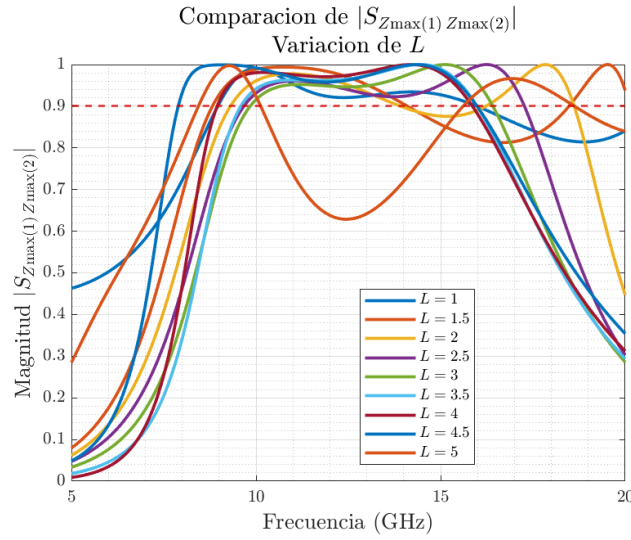


Figura 4.7: Resultados del parámetro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro L

tan grande del segmento central podría salirse del área disponible de la celda unidad en el nuevo barrido refinado. Por esta razón, se mantiene dicho valor únicamente dentro del segundo intervalo de comprobación, de forma que, si se confirma su buen comportamiento, se pueda evaluar si compensa o no la posible limitación geométrica.

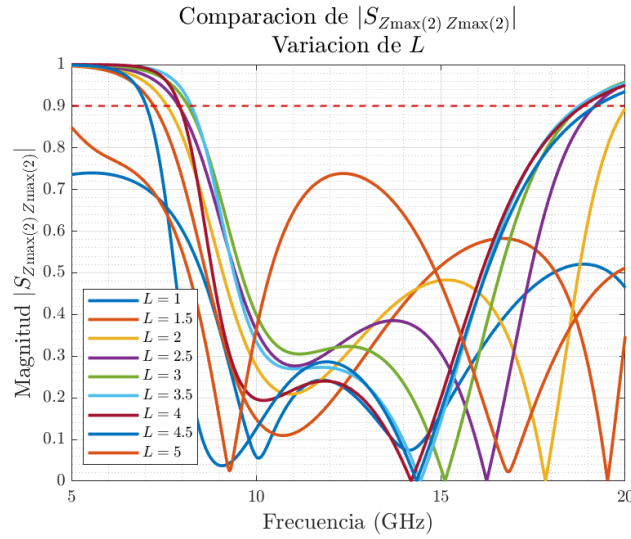


Figura 4.8: Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro L

#### 4.2.4. Optimización del parámetro L\_diag

En esta parte voy a optimizar el parámetro  $L_{diag}$ , manteniendo el resto de parámetros en sus valores centrales (tabla 4.5). Igual que antes, haré un primer barrido con pasos amplios para localizar la zona con mejores resultados. En este caso, voy a simular desde 0.5 mm hasta 3.0 mm, con un paso de 0.5 mm.

$$L_{diag} \in \{0,5 \text{ mm}, 1,0 \text{ mm}, 1,5 \text{ mm}, 2,0 \text{ mm}, 2,5 \text{ mm}, 3,0 \text{ mm}\} \quad (4.5)$$

Esto me da un total de seis simulaciones iniciales, que aparecen resumidas en la siguiente tabla:

En este barrido voy a fijarme en cómo afecta  $L_{diag}$  a la amplitud de SZMax(1)ZMax(2) y a su relación con SZMax(2)ZMax(2), manteniendo fijos el resto de parámetros. Esto me servirá para detectar configuraciones que no sean interesantes (por ejemplo, si la respuesta se degrada o aparecen resonancias indeseadas) y centrar después el estudio en la zona que mejor se comporte.

| RunID | $\beta$    | $g$    | $L$    | $L_{diag}$ | $R$  |
|-------|------------|--------|--------|------------|------|
| 18    | $45^\circ$ | 0.4 mm | 3.0 mm | 0.5 mm     | 1 mm |
| 19    | $45^\circ$ | 0.4 mm | 3.0 mm | 1.0 mm     | 1 mm |
| 20    | $45^\circ$ | 0.4 mm | 3.0 mm | 1.5 mm     | 1 mm |
| 1     | $45^\circ$ | 0.4 mm | 3.0 mm | 2.0 mm     | 1 mm |
| 21    | $45^\circ$ | 0.4 mm | 3.0 mm | 2.5 mm     | 1 mm |
| 22    | $45^\circ$ | 0.4 mm | 3.0 mm | 3.0 mm     | 1 mm |

Tabla 4.5: Primeras simulaciones realizadas para la optimización del parámetro  $L_{diag}$

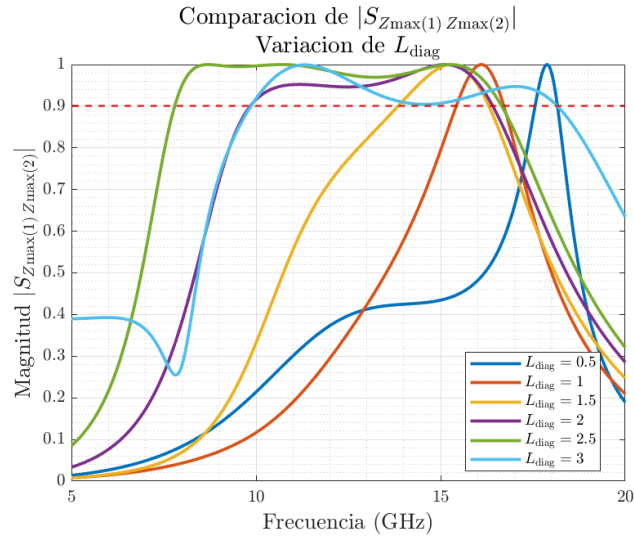


Figura 4.9: Resultados del parámetro  $S_{Z_{max}(1)Z_{max}(2)}$  para la optimización del parámetro  $L_{diag}$

En la primera iteración se observó que los valores altos de  $L_{diag}$  (en torno a 2.5–3.0 mm) ofrecían un buen rendimiento en amplitud. Sin embargo, al combinarlos con  $\beta = 60^\circ$  se detectaron problemas de compatibilidad geométrica, llegando a producirse desbordes de la figura fuera del sustrato. Por este motivo, en la segunda iteración se ha optado por restringir el barrido a un rango más reducido, de 1.0 a 1.5 mm, ya que en esta zona el impacto sobre la amplitud es menor y se asegura la integridad geométrica de la celda unidad.

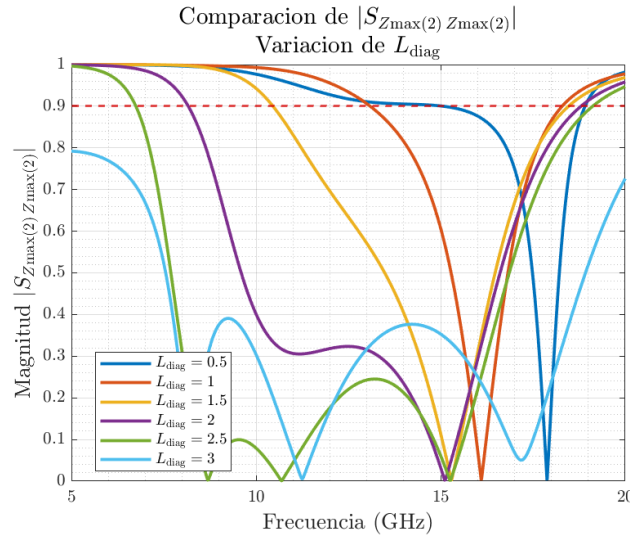


Figura 4.10: Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro L\_diag

#### 4.2.5. Optimización del parámetro R

Finalmente, voy a optimizar el parámetro  $R$ , manteniendo fijos el resto de parámetros en los valores centrales (tabla 4.6). Igual que en los casos anteriores, voy a hacer un primer barrido con pasos amplios para localizar de forma rápida la zona más interesante. En este caso, simularé desde 0.5 mm hasta 2.0 mm, con un paso de 0.5 mm.

$$R \in \{0,5 \text{ mm}, 1,0 \text{ mm}, 1,5 \text{ mm}, 2,0 \text{ mm}\} \quad (4.6)$$

Esto se traduce en un total de cuatro simulaciones iniciales, con las configuraciones recogidas en la siguiente tabla:

| RunID | $\beta$ | $g$    | $L$    | $L_{diag}$ | $R$    |
|-------|---------|--------|--------|------------|--------|
| 23    | 45°     | 0.4 mm | 3.0 mm | 2.0 mm     | 0.5 mm |
| 1     | 45°     | 0.4 mm | 3.0 mm | 2.0 mm     | 1.0 mm |
| 24    | 45°     | 0.4 mm | 3.0 mm | 2.0 mm     | 1.5 mm |
| 25    | 45°     | 0.4 mm | 3.0 mm | 2.0 mm     | 2.0 mm |

Tabla 4.6: Primeras simulaciones realizadas para la optimización del parámetro R

En este barrido voy a observar cómo influye  $R$  en la amplitud de SZMax(1)ZMax(2) y en su relación con SZMax(2)ZMax(2), manteniendo los demás parámetros sin cambios. Esto me permitirá descartar valores que no aporten mejoras o que provoquen una respuesta poco estable, para centrarme después en la zona que ofrezca mejores resultados.

Para este parametro es muy clara que la mejor configuración con diferencia es la del valor  $R=1.5$  mm. Lo que haremos viendo que solo tengo un intervalo con resultados aceptables entre  $R=1.0$  mm y  $R=1.5$  mm. Pues usare un step de 0.1 mm entre estas y vere si mi mejor respuesta ocurre en el valor  $R=1.5$  mm o puede que este en el  $R=1.2$  mm o  $R=1.3$  mm. . .

#### 4.2.6. Conclusiones de la primera iteración

Tras analizar en detalle todos los resultados obtenidos, se han identificado los rangos más prometedores para cada parámetro. Con esta información, se actualiza la figura inicial combinando los valores optimizados y verificando que, en conjunto, mantienen un buen acoplamiento y un rendimiento estable tanto en amplitud como en diferencia de fase.

Los valores centrales obtenidos al final de esta primera fase se tomarán como referencia para la siguiente etapa, en la que se realizará un barrido refinado en torno a dichas configuraciones con el fin de confirmar su comportamiento y afinar el diseño. Esta segunda iteración se detalla en la sección 4.3.

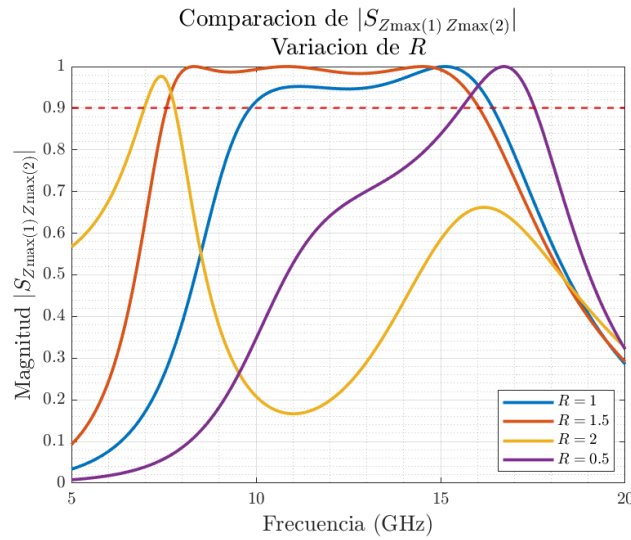


Figura 4.11: Resultados del parámetro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro R

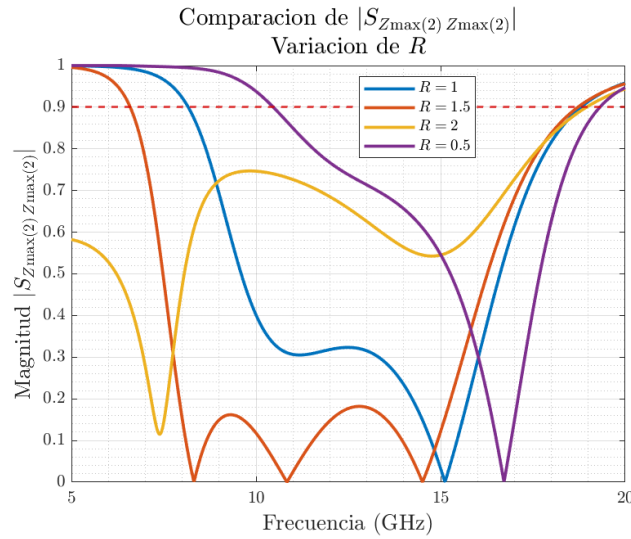


Figura 4.12: Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro R

### 4.3. Segunda iteración de optimización

Tras completar la primera iteración (sección 4.2), en la que se analizaron de forma independiente los cinco parámetros de diseño y se identificaron las zonas más prometedoras para cada uno, se aborda ahora una segunda fase de optimización. El objetivo en esta etapa es ajustar las dimensiones en torno a los valores óptimos previamente encontrados, comprobando su comportamiento conjunto y obteniendo así la figura optimizada final que se empleará en las siguientes fases del trabajo.

A diferencia de la primera iteración, en esta fase no se profundizará nuevamente en el efecto individual de cada parámetro, ya que dicho análisis se encuentra recogido en la sección 4.2. En su lugar, se presentarán directamente los resultados del barrido refinado, acompañados de las gráficas comparativas y un breve comentario de las conclusiones más relevantes. El procedimiento de simulación se mantiene idéntico, utilizando la herramienta *Parameter Sweep* con cinco *Sequences* independientes, una por cada parámetro.

La Figura se corresponde a la *figura optimizada 1*, obtenida al combinar los valores centrales resultantes de la primera iteración. Esta configuración se toma como referencia para todos los barridos refinados descritos a continuación. En esta segunda etapa se mantiene  $\beta = 60^\circ$ , se amplía el barrido de  $L$  a un único intervalo continuo y, para garantizar la compatibilidad geométrica con  $\beta = 60^\circ$ , se restringe  $L_{\text{diag}}$  a valores pequeños (hasta 1.5 mm), dado que en esta zona su impacto sobre la amplitud es menor que el de  $L$  y  $R$ .

### 4.3.1. Valores centrales y rangos refinados

La Tabla 4.14 recoge los valores centrales de la figura optimizada 1, que representan el mejor compromiso encontrado hasta el momento entre amplitud y diferencia de fase bajo incidencia normal.

| $\beta$    | $g$     | $L$     | $L_{\text{diag}}$ | $R$     |
|------------|---------|---------|-------------------|---------|
| $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.50 mm           | 1.50 mm |

Tabla 4.7: Valores centrales (figura optimizada 1)

A partir de esta configuración central, se han definido rangos más acotados para cada parámetro con el fin de refinar el diseño sin generar un número excesivo de simulaciones. En particular,  $L$  se explora en un intervalo único continuo y  $L_{\text{diag}}$  se limita a 1.5 mm para evitar desbordes en las esquinas con  $\beta = 60^\circ$ . Se prioriza además  $R \approx 1,5$  por su buen comportamiento observado, explorando hasta 1.0.

| Parámetro              | Valor inicial | Valor final | Paso |
|------------------------|---------------|-------------|------|
| $\beta$ [ $^\circ$ ]   | 45.0          | 60.0        | 3    |
| $g$ [mm]               | 0.40          | 0.60        | 0.05 |
| $L$ [mm]               | 2.00          | 3.50        | 0.25 |
| $L_{\text{diag}}$ [mm] | 1.00          | 1.50        | 0.10 |
| $R$ [mm]               | 1.00          | 1.50        | 0.10 |

Tabla 4.8: Rangos y pasos del barrido refinado

En las siguientes subsecciones se presentarán los resultados de este barrido refinado para cada parámetro, evaluando su influencia sobre la amplitud y la diferencia de fase, y determinando así la configuración final más adecuada para la metasuperficie.

En la Figura 4.13 se muestra el  $SZ_{\text{Max}}(1)Z_{\text{Max}}(2)$  para la figura inicial y la optimizada. En la segunda se nota que el rango donde se cumple la condición de amplitud es más grande y que la curva se mantiene más estable en la zona buena. Además, aparecen nuevos ceros que no estaban en la inicial, que se pueden interpretar como resonancias adicionales. Esto es importante porque indican puntos donde la conversión de polarización es prácticamente nula, lo que puede afectar al diseño final si caen dentro de la banda de interés.

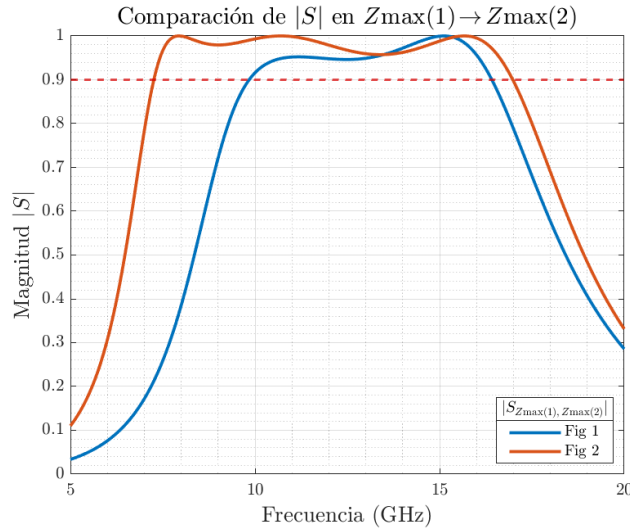


Figura 4.13: Comparación de la magnitud  $|S|$  para  $SZ_{\text{Max}}(1)Z_{\text{Max}}(2)$  entre la Figura inicial (Fig 1) y la optimizada (Fig 2).

Por su parte, la Figura 4.14 representa el  $SZ_{\text{Max}}(2)Z_{\text{Max}}(2)$  para ambas configuraciones. Aquí la optimizada consigue que el ancho de banda por encima de 0.9 sea mayor, con una respuesta más estable en frecuencias medias. También se observan cambios en la posición de los ceros, apareciendo algunos nuevos y desplazándose otros respecto a la versión inicial. Estos cambios pueden modificar cómo se distribuye la energía reflejada y, aunque en este caso parecen beneficiar la anchura de banda útil, es algo que habrá que tener en cuenta en fases posteriores del diseño.

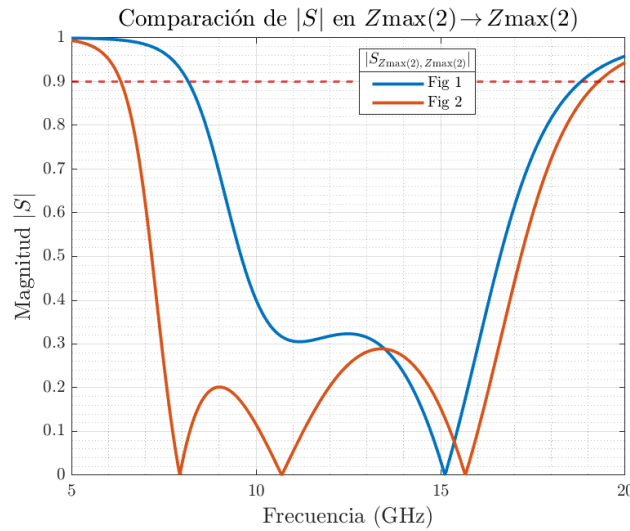


Figura 4.14: Comparación de la magnitud  $|S|$  para SZMax(2)ZMax(2) entre la Figura inicial (Fig 1) y la optimizada (Fig 2).

A partir de aquí, igual que en la primera iteración, voy a volver a revisar cada uno de los parámetros por separado para ver cómo se comportan con el rango refinado que se ha definido en la Tabla 4.8. La idea es comprobar si al ajustar cada parámetro de forma individual se consigue mantener o incluso mejorar el ancho de banda y la estabilidad de la amplitud, y también fijarme si aparecen o se desplazan ceros (resonancias) que puedan ser relevantes para el diseño. De esta forma, puedo confirmar qué valores concretos son los que más me interesan para dejar la configuración final de la metasuperficie antes de pasar a las siguientes fases.

#### 4.3.2. Optimización del parámetro $\beta$ – segunda iteración

En esta segunda iteración, el rango de  $\beta$  se ha reducido a valores comprendidos entre  $45^\circ$  y  $60^\circ$ , con un paso de  $3^\circ$ , tal y como se indica en la Tabla 4.9. Este ajuste busca afinar la zona que en la primera iteración ya mostró mejor comportamiento, analizando si es posible aumentar el ancho de banda útil y mejorar la estabilidad de la amplitud en el SZMax(1)ZMax(2).

La Tabla 4.9 recoge las simulaciones realizadas en este barrido refinado, manteniendo fijos el resto de parámetros ( $g = 0,5$  mm,  $L = 2,75$  mm,  $L_{diag} = 1,5$  mm y  $R = 1,5$  mm). Esto permite aislar el efecto de la variación de  $\beta$  sobre la respuesta de la metasuperficie y comparar de forma directa los resultados obtenidos.

| RunID | $\beta$    | $g$    | $L$     | $L_{diag}$ | $R$    |
|-------|------------|--------|---------|------------|--------|
| 27    | $45^\circ$ | 0.5 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 28    | $48^\circ$ | 0.5 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 29    | $51^\circ$ | 0.5 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 30    | $54^\circ$ | 0.5 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 31    | $57^\circ$ | 0.5 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 26    | $60^\circ$ | 0.5 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |

Tabla 4.9: Simulaciones realizadas para la optimización del parámetro  $\beta$  en la segunda iteración

En la Figura 4.15 se observa que, para el SZMax(1)ZMax(2), los valores altos de  $\beta$  ofrecen un rango amplio por encima del umbral de 0.9 y una curva bastante estable en la banda operativa. En este sentido,  $\beta = 54^\circ$  destaca porque mantiene una buena amplitud en todo el tramo útil y evita caídas bruscas, además de que los ceros no interfieren de forma crítica en la zona de interés.

En el SZMax(2)ZMax(2), mostrado en la Figura 4.16,  $\beta = 54^\circ$  presenta un comportamiento equilibrado: los picos son moderados, las resonancias (ceros) son menos numerosas que en otros valores altos de  $\beta$  y se sitúan en posiciones que no comprometen el rendimiento global. Esto puede aportar una mayor robustez de cara a las codificaciones y a la respuesta bajo incidencia oblicua.

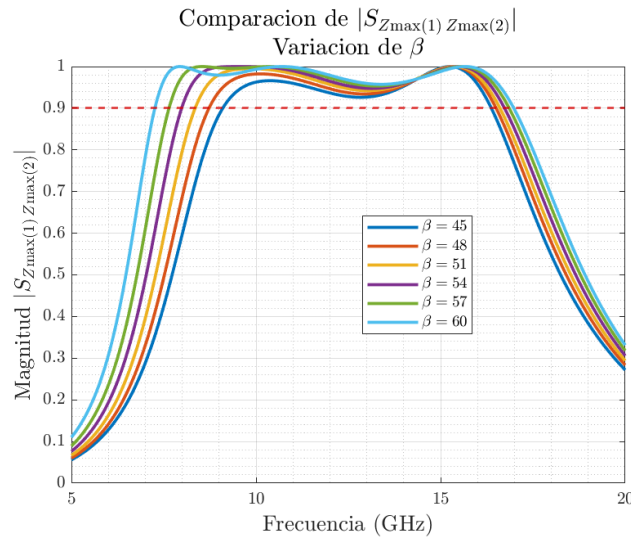


Figura 4.15: Resultados del parámetro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro beta en la segunda iteración

Con estos resultados,  $\beta = 54^\circ$  se toma como opción preferente para la configuración base, dejando  $\beta = 60^\circ$  como alternativa válida si en pruebas posteriores (incidencia oblicua) aportara alguna mejora específica. No se considera necesario ampliar el barrido por encima de  $60^\circ$  para evitar posibles problemas de compatibilidad geométrica en la celda.

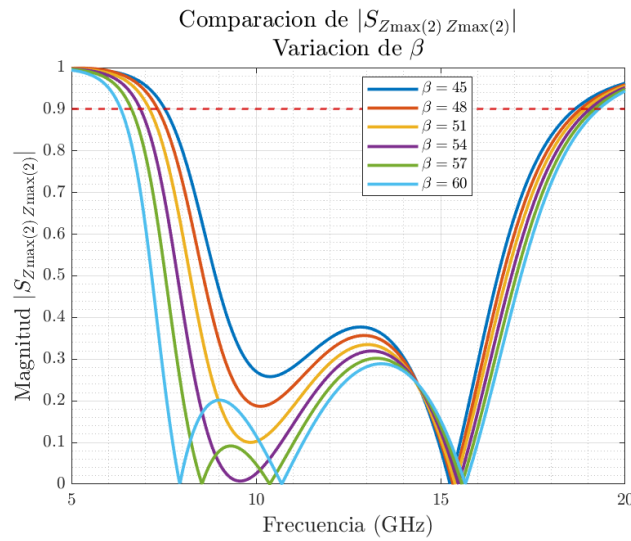


Figura 4.16: Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro beta en la segunda iteración

### 4.3.3. Optimización del parámetro g – segunda iteración

En esta segunda iteración, el parámetro g se ha analizado en un rango reducido comprendido entre 0.40 mm y 0.60 mm, con un paso de 0.05 mm, tal y como se indica en la Tabla 4.10. Este rango se seleccionó a partir de los resultados de la primera iteración, donde ya se vio que valores demasiado pequeños o demasiado grandes reducían el ancho de banda útil.

La Tabla 4.10 recoge las simulaciones realizadas, manteniendo fijos el resto de parámetros ( $\beta = 60^\circ$ ,  $L = 2,75$  mm,  $L_{diag} = 1,5$  mm y  $R = 1,5$  mm). Esto permite evaluar de forma aislada la influencia del grosor de línea sobre la respuesta electromagnética de la metasuperficie.

En la siguiente figura del SZMax(1)ZMax(2) se aprecia que todas las configuraciones mantienen la amplitud por encima de 0.9 en prácticamente todo el rango de interés, con pequeñas variaciones en la

| RunID | $\beta$    | $g$     | $L$     | $L_{diag}$ | $R$    |
|-------|------------|---------|---------|------------|--------|
| 32    | $60^\circ$ | 0.40 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 33    | $60^\circ$ | 0.45 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 26    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 34    | $60^\circ$ | 0.55 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 35    | $60^\circ$ | 0.60 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |

Tabla 4.10: Simulaciones realizadas para la optimización del parámetro  $g$  en la segunda iteración

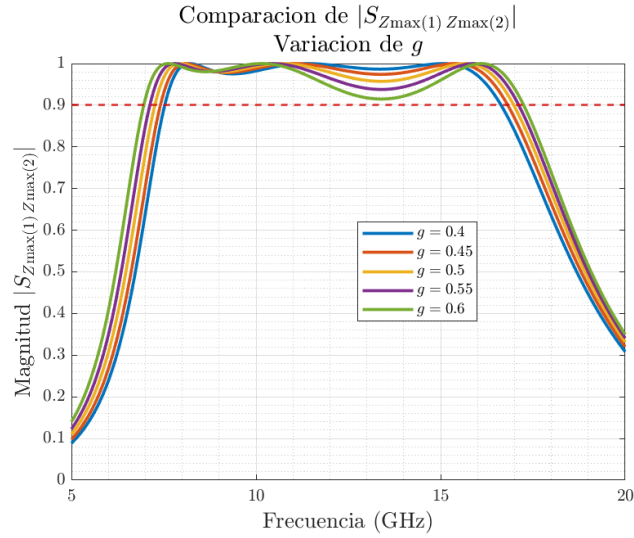


Figura 4.17: Resultados del parámetro  $S_{Z_{max}(1)Z_{max}(2)}$  para la optimización del parámetro  $g$  en la segunda iteración

estabilidad según el valor de  $g$ . Los valores intermedios, especialmente 0.50 mm y 0.55 mm, muestran una curva ligeramente más estable y con menos oscilaciones en la zona central de la banda.

En el  $S_{Z_{max}(2)Z_{max}(2)}$ , el comportamiento es muy similar: se mantienen valores altos en todo el rango útil, y las diferencias entre configuraciones son mínimas. Sin embargo, en los extremos del rango (0.40 mm y 0.60 mm) se aprecian ligeros aumentos en la variación de amplitud, mientras que en 0.50 mm la curva resulta algo más uniforme.

Con estos resultados, se considera que  $g = 0.50$  mm es la opción preferente, ya que combina buena estabilidad en ambos parámetros y un ancho de banda prácticamente idéntico al del resto, evitando las pequeñas irregularidades que aparecen en los valores más extremos.

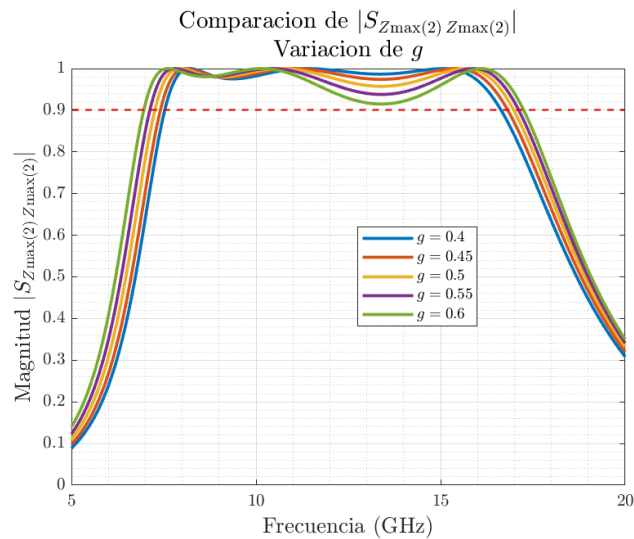


Figura 4.18: Resultados del parámetro  $S_{Z_{\max}(2)} Z_{\max}(2)$  para la optimización del parámetro  $g$  en la segunda iteración

#### 4.3.4. Optimización del parámetro $L$ – segunda iteración

En esta segunda iteración, el parámetro  $L$  se ha evaluado en un rango comprendido entre 2.00 mm y 3.50 mm, con un paso de 0.25 mm, tal y como se indica en la Tabla 4.11. Este intervalo se seleccionó tras la primera iteración, centrando el análisis en la zona que había mostrado un mejor compromiso entre ancho de banda y estabilidad en amplitud.

La Tabla 4.11 recoge las simulaciones realizadas, manteniendo fijos el resto de parámetros ( $\beta = 60^\circ$ ,  $g = 0,50$  mm,  $L_{diag} = 1,5$  mm y  $R = 1,5$  mm), con el objetivo de aislar el efecto de la variación de  $L$  sobre la respuesta electromagnética de la metasuperficie.

| RunID | $\beta$    | $g$     | $L$     | $L_{diag}$ | $R$    |
|-------|------------|---------|---------|------------|--------|
| 36    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.00 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 37    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.25 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 38    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.50 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 26    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 39    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 3.00 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 40    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 3.25 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |
| 41    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 3.50 mm | 1.5 mm     | 1.5 mm |

Tabla 4.11: Simulaciones realizadas para la optimización del parámetro  $L$  en la segunda iteración

En la Figura 4.19 del  $S_{Z_{\max}(1)} Z_{\max}(2)$  se aprecia que todos los valores de  $L$  mantienen una amplitud elevada en casi todo el rango de interés, aunque en la parte alta de la banda (por encima de 18 GHz) las longitudes mayores como 3.25 mm y 3.50 mm retrasan la caída de la amplitud, ampliando el ancho de banda útil. Además,  $L = 3.50$  mm muestra una transición especialmente suave y estable, sin caídas bruscas en la zona operativa.

En el  $S_{Z_{\max}(2)} Z_{\max}(2)$ , mostrado en la Figura 4.20, las diferencias entre configuraciones son más marcadas: las longitudes más pequeñas (2.00 mm y 2.25 mm) presentan picos más pronunciados y resonancias en la zona de 10–15 GHz, mientras que  $L = 3.50$  mm suaviza notablemente estas variaciones y mantiene un comportamiento estable en toda la banda útil.

Con estos resultados,  $L = 3.50$  mm se toma como la opción preferente de esta iteración. Dado que el mejor comportamiento se da en el extremo superior del rango evaluado, en la siguiente iteración se ampliará el barrido para incluir valores entre 3.50 mm y 4.00 mm con el fin de analizar si es posible mejorar aún más el rendimiento y la estabilidad.

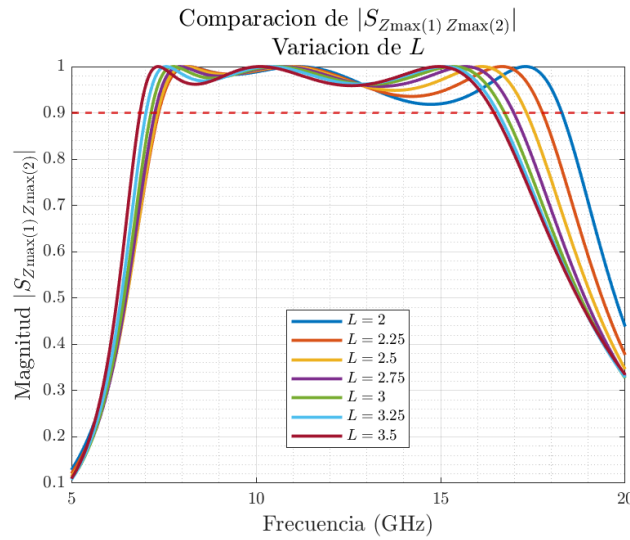


Figura 4.19: Resultados del parámetro SZMax(1)ZMax(2) para la optimización del parámetro L en la segunda iteración

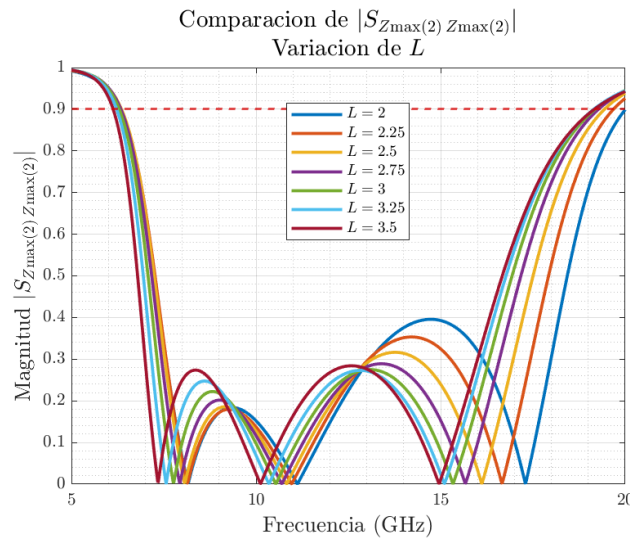


Figura 4.20: Resultados del parámetro SZMax(2)ZMax(2) para la optimización del parámetro L en la segunda iteración

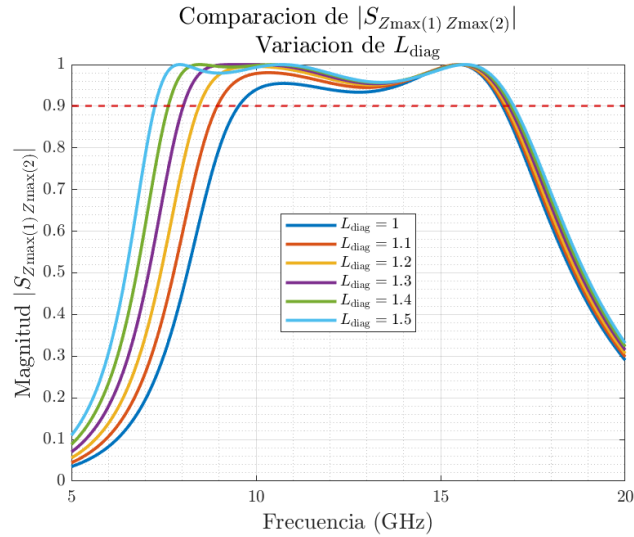
#### 4.3.5. Optimización del parámetro L<sub>diag</sub> – segunda iteración

En esta segunda iteración, el parámetro L<sub>diag</sub> se ha evaluado en un rango comprendido entre 1.00 mm y 1.50 mm, con un paso de 0.10 mm, tal y como se indica en la Tabla 4.12. Este intervalo reducido se debe a que, por la geometría de la celda y la configuración actual de los demás parámetros, valores superiores a 1.50 mm comprometerían de forma significativa el diseño global, interfiriendo con las dimensiones óptimas de  $\beta$ ,  $g$  y  $L$ .

La Tabla 4.12 recoge las simulaciones realizadas, manteniendo fijos el resto de parámetros ( $\beta = 60^\circ$ ,  $g = 0,50$  mm,  $L = 2,75$  mm y  $R = 1,5$  mm), con el objetivo de analizar el impacto directo de la variación de L<sub>diag</sub> sobre la respuesta electromagnética.

En la Figura 4.21 del SZMax(1)ZMax(2) se aprecia que todas las configuraciones mantienen la amplitud por encima de 0.9 en la mayor parte del rango de interés, aunque los valores más bajos (1.00 mm y 1.10 mm) muestran una pendiente inicial más pronunciada. Las configuraciones intermedias, especialmente 1.30 mm, destacan por mantener una curva estable y sin caídas bruscas en la banda operativa.

| RunID | $\beta$    | $g$     | $L$     | $L_{diag}$ | $R$    |
|-------|------------|---------|---------|------------|--------|
| 42    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.00 mm    | 1.5 mm |
| 43    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.10 mm    | 1.5 mm |
| 44    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.20 mm    | 1.5 mm |
| 45    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.30 mm    | 1.5 mm |
| 46    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.40 mm    | 1.5 mm |
| 26    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.50 mm    | 1.5 mm |

Tabla 4.12: Simulaciones realizadas para la optimización del parámetro  $L_{diag}$  en la segunda iteraciónFigura 4.21: Resultados del parámetro  $S_{Z_{max}(1)Z_{max}(2)}$  para la optimización del parámetro  $L_{diag}$  en la segunda iteración

En el  $S_{Z_{max}(2)Z_{max}(2)}$ , mostrado en la Figura 4.22, las diferencias son más notables:  $L_{diag} = 1.30$  mm presenta un patrón de resonancias más contenido, con ceros menos pronunciados en la zona de 8–12 GHz, mientras que valores extremos como 1.00 mm o 1.50 mm generan resonancias más fuertes y picos más irregulares. Este comportamiento más suave en 1.30 mm puede ayudar a mantener una mayor robustez frente a cambios de incidencia o variaciones en otros parámetros.

Con estos resultados,  $L_{diag} = 1.30$  mm se toma como la opción preferente para la configuración final de esta iteración. No se considera recomendable explorar valores superiores a 1.50 mm ya que comprometerían la geometría de la celda y el ajuste de los demás parámetros.

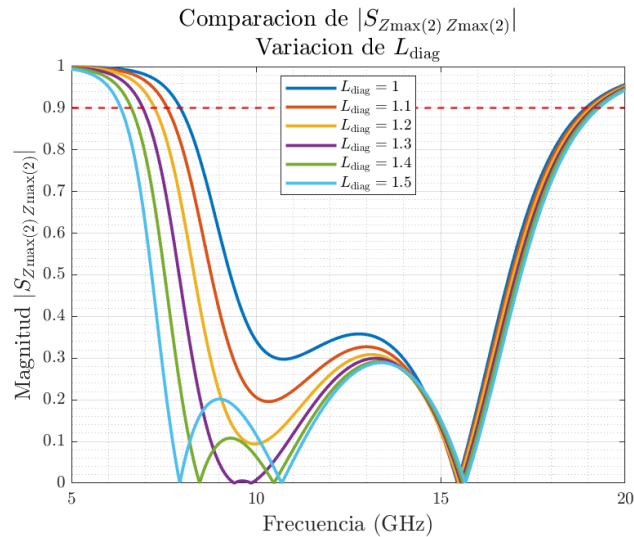


Figura 4.22: Resultados del parámetro  $S_{Zmax(2)} Z_{max(2)}$  para la optimización del parámetro  $L_{diag}$  en la segunda iteración

#### 4.3.6. Optimización del parámetro R – segunda iteración

En esta segunda iteración, el parámetro R se ha evaluado en un rango comprendido entre 1.00 mm y 1.50 mm, con un paso de 0.10 mm, tal y como se indica en la Tabla 4.13. Este rango se seleccionó a partir de los resultados de la primera iteración, centrándose en la zona que ofrecía un buen equilibrio entre ancho de banda y estabilidad de amplitud.

La Tabla 4.13 recoge las simulaciones realizadas, manteniendo fijos el resto de parámetros ( $\beta = 60^\circ$ ,  $g = 0,50$  mm,  $L = 2,75$  mm y  $L_{diag} = 1,5$  mm), con el objetivo de aislar la influencia directa de R sobre la respuesta electromagnética.

| RunID | $\beta$    | $g$     | $L$     | $L_{diag}$ | $R$     |
|-------|------------|---------|---------|------------|---------|
| 47    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.00 mm |
| 48    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.10 mm |
| 49    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.20 mm |
| 50    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.30 mm |
| 51    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.40 mm |
| 26    | $60^\circ$ | 0.50 mm | 2.75 mm | 1.5 mm     | 1.50 mm |

Tabla 4.13: Simulaciones realizadas para la optimización del parámetro R en la segunda iteración

En la Figura 4.23 del  $S_{Zmax(1)} Z_{max(2)}$  se observa que todos los valores de R mantienen la amplitud por encima de 0.9 en la mayor parte de la banda útil, con pequeñas diferencias en la estabilidad. Los valores intermedios, especialmente 1.30 mm, muestran una curva más uniforme y menos oscilaciones en comparación con los valores extremos.

En el  $S_{Zmax(2)} Z_{max(2)}$ , mostrado en la Figura 4.24, se aprecian diferencias más claras:  $R = 1,30$  mm presenta resonancias menos pronunciadas y picos más contenidos en la región de 8–15 GHz, mientras que valores como 1.00 mm o 1.50 mm muestran resonancias más fuertes y variaciones más acusadas. Este comportamiento más suave en 1.30 mm favorece la estabilidad de la respuesta y reduce el riesgo de degradación bajo condiciones de incidencia oblicua.

Con estos resultados,  $R = 1.30$  mm se considera la opción preferente para esta iteración, ya que mantiene un buen equilibrio entre amplitud, ancho de banda y control de resonancias.

#### 4.3.7. Conclusiones de la segunda iteración

Viendo los barridos refinados, me quedo con la siguiente configuración porque es la que mejor equilibra amplitud, ancho de banda y resonancias “razonables”:

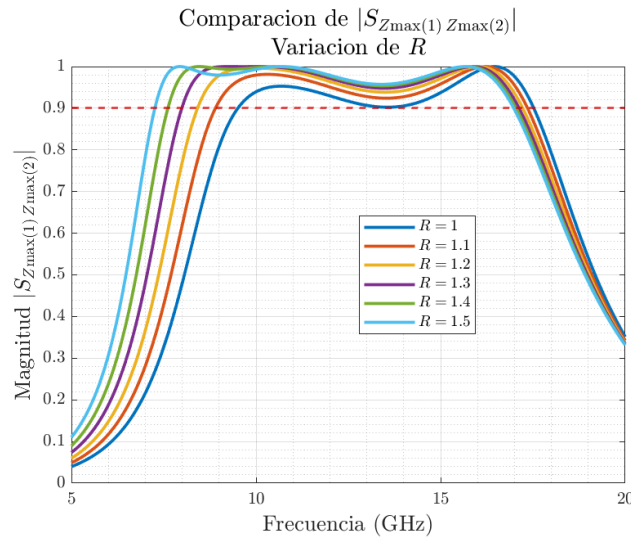


Figura 4.23: Resultados del parámetro  $S_{Z_{max}(1)}Z_{max}(2)$  para la optimización del parámetro  $R$  en la segunda iteración

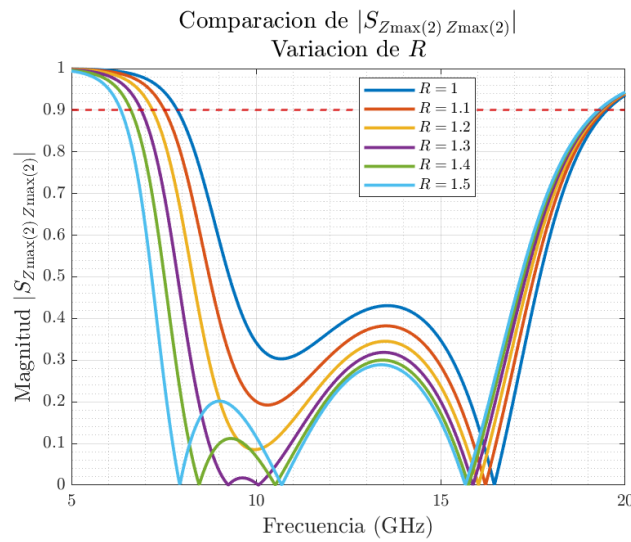


Figura 4.24: Resultados del parámetro  $S_{Z_{max}(2)}Z_{max}(2)$  para la optimización del parámetro  $R$  en la segunda iteración

- $\beta = 54^\circ$ : en  $S_{Z_{max}(1)}Z_{max}(2)$  mantiene un tramo largo por encima de 0.9 y la curva es estable. En  $S_{Z_{max}(2)}Z_{max}(2)$  los ceros son menos agresivos que en  $60^\circ$  y están mejor colocados respecto a la banda útil, lo que ayuda a no “ensuciar” cuando luego codifiquemos.
- $g = 0.50$  mm: todas las curvas cumplen el umbral, pero 0.50 mm es la más “limpia” en ambos parámetros y evita pequeñas irregularidades que aparecen en los extremos 0.40/0.60 mm.
- $L = 3.50$  mm: es donde se ve la caída más tardía en  $S_{Z_{max}(1)}Z_{max}(2)$  (más banda útil en altas) y un  $S_{Z_{max}(2)}Z_{max}(2)$  con resonancias más suaves que las longitudes pequeñas. Como el mejor caso cae justo en el borde, en la siguiente iteración ampliaré el barrido a 3.50–4.00 mm para ver si todavía mejora.
- $L_{diag} = 1.30$  mm: con 1.30 mm el patrón de ceros entre 8–12 GHz es menos marcado y la curva se mantiene estable en  $S_{Z_{max}(1)}Z_{max}(2)$ . Además, no compromete la geometría (por encima de 1.5 mm ya empieza a dar problemas).
- $R = 1.30$  mm: en  $S_{Z_{max}(2)}Z_{max}(2)$  es donde las resonancias salen menos pronunciadas y los picos quedan más contenidos, manteniendo al mismo tiempo buena amplitud en  $S_{Z_{max}(1)}Z_{max}(2)$ .

En conjunto, esta combinación mantiene el umbral de 0.9 en  $S_{Z_{max}(1)}Z_{max}(2)$  en un rango amplio y reduce la severidad de las resonancias en  $S_{Z_{max}(2)}Z_{max}(2)$ . Con esto cierro la segunda iteración y

paso a (i) ampliar  $L$  hasta 4.00 mm para comprobar si se gana algo más de banda y (ii) verificar la robustez bajo incidencia oblicua y con las codificaciones seleccionadas.

#### 4.4. Tercera iteración de optimización

Antes de iniciar esta tercera iteración se planteó una configuración alternativa (Fig. 3) respecto a la obtenida en la segunda (Fig. 2), con el objetivo de mejorar el comportamiento observado hasta el momento. Sin embargo, al comparar ambas (Fig. 4.25 y Fig. 4.26) se aprecia que la nueva propuesta no solo no ofrece mejoras, sino que en ciertos aspectos incluso empeora los resultados.

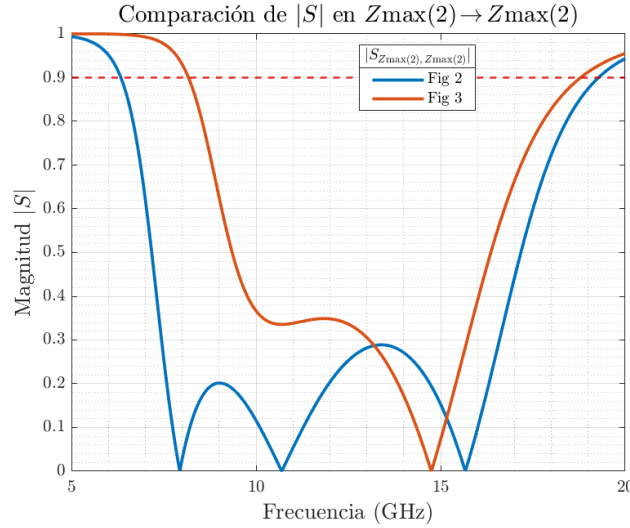


Figura 4.25: Comparación de  $S_{Z_{\max}(2)Z_{\max}(2)}$  entre Fig. 2 y Fig. 3.

Aunque en escala lineal las curvas pudieran parecer similares en cuanto a los ceros, al representarlas en dB se observan diferencias de hasta 20 dB. Este detalle es relevante porque un cero menos profundo implica que la anulación no es tan efectiva como aparenta en magnitud lineal. Por tanto, en esta iteración se dará prioridad a configuraciones que presenten ceros más profundos y estables en dB dentro de la banda de interés, en lugar de limitarse a buscar mínimos en la magnitud.

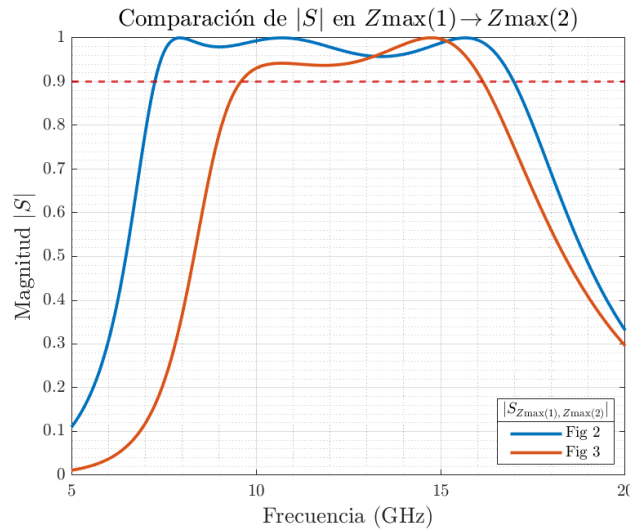


Figura 4.26: Comparación de  $S_{Z_{\max}(1)Z_{\max}(2)}$  entre Fig. 2 y Fig. 3.

##### 4.4.1. Metodología de la tercera iteración

Vistos los resultados poco satisfactorios de las Fig. 4.26 y 4.25, y conociendo ya cuál era el origen del problema, se optó por un enfoque diferente. En lugar de explorar configuraciones completamente

nuevas, se decidió refinar los parámetros más sensibles del diseño.

El procedimiento seguido consistió en identificar primero qué parámetro tenía un mayor impacto en el rendimiento de la configuración final de la segunda iteración. Una vez localizado el más influyente, se evaluó cómo interactuaba con el resto y si su geometría permitía un margen de ajuste adicional. Por ejemplo, en el caso de  $L_{diag}$ , su valor ya se encontraba prácticamente en el máximo permitido por la geometría, por lo que resultaba incompatible con incrementos simultáneos de  $\beta$  y  $R$ . En consecuencia, este parámetro se mantuvo fijo en adelante.

#### 4.4.2. Comparación de parámetros clave

Del análisis de resultados se obtuvieron las siguientes conclusiones preliminares:

- El parámetro  $L_{diag}$  se fijó en 1.5 mm, ya que modificarlo provocaba conflictos geométricos y no aportaba mejoras de rendimiento.
- El parámetro  $g$  tampoco mostró un impacto significativo en la respuesta, por lo que se mantuvo en 0.5 mm, valor que ofrecía la mayor estabilidad.

Por tanto, las simulaciones de esta iteración se centraron exclusivamente en los parámetros  $\beta$ ,  $L$  y  $R$ , determinando primero cuál de ellos condicionaba más el comportamiento global. Para ello se tomaron como referencia los resultados de la sección anterior.

En esta fase se llevó a cabo un barrido reducido bajo incidencia normal, manteniendo fijos los parámetros menos influyentes ( $L_{diag}=1.5$  mm y  $g=0.5$  mm). Se evaluaron varias combinaciones de  $\beta$  ( $60^\circ$  y  $62.5^\circ$ ),  $\gamma$  ( $0^\circ$ – $60^\circ$ ) y ajustes de  $L$  en pasos de 0.25 mm alrededor de la configuración de referencia. El criterio seguido fue que la magnitud  $|S_{Z_{max}(1), Z_{max}(2)}|$  permaneciera por encima de 0.9 de forma continua dentro de la banda de interés, evitando picos aislados que pudieran dar una falsa sensación de mejora.

De este análisis se desprendió que únicamente con  $\beta=62.5^\circ$  se cumplía el criterio de forma robusta, logrando mantener la amplitud deseada en toda la banda. A partir de esta elección se ajustaron de forma fina los parámetros  $L$  y  $R$ , completando así la configuración final de la tercera iteración.

Tal y como se observa en la Fig. 4.15, una simple variación de  $3^\circ$  en  $\beta$  tiene un efecto notable sobre el rendimiento. Por este motivo se empleó el valor máximo de diseño admisible,  $62.5^\circ$ , obteniendo así la configuración final de esta iteración:  $\beta = 62.5^\circ$ ,  $g = 0.50$  mm,  $L = 2.50$  mm,  $L_{diag} = 1.50$  mm,  $R = 1.50$  mm. Esta combinación, mostrada en las Fig. 4.27 y 4.28, ofreció un rendimiento claramente superior tanto respecto a la primera iteración como a la figura optimizada en la segunda, logrando una mayor amplitud y una supresión en dB más efectiva dentro de la banda de interés.

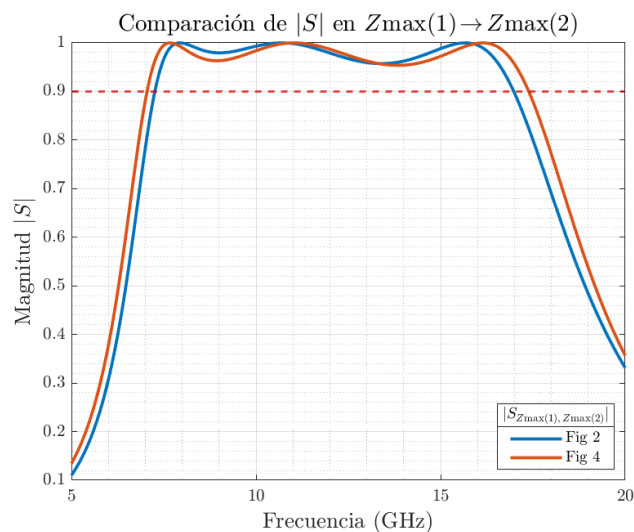


Figura 4.27: Comparativa de  $S_{Z_{max}(1), Z_{max}(2)}$  entre la configuración mejorada y las obtenidas en la primera y segunda iteración.

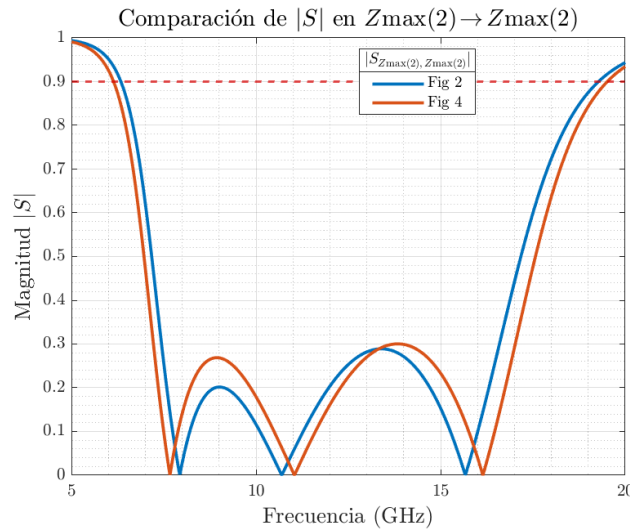


Figura 4.28: Comparativa de  $S_{Z_{\max}(2)Z_{\max}(2)}$  entre la configuración mejorada y las obtenidas en la primera y segunda iteración.

En esta fase se comprobó que la configuración alternativa inicialmente planteada no suponía una mejora real. Sin embargo, un ajuste específico de los parámetros más influyentes ( $\beta$ ,  $L$  y  $R$ ) permitió alcanzar un diseño con un rendimiento claramente superior. En particular, el incremento de  $\beta$  hasta su valor máximo admisible aportó una mejora significativa tanto en amplitud como en la profundidad de los ceros en dB, mientras que la selección adecuada de  $L$  y  $R$  contribuyó a mantener la estabilidad en frecuencia. De este modo, quedó demostrado que la optimización debía centrarse en refinar los parámetros clave en lugar de explorar geometrías completamente nuevas. Esta conclusión sirvió de base para orientar la siguiente fase, donde el foco se puso en la robustez angular frente a incidencia oblicua.

## 4.5. Cuarta iteración de optimización

A partir de las gráficas obtenidas, se pudo comprobar que el impacto del parámetro  $L$  en el rango de 1.5 mm a 2.5 mm no producía variaciones especialmente relevantes si se miraba únicamente la amplitud. Esto indicaba que, en esta fase del diseño, ya no bastaba con centrarse solo en buscar el valor óptimo de  $L$  en condiciones ideales, sino que era necesario comprobar cómo se comportaba la estructura en escenarios más realistas, es decir, bajo incidencia oblicua. Por este motivo, el objetivo principal de esta cuarta y última iteración fue evaluar la estabilidad del diseño frente a variaciones angulares, de forma que la elección final no dependiera únicamente de la amplitud, sino también de la robustez del comportamiento en fase.

Para realizar este análisis se planteó un barrido conjunto de tres parámetros clave. En primer lugar, la rotación  $\alpha$ , que toma los valores de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  y permite generar los dos estados de fase necesarios para una codificación de 1 bit. En segundo lugar, el ángulo de incidencia  $\gamma$ , que se fijó en  $0^\circ$  y  $45^\circ$  para comparar la respuesta bajo incidencia normal y oblicua. Por último, la longitud  $L$ , que se varió en un rango de 1.50 mm a 2.50 mm con un paso de 0.25 mm. De esta manera, mediante un script en MatLab se analizaron de forma simultánea la amplitud y la diferencia de fase de todas las combinaciones posibles, con el objetivo de localizar la configuración que mejor se adaptara a condiciones angulares más exigentes.

Los resultados obtenidos fueron bastante claros. Aunque la mayoría de configuraciones superaban el umbral de amplitud de 0.9 tanto en incidencia normal como oblicua, no todas mantenían una diferencia de fase adecuada en el rango de frecuencias de interés. El caso de  $L = 1.50$  mm se descartó rápidamente, ya que ni siquiera cumplía el requisito de amplitud mínima. En cambio, valores intermedios como  $L = 1.75$  mm demostraron un mejor compromiso: no solo mantenían la amplitud dentro de lo exigido, sino que además la diferencia de fase se conservaba mucho más próxima a los  $180^\circ$  de manera uniforme, lo que aseguraba un comportamiento más estable incluso cuando la onda incidía con un ángulo de  $45^\circ$ .

Tal y como se observa en la figura 4.29, la configuración con  $L = 1.75$  mm es la que mostró un mejor rendimiento global frente a la incidencia oblicua, resistiendo mejor la degradación de fase en comparación

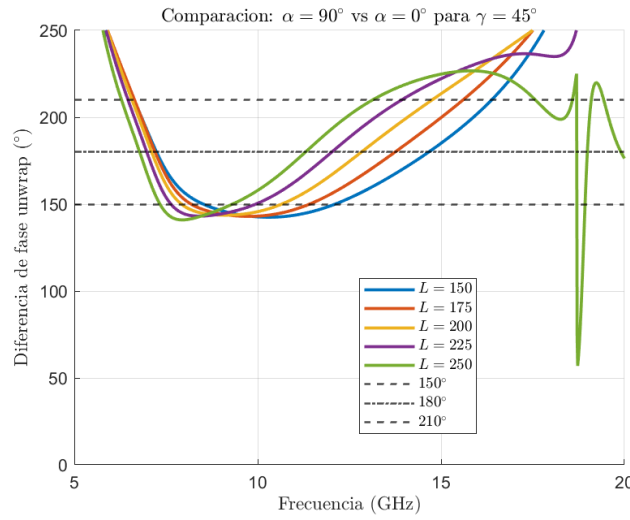


Figura 4.29: Comparación del parámetro  $L$  frente a un ángulo de incidencia oblicua de  $45^\circ$ .

con el resto. Esto permitió “cerrar” definitivamente el diseño de la celda unidad, garantizando que la estructura no solo funciona en condiciones ideales, sino que también mantiene un comportamiento aceptable en escenarios más realistas. De este modo, esta iteración fue clave para poder dar por finalizado el proceso de optimización y fijar una figura final sobre la que basar las pruebas de codificación espacial.

## 4.6. Figura final

Tras todas las iteraciones de optimización realizadas, se definió la configuración final de la celda unidad. El proceso de ajuste sucesivo de parámetros permitió ir descartando aquellas combinaciones que no cumplían los requisitos de amplitud o que presentaban problemas de compatibilidad geométrica, hasta llegar a un diseño robusto tanto en condiciones ideales como bajo incidencia oblicua. Los valores finales de cada parámetro se recogen en la Tabla 4.14.

| $\beta$      | $g$     | $L$     | $L_{\text{diag}}$ | $R$     |
|--------------|---------|---------|-------------------|---------|
| $62,5^\circ$ | 0.50 mm | 1.75 mm | 1.50 mm           | 1.50 mm |

Tabla 4.14: Parámetros geométricos finales de la celda unidad optimizada.

En la Figura 4.30 se muestra el diseño final implementado en CST Studio. Este combina un ángulo  $\beta$  cercano al máximo posible, lo que garantiza un buen control de la fase geométrica, junto con un valor intermedio de  $L$  que demostró ser el más estable frente a incidencia oblicua. Además, los parámetros  $g$ ,  $L_{\text{diag}}$  y  $R$  se fijaron en las configuraciones que ofrecían un compromiso equilibrado entre amplitud, supresión de resonancias y viabilidad geométrica.

Los resultados obtenidos bajo incidencia normal se muestran en la Figura 4.31, donde se comparan los parámetros  $\text{SZMax}(1)\text{ZMax}(2)$  y  $\text{SZMax}(2)\text{ZMax}(2)$ . Se aprecia que la amplitud se mantiene por encima del umbral de 0.9 en un rango de frecuencias suficientemente amplio, lo que asegura un buen nivel de reflexión útil. Además, la diferencia de fase entre los dos estados generados mediante la rotación  $\alpha$  se mantiene próxima a  $180^\circ$ , cumpliendo así las condiciones necesarias para una codificación de 1 bit basada en fase geométrica. En conjunto, estos resultados validan que la celda unidad optimizada no solo cumple con los requisitos de amplitud, sino que también conserva la coherencia de fase necesaria para aplicar patrones de dispersión como los de tipo columnas o *chessboard*.

Con el objetivo de verificar la robustez de la figura frente a condiciones más exigentes, se realizó un barrido paramétrico del ángulo de incidencia  $\gamma$  hasta  $60^\circ$ . Los resultados, representados en la Figura 4.32, muestran cómo la diferencia de fase se degrada progresivamente con el aumento del ángulo, pero manteniendo un comportamiento aceptable hasta los  $40^\circ$ . Esto confirma que el diseño conserva su capacidad de manipular la fase de manera efectiva incluso en escenarios de incidencia oblicua, lo cual resulta fundamental para aplicaciones prácticas donde el ángulo de llegada de la onda no siempre es normal a la superficie.

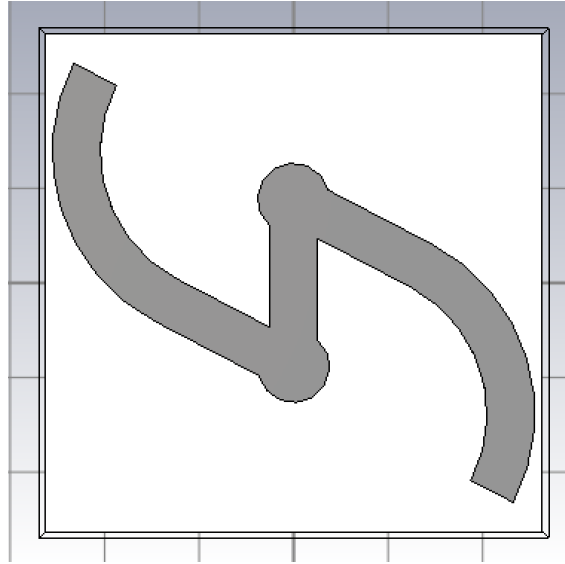


Figura 4.30: Diseño final de la celda unidad optimizada en CST Studio.

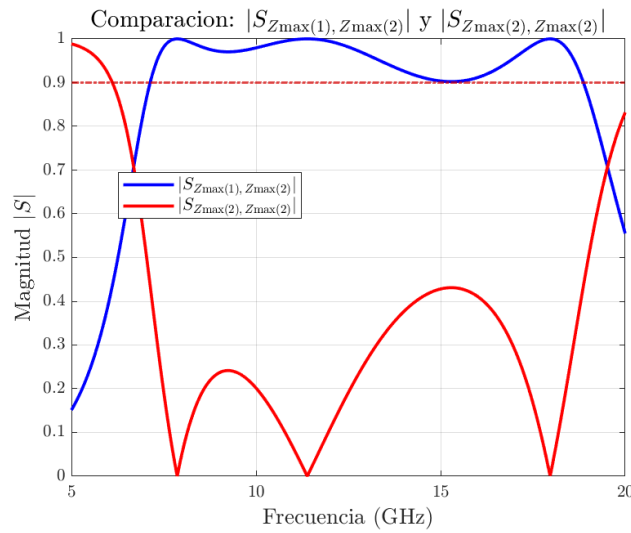


Figura 4.31: Comparación de los parámetros  $S$  obtenidos para la celda optimizada final.

En conclusión, la celda optimizada obtenida tras cuatro iteraciones presenta un diseño compacto, eficiente y robusto. Su amplitud cumple con el umbral exigido, la diferencia de fase se mantiene estable en la banda de trabajo, y además responde de forma adecuada bajo incidencia oblicua. Con estas propiedades, la figura final constituye una base sólida para aplicar codificaciones espaciales de fase (columnas y *chessboard*), orientadas a la reducción de la sección radar equivalente (RCS) en configuraciones más complejas.

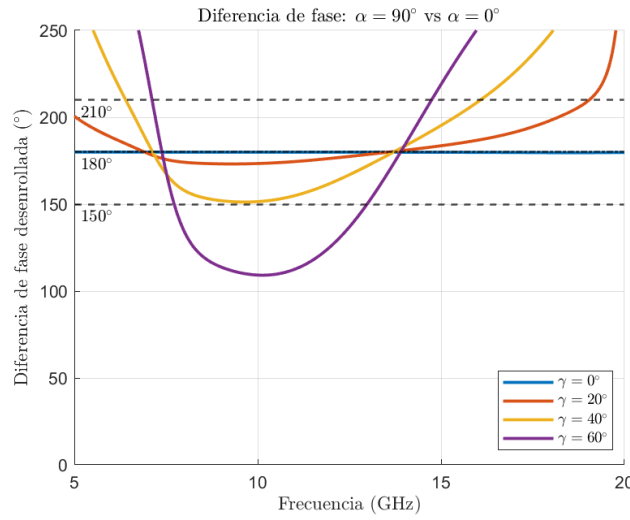


Figura 4.32: Comparación de la diferencia de fase de la figura optimizada final frente a distintos ángulos de incidencia.

## 4.7. Comparación de codificaciones espaciales

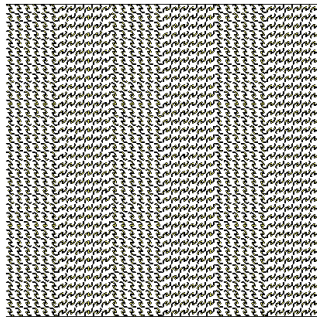
En esta sección se presentan los resultados obtenidos para la metasuperficie empleando diferentes esquemas de codificación espacial. Se han analizado dos disposiciones principales: *columns* y *chessboard*, comparándose ambas con la superficie de referencia PEC.

Para que la comparación sea justa, en todos los casos se ha mantenido el mismo número total de celdas, cumpliéndose que  $N_1 \cdot M_1 = N_2 \cdot M_2$ . De este modo, las diferencias observadas en los resultados provienen exclusivamente de la manera en que se organiza la fase sobre la superficie y no del tamaño físico de la misma.

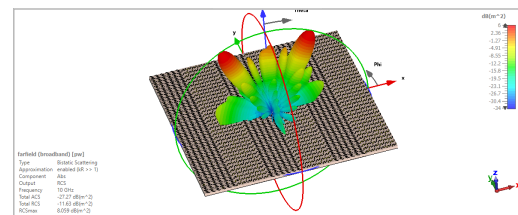
### 4.7.1. Codificación en columnas

En la configuración en columnas, los dos bits de fase se disponen formando franjas paralelas. Esta organización genera un gradiente espacial unidimensional que desvía la energía hacia direcciones laterales en lugar de concentrarla en la normal, como ocurre en el caso de la superficie PEC.

En la Figura 4.33 se presentan la vista general de la superficie y el diagrama de dispersión 3D. Se observa cómo la energía reflejada se concentra fundamentalmente en dos haces principales simétricos, resultado característico del *beam splitting* asociado a esta codificación. Este comportamiento permite reducir la retrodispersión en la dirección normal, aunque hace que el patrón no sea tan robusto angularmente.



(a) Vista 3D de la superficie con codificación en columnas.



(b) Diagrama de dispersión 3D a  $f = 10$  GHz.

Figura 4.33: Resultados de la codificación en columnas (N6M6).

En la Figura 4.34 se muestra el corte cartesiano en  $\theta$ , obtenido mediante un script de MATLAB. Se aprecia claramente la presencia de los dos lóbulos dominantes, que concentran la mayor parte de la potencia dispersada, junto con lóbulos secundarios de menor intensidad. Este resultado confirma el carácter direccional de la codificación en columnas: una reducción eficaz de la retrodispersión en unas pocas direcciones bien definidas, a costa de menor estabilidad angular frente a cambios de incidencia.

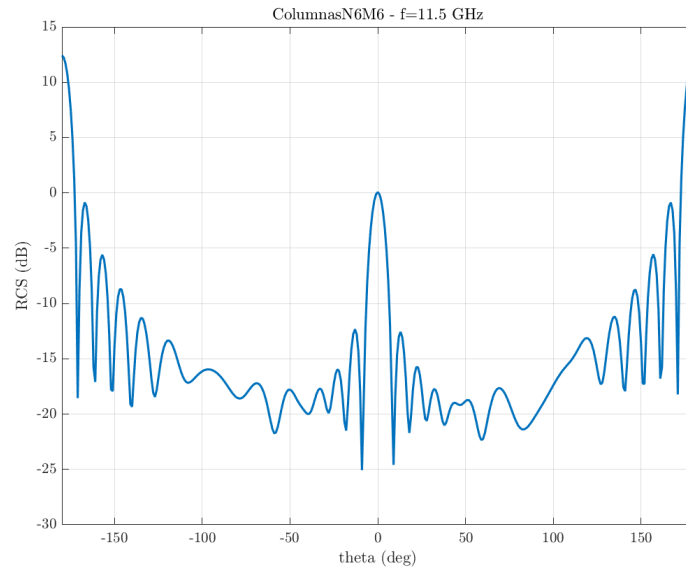
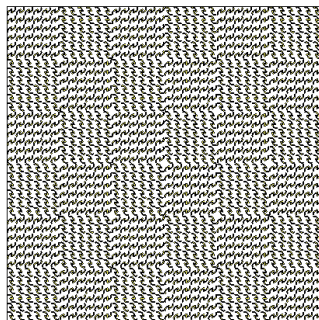


Figura 4.34: Corte en  $\theta$  para la codificación en columnas a  $f = 11,5$  GHz. Se aprecian dos haces principales simétricos y una fuerte reducción en la dirección normal.

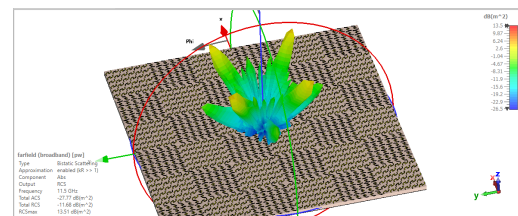
#### 4.7.2. Codificación tipo chessboard

En la configuración tipo *chessboard*, las fases se colocan alternando en ambas direcciones, generando un patrón bidimensional similar a un tablero de ajedrez. Este diseño rompe la simetría unidimensional de la codificación en columnas y consigue repartir la energía reflejada en un mayor número de direcciones.

En la Figura 4.35 se muestran la vista de la superficie y el diagrama de dispersión 3D. Se aprecia cómo la potencia reflejada se divide principalmente en cuatro haces predominantes, acompañados de lóbulos secundarios de menor intensidad. Esta dispersión en varios ángulos reduce la retrodispersión en la dirección normal y consigue una reducción más uniforme de la RCS, lo que proporciona una mayor robustez angular frente a variaciones en la incidencia.



(a) Vista 3D de la superficie con codificación tipo chessboard.



(b) Diagrama de dispersión 3D a  $f = 11,5$  GHz.

Figura 4.35: Resultados de la codificación tipo chessboard (N6M6).

Por otra parte, en la Figura 4.36 se incluye el diagrama cartesiano en  $\theta$  obtenido mediante un script de MATLAB. El gráfico confirma la presencia de los cuatro haces principales, situados aproximadamente en los cuadrantes diagonales, así como la reducción de la retrodispersión en  $\theta = 0^\circ$ . Los lóbulos secundarios aparecen más repartidos y con menor nivel que en el caso de codificación en columnas, contribuyendo a una dispersión más estable y angularmente robusta.

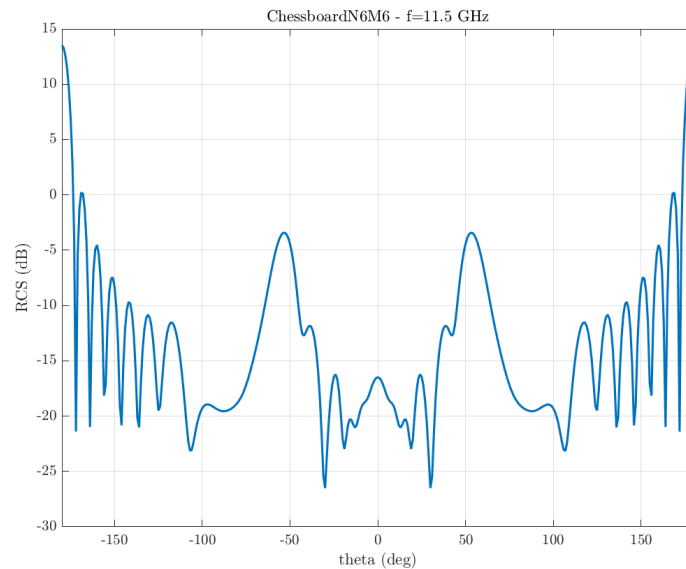


Figura 4.36: Corte en  $\theta$  para la codificación tipo chessboard a  $f = 11,5$  GHz. Se aprecian cuatro haces principales y una reducción significativa en la retrodispersión.

#### 4.7.3. Comparación de RCS en incidencia normal

En la Figura 4.37 se muestra la comparación de la RCS en incidencia normal ( $\theta = 0^\circ$ ) para los tres casos: *columnas*, *chessboard* y PEC.

Se observa cómo la superficie de referencia PEC presenta una respuesta monótonamente creciente con la frecuencia, alcanzando valores superiores a 15 dB a partir de los 18 GHz. En contraste, tanto la codificación en columnas como la tipo *chessboard* logran una reducción notable de la retrodispersión en prácticamente toda la banda considerada.

En el caso de columnas, destacan varios mínimos profundos: por ejemplo, en torno a  $f \approx 8$  GHz y  $f \approx 12$  GHz la RCS cae por debajo de los  $-15$  dB, mostrando una atenuación muy significativa respecto al PEC. En cambio, la codificación chessboard muestra valles menos profundos pero más regulares, situándose típicamente entre  $-5$  y  $-10$  dB en un rango amplio de frecuencias.

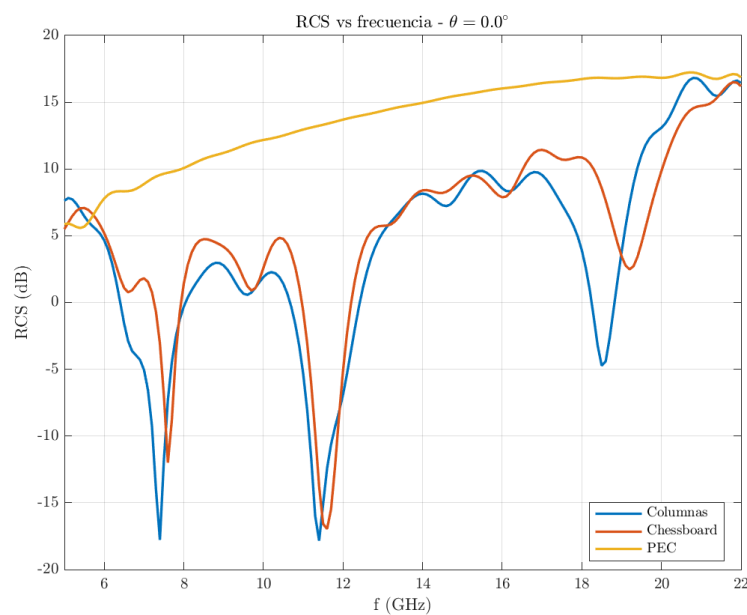


Figura 4.37: Comparación de RCS vs frecuencia en incidencia normal ( $\theta = 0^\circ$ ). Tanto la codificación en columnas como la tipo *chessboard* muestran reducciones significativas respecto a PEC.

En resumen, la configuración en columnas resulta más efectiva para obtener mínimos espectrales muy marcados, mientras que la codificación tipo *chessboard* proporciona una reducción más uniforme en un rango de frecuencias más amplio, aunque con menor atenuación puntual. Ambas estrategias suponen una mejora sustancial frente a la respuesta del PEC en incidencia normal.

#### 4.7.4. Comparación de RCS en incidencia oblicua

Para estudiar la robustez angular, se han analizado los casos de incidencia oblicua con  $\theta = 10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $40^\circ$ . En la Figura 4.38 se muestran los resultados obtenidos.

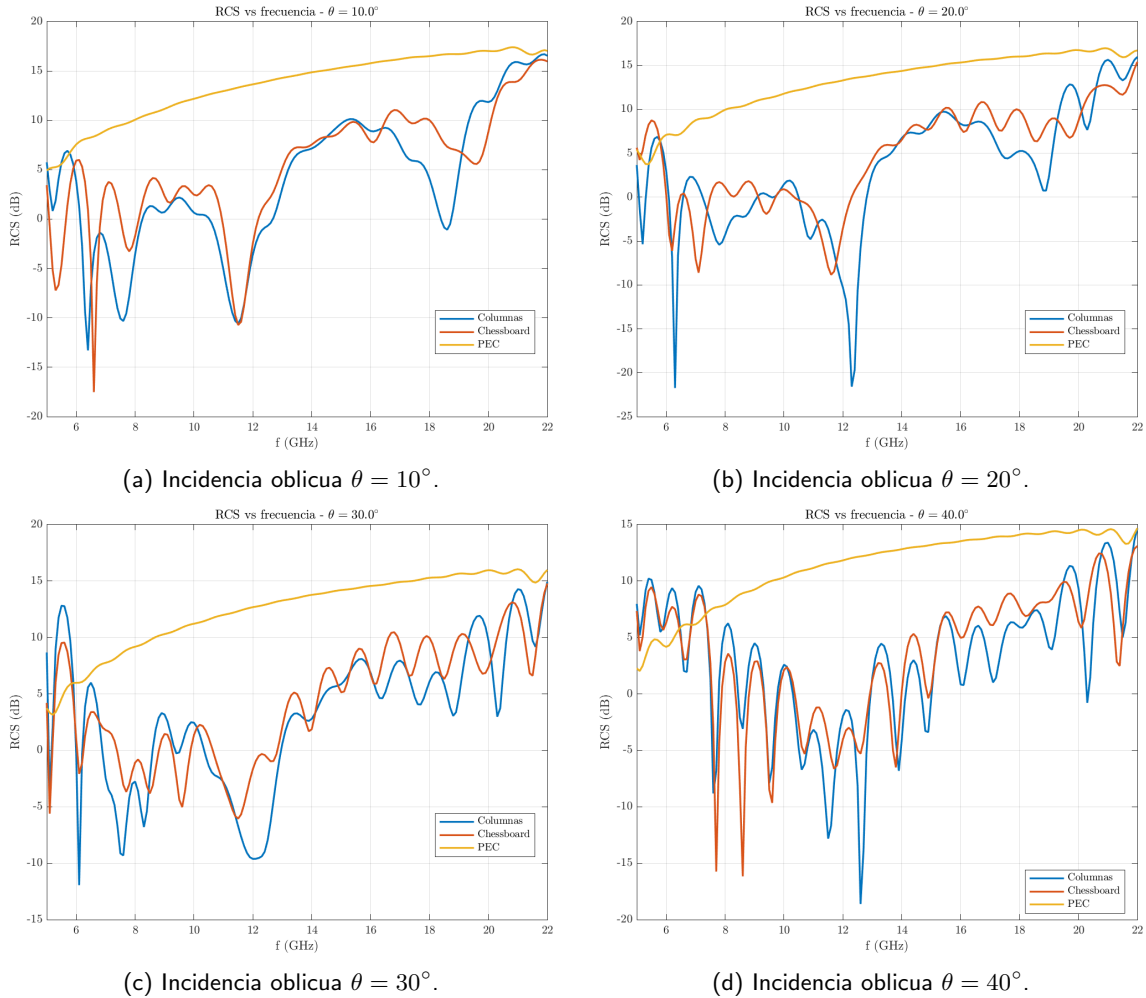


Figura 4.38: Comparación de RCS vs frecuencia bajo incidencia oblicua.

Al analizar estos resultados se aprecia una clara diferencia entre los dos esquemas de codificación. Para  $\theta = 10^\circ$  y  $\theta = 20^\circ$ , ambas codificaciones mantienen reducciones importantes de la RCS frente al PEC, aunque la disposición en columnas sigue mostrando valles más profundos en determinadas frecuencias, a costa de una mayor direccionalidad. En cambio, la codificación tipo *chessboard* reparte mejor la energía y presenta una respuesta más uniforme en todo el ancho de banda.

A medida que el ángulo aumenta ( $\theta = 30^\circ$  y  $\theta = 40^\circ$ ), la tendencia se hace más evidente: la configuración en columnas conserva su comportamiento direccional con dos lóbulos dominantes, pero pierde estabilidad espectral y aparecen oscilaciones más marcadas en la respuesta. Por su parte, el *chessboard* mantiene una reducción más homogénea y con menor dependencia angular, confirmando su mayor robustez frente a variaciones de incidencia.

En conjunto, puede concluirse que la estrategia en columnas es más efectiva si se buscan mínimos muy profundos en direcciones concretas, mientras que la disposición tipo *chessboard* resulta más adecuada cuando se requiere una reducción estable y angularmente robusta de la retrodispersión.

## Capítulo 5

# Lineas Futuras

El diseño presentado en este trabajo es solo un primer paso hacia el uso de metasuperficies pasivas de banda ancha para la reducción de RCS y con buen comportamiento frente a incidencia oblicua. Aun así, existen muchas formas de seguir mejorando y ampliando este estudio. En esta sección se resumen algunas posibles líneas de trabajo que podrían explorarse en el futuro, tanto a nivel de nuevas configuraciones como de aplicaciones prácticas.

Entre las ideas más destacadas está la posibilidad de pasar de estructuras pasivas a metasuperficies reconfigurables, capaces de adaptarse de forma dinámica. También se puede profundizar en diseños que conviertan la polarización (lineal a circular y viceversa), o en ampliar el ancho de banda hacia un funcionamiento multibanda. Otra opción interesante sería probar patrones de codificación espacial más complejos, que permitan dispersar la energía de forma más uniforme y robusta. Por último, un paso importante será la validación experimental del diseño mediante la fabricación de prototipos y su medida en laboratorio, para comprobar en la práctica los resultados de simulación y acercar el diseño a aplicaciones reales en comunicaciones y en reducción de firma radar.

En resumen, los resultados obtenidos muestran que es posible diseñar metasuperficies pasivas con un rendimiento notable en reducción de RCS y con un comportamiento estable bajo incidencia oblicua. Aunque todavía hay margen de mejora, el trabajo realizado sienta unas bases sólidas para continuar investigando en esta línea. Con los desarrollos futuros planteados, tanto en nuevas topologías como en validación experimental, se podrán dar pasos más firmes hacia metasuperficies con aplicaciones reales en el ámbito de las comunicaciones y de la reducción de la firma radar.

### 5.1. Metasuperficies Reconfigurables (RIS)

Una de las extensiones más claras de este trabajo es pasar de metasuperficies pasivas, como las diseñadas en este TFG, a *Reconfigurable Intelligent Surfaces* (RIS). Mientras que las metasuperficies pasivas tienen un comportamiento fijo una vez fabricadas, las RIS pueden modificar su respuesta de manera dinámica, adaptándose a las condiciones cambiantes del canal de comunicación. De este modo, constituyen una evolución de los principios aquí estudiados y se perfilan como una de las tecnologías clave para las futuras redes 6G, donde se espera que funcionen como “espejos inteligentes” capaces de redirigir y optimizar la propagación de las ondas en escenarios con obstáculos o zonas de sombra [11, 12].

Partiendo de la base de las metasuperficies estáticas, varios trabajos recientes han demostrado que también es posible fabricar RIS con materiales estándar de PCB, validando experimentalmente su rendimiento y mostrando que este tipo de estructuras pueden ser viables y asequibles para aplicaciones reales [13]. Esto amplía el rango de uso de las metasuperficies, que ya no solo se contemplan en ámbitos de investigación avanzada, sino también como soluciones prácticas de bajo coste y bajo consumo para entornos industriales e IoT, donde aportan mayor cobertura y fiabilidad en la comunicación [11].

Asimismo, la evolución desde las metasuperficies pasivas hacia RIS está permitiendo añadir nuevas funcionalidades. Entre ellas destacan la reconfiguración en frecuencia y la insensibilidad a la polarización, lo que garantiza un rendimiento más robusto incluso bajo variaciones angulares significativas [12]. También se investiga la introducción de esquemas de codificación espacio-temporal, que extienden las posibilidades de manipulación electromagnética más allá de lo explorado en este TFG. Este tipo

de técnicas empiezan a aplicarse en escenarios donde convergen comunicaciones y radar, incluyendo aplicaciones de seguridad como el *spoofing* en radares FMCW [14].

En este sentido, las RIS pueden entenderse como la prolongación natural de las metasuperficies pasivas analizadas en este trabajo de fin de grado. Aportan flexibilidad y funcionalidades adicionales que no están presentes en las estructuras estáticas, y que podrían complementarse con diseños basados en fase geométrica para aplicaciones tanto en comunicaciones como en reducción de firma radar.

## 5.2. Metasuperficies independientes de polarización

Una de las principales limitaciones de las metasuperficies pasivas es que su respuesta suele depender de la polarización de la onda incidente. En este TFG se ha trabajado con polarización circular y con fase geométrica de Pancharatnam–Berry, lo que permite obtener un buen control de la fase reflejada. Sin embargo, en aplicaciones reales las ondas pueden llegar con polarización lineal o con combinaciones intermedias, y en esos casos el rendimiento puede verse reducido si la estructura no es independiente de la polarización. Para superar esta limitación, se están desarrollando metasuperficies capaces de mantener un comportamiento estable sin importar la polarización de la señal incidente.

Se han propuesto diseños multibanda con simetría cuádruple que combinan parches cuadrados y anillos sobre sustratos convencionales, logrando absorción superior al 80 % en varios picos resonantes dentro de la banda 5–25 GHz y manteniendo un comportamiento prácticamente constante frente a cualquier ángulo de polarización [15]. Este tipo de estructuras permiten garantizar la reducción de RCS incluso bajo condiciones de polarización arbitraria, extendiendo así la aplicabilidad de las metasuperficies más allá del caso de polarización circular considerado en este TFG.

También se han desarrollado metasuperficies que, además de ser independientes de la polarización, pueden programarse para modificar su respuesta en tiempo real [16, 17]. En este caso cada celda ajusta la fase de forma distinta según la polarización de la onda, lo que permite varios estados de funcionamiento en una misma estructura. Relacionado con este TFG, donde se ha trabajado con una metasuperficie pasiva basada en fase geométrica, este tipo de avances permitiría combinar la estabilidad angular obtenida aquí con una mayor flexibilidad y adaptabilidad en escenarios reales.

La integración de estas aproximaciones con el principio de fase geométrica explorado en este TFG constituye una línea futura clara: metasuperficies pasivas optimizadas que evolucionen hacia estructuras multibanda, independientes de la polarización y con capacidad de reconfiguración. De este modo se podría mejorar simultáneamente la robustez angular y espectral, asegurando un funcionamiento estable en entornos más exigentes y realistas.

## 5.3. Metasuperficies de banda ancha

Otra línea de avance en el diseño de metasuperficies es la mejora del ancho de banda operativo. Mientras que en este TFG se ha trabajado en un rango concreto de frecuencias con fase geométrica de Pancharatnam–Berry, en aplicaciones prácticas resulta clave mantener un buen comportamiento en un espectro más amplio, ya que las señales de radar y comunicación suelen cubrir bandas extensas.

En este sentido, se han propuesto metasuperficies capaces de cubrir bandas muy anchas mediante distintas estrategias. Una de ellas se basa en superficies con fase de Fourier y células PB, alcanzando más de un 80 % de ancho de banda fraccional y reduciendo la RCS entre 10 y 24 GHz incluso bajo incidencia oblicua [18]. También se han diseñado estructuras de gradiente de fase que logran reducción difusa de la RCS en un amplio rango (10–20 GHz), manteniendo la respuesta estable frente a variaciones de frecuencia, ángulo e incluso polarización [19]. Por otro lado, se han desarrollado metasuperficies ultrafinas que convierten la polarización de manera eficiente con más del 90 % de ratio de conversión entre 12 y 27 GHz, lo que equivale a cubrir por completo las bandas Ku y K con una sola capa ligera y de bajo perfil [20].

En relación con este TFG, donde se ha optimizado una metasuperficie pasiva para conseguir amplitud elevada y fase controlada en un rango específico, estas propuestas de banda ancha muestran un camino claro hacia estructuras más robustas. Integrar los principios de fase geométrica aquí explorados con diseños capaces de mantener rendimiento en espectros amplios permitiría aumentar la aplicabilidad del trabajo, asegurando una reducción de RCS estable y eficaz en escenarios reales de comunicaciones y radar.

## 5.4. Metasuperficies con codificación espacial

En este TFG se han usado configuraciones como las columnas, el tablero de ajedrez (*chessboard*) y la disposición aleatoria, que ayudan a dispersar la energía reflejada y reducir la RCS. Otros trabajos han probado ideas parecidas pero con diferentes formas de codificación. Por ejemplo, la codificación multi-bit permite controlar mejor la fase de cada celda y así conseguir un comportamiento más amplio en frecuencia [21], mientras que la codificación 1-bit, basada en dos tipos de celdas distribuidas de forma aleatoria, genera una reflexión difusa y mantiene la reducción de RCS de manera estable en un rango muy ancho de frecuencias y ángulos [22].

También se han desarrollado superficies de gradiente de fase que dispersan la energía en múltiples direcciones, lo que permite mantener la reducción de RCS en bandas amplias como 10–20 GHz, incluso bajo variaciones de polarización e incidencia [19]. Estas aproximaciones amplían el concepto de las configuraciones utilizadas en este TFG, mostrando que los patrones en columnas o *chessboard* pueden evolucionar hacia diseños más flexibles y robustos en aplicaciones prácticas.

En resumen, los resultados obtenidos muestran que es posible diseñar metasuperficies pasivas con un rendimiento notable en reducción de RCS y con un comportamiento estable bajo incidencia oblicua. Aunque todavía hay margen de mejora, el trabajo realizado sienta unas bases sólidas para continuar investigando en esta línea. Con los desarrollos futuros planteados, tanto en nuevas topologías como en validación experimental, se podrán dar pasos más firmes hacia metasuperficies con aplicaciones reales en el ámbito de las comunicaciones y de la reducción de la firma radar.



## Capítulo 6

# Conclusión

En este trabajo se ha desarrollado un estudio completo orientado al diseño y optimización de una metasuperficie pasiva para la reducción de la sección radar (RCS), considerando tanto incidencia normal como oblicua. Partiendo de la formulación teórica y del análisis de la celda unidad, se ha establecido una metodología basada en simulaciones en CST Studio Suite y en un procesamiento posterior con MATLAB, lo que ha permitido evaluar de forma sistemática el comportamiento de distintas configuraciones y llevar a cabo un proceso iterativo de mejora. De esta manera, se ha conseguido definir una base sólida sobre la que comparar diferentes codificaciones espaciales y analizar su efecto en la dispersión electromagnética, cumpliendo así con los objetivos planteados al inicio del proyecto.

Los resultados obtenidos confirman la validez del diseño propuesto y permiten extraer conclusiones claras sobre el rendimiento de la metasuperficie. La celda unidad optimizada mostró un buen equilibrio entre amplitud y fase, manteniendo un comportamiento estable tanto en incidencia normal como en condiciones oblicuas de hasta  $40^\circ$ . Asimismo, la comparación entre las distintas codificaciones espaciales evidenció diferencias significativas respecto a la superficie de referencia PEC: la disposición en *columns* logró una dispersión más controlada fuera de la dirección especular, mientras que la configuración tipo *chessboard* proporcionó una reducción más homogénea de la RCS. En conjunto, estos resultados reflejan la efectividad de la estrategia de codificación para reducir la firma radar y muestran la robustez de la estructura frente a variaciones en el ángulo de incidencia.

A lo largo del desarrollo del proyecto se han adquirido conocimientos sólidos sobre el funcionamiento de las metasuperficies y su capacidad para manipular la fase geométrica mediante distintos esquemas de codificación espacial, así como experiencia práctica en el uso de herramientas avanzadas de simulación y postprocesado. El trabajo ha permitido comprender de forma más profunda los fenómenos de dispersión electromagnética y su control a través de estructuras periódicas, aportando un valor añadido en cuanto a la robustez angular alcanzada y la eficacia en la reducción de la RCS frente a configuraciones tradicionales.

No obstante, también se identifican limitaciones relevantes: la dependencia exclusiva de resultados numéricos sin validación experimental, la necesidad de acotar los parámetros geométricos dentro de un rango reducido para mantener la estabilidad de la celda, y el hecho de que el análisis se ha limitado a un rango de ángulos de incidencia de hasta  $40^\circ$ . Estos aspectos representan oportunidades de mejora para futuros trabajos que busquen extender el diseño hacia un escenario más amplio y realista.

En términos personales, la realización de este trabajo ha supuesto un reto académico y técnico que ha permitido poner en práctica los conocimientos adquiridos durante la carrera y complementarlos con nuevas competencias en el ámbito de las metasuperficies y el análisis electromagnético. A pesar de las dificultades encontradas, el balance final es muy positivo, ya que se han alcanzado los objetivos propuestos y se ha logrado una contribución coherente dentro del marco de las tecnologías de reducción de RCS. Además, este proyecto marca el cierre de una etapa universitaria muy significativa, en la que he podido formarme tanto a nivel académico como personal. Quiero expresar mi agradecimiento a mi tutor, Óscar, por su guía y apoyo constante durante todo el proceso, así como a la universidad por brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo y de haber cursado estos estudios que me han permitido crecer como ingeniero.



## Apéndice A

# Simulaciones en CST Studio Suite

En este apéndice se recopilan todas las simulaciones realizadas en CST Studio Suite, identificadas mediante un RunID único. La tabla siguiente muestra los valores de los parámetros geométricos empleados en cada caso ( $\beta$ ,  $g$ ,  $L$ ,  $L_{\text{diag}}$ ,  $R$ ), sirviendo como registro consolidado del estudio paramétrico.

Tabla A.1: Listado de simulaciones y valores paramétricos asociados a cada **RunID**.

| RunID | $\beta$ [°] | $g$ [mm] | $L$ [mm] | $L_{\text{diag}}$ [mm] | $R$ [mm] | $\alpha$ [°] | $\gamma$ [°] |
|-------|-------------|----------|----------|------------------------|----------|--------------|--------------|
| 1*    | 45.0        | 0.40     | 3.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 2     | 15.0        | 0.40     | 3.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 3     | 30.0        | 0.40     | 3.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 4     | 60.0        | 0.40     | 3.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 5     | 75.0        | 0.40     | 3.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 6     | 45.0        | 0.20     | 3.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 7     | 45.0        | 0.60     | 3.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 8     | 45.0        | 0.80     | 3.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 9     | 45.0        | 1.00     | 3.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 10    | 45.0        | 0.40     | 1.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 11    | 45.0        | 0.40     | 1.50     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 12    | 45.0        | 0.40     | 2.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 13    | 45.0        | 0.40     | 2.50     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 14    | 45.0        | 0.40     | 3.50     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 15    | 45.0        | 0.40     | 4.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 16    | 45.0        | 0.40     | 4.50     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 17    | 45.0        | 0.40     | 5.00     | 2.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 18    | 45.0        | 0.40     | 3.00     | 0.50                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 19    | 45.0        | 0.40     | 3.00     | 1.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 20    | 45.0        | 0.40     | 3.00     | 1.50                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 21    | 45.0        | 0.40     | 3.00     | 2.50                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 22    | 45.0        | 0.40     | 3.00     | 3.00                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 23    | 45.0        | 0.40     | 3.00     | 2.00                   | 0.50     | 0            | 0            |
| 24    | 45.0        | 0.40     | 3.00     | 2.00                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 25    | 45.0        | 0.40     | 3.00     | 2.00                   | 2.00     | 0            | 0            |
| 26**  | 60.0        | 0.50     | 2.75     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 27    | 45.0        | 0.50     | 2.75     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 28    | 48.0        | 0.50     | 2.75     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 29    | 51.0        | 0.50     | 2.75     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 30*** | 54.0        | 0.50     | 2.75     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 31    | 57.0        | 0.50     | 2.75     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 32    | 60.0        | 0.40     | 2.75     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 33    | 60.0        | 0.45     | 2.75     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |

\* Configuración base de la figura inicial (RunID=1).

\*\* Configuración central tras la primera iteración (RunID=26).

\*\*\* Mejor configuración de la segunda iteración (RunID=30).

\*\*\*\* Configuración final de la tercera iteración (RunID=57).

† Figura final optimizada (RunID=69/73).

| RunID  | $\beta$ [°] | $g$ [mm] | $L$ [mm] | $L_{\text{diag}}$ [mm] | $R$ [mm] | $\alpha$ [°] | $\gamma$ [°] |
|--------|-------------|----------|----------|------------------------|----------|--------------|--------------|
| 34     | 60.0        | 0.55     | 2.75     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 35     | 60.0        | 0.60     | 2.75     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 36     | 60.0        | 0.50     | 2.00     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 37     | 60.0        | 0.50     | 2.25     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 38     | 60.0        | 0.50     | 2.50     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 39     | 60.0        | 0.50     | 3.00     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 40     | 60.0        | 0.50     | 3.25     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 41     | 60.0        | 0.50     | 3.50     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 42     | 60.0        | 0.50     | 2.75     | 1.00                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 43     | 60.0        | 0.50     | 2.75     | 1.10                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 44     | 60.0        | 0.50     | 2.75     | 1.20                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 45     | 60.0        | 0.50     | 2.75     | 1.30                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 46     | 60.0        | 0.50     | 2.75     | 1.40                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 47     | 60.0        | 0.50     | 2.75     | 1.50                   | 1.00     | 0            | 0            |
| 48     | 60.0        | 0.50     | 2.75     | 1.50                   | 1.10     | 0            | 0            |
| 49     | 60.0        | 0.50     | 2.75     | 1.50                   | 1.20     | 0            | 0            |
| 50     | 60.0        | 0.50     | 2.75     | 1.50                   | 1.30     | 0            | 0            |
| 51     | 60.0        | 0.50     | 2.75     | 1.50                   | 1.40     | 0            | 0            |
| 52     | 60.0        | 0.50     | 3.50     | 1.30                   | 1.30     | 0            | 0            |
| 53     | 62.5        | 0.50     | 2.00     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 54     | 62.5        | 0.50     | 3.50     | 1.30                   | 1.30     | 0            | 0            |
| 55     | 62.5        | 0.50     | 1.50     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 56     | 62.5        | 0.50     | 1.75     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 57**** | 62.5        | 0.50     | 2.25     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 0            |
| 58     | 62.5        | 0.50     | 1.50     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 45           |
| 59     | 62.5        | 0.50     | 1.75     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 45           |
| 60     | 62.5        | 0.50     | 2.00     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 45           |
| 61     | 62.5        | 0.50     | 2.25     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 45           |
| 62     | 62.5        | 0.50     | 2.50     | 1.50                   | 1.50     | 0            | 45           |
| 63     | 62.5        | 0.50     | 1.50     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 0            |
| 64     | 62.5        | 0.50     | 1.75     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 0            |
| 65     | 62.5        | 0.50     | 2.00     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 0            |
| 66     | 62.5        | 0.50     | 2.25     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 0            |
| 67     | 62.5        | 0.50     | 2.50     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 0            |
| 68     | 62.5        | 0.50     | 1.50     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 45           |
| 69†    | 62.5        | 0.50     | 1.75     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 45           |
| 70     | 62.5        | 0.50     | 2.00     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 45           |
| 71     | 62.5        | 0.50     | 2.25     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 45           |
| 72     | 62.5        | 0.50     | 2.50     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 45           |
| 73†    | 62.5        | 0.50     | 1.75     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 20           |
| 74     | 62.5        | 0.50     | 1.75     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 40           |
| 75     | 62.5        | 0.50     | 1.75     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 60           |
| 76     | 62.5        | 0.50     | 1.75     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 20           |
| 77     | 62.5        | 0.50     | 1.75     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 40           |
| 78     | 62.5        | 0.50     | 1.75     | 1.50                   | 1.50     | 90           | 60           |

## Apéndice B

# Scripts en MATLAB

### B.1. SeparaParametros.m

```
clc; clear;

[fn, fp] = uigetfile('*.txt','Selecciona el archivo');
if isequal(fn,0), return; end
txt = fileread(fullfile(fp,fn));

blocks = regexp(txt, '#Parameters [^\n]*[\s\S]*?(?=(?:\r?\n)?#Parameters|$)',
    , 'match');

base = regexprep(fn, '\.txt$', '', 'ignorecase');
outDir = fullfile(fp, base);
if ~exist(outDir, 'dir'), mkdir(outDir); end

paramNames = {'alpha', 'gamma'};

patHeader = '#Parameters\s*=\s*\{([^\}]*)\}';
patKV = '([A-Za-z_]\w*)\s*=\s*([-+]?\d*\.\d+|(?:[eE] [-+]? \d+)?)';

for k = 1:numel(blocks)
    blk = blocks{k};

    tokens = regexp(blk, patHeader, 'tokens', 'once');
    if isempty(tokens), continue; end
    paramText = tokens{1};

    kv = regexp(paramText, patKV, 'tokens');
    if isempty(kv), continue; end

    keys = cellfun(@(c)c{1}, kv, 'uniformoutput', false);
    vals = cellfun(@(c)str2double(c{2}), kv);
    S = cell2struct(num2cell(vals), keys, 2);

    parts = strings(1, numel(paramNames));
    for j = 1:numel(paramNames)
        name = paramNames{j};
        if isfield(S, name)
            vs = sprintf('%.2f', S.(name));
            vs = strrep(vs, '.', '');
            vs = regexprep(vs, '^0+', '');
            if isempty(vs), vs = '0'; end
            parts(j) = name + vs;
        else
            parts(j) = name + "NA";
        end
    end

    newName = sprintf('%s_%.txt', base, strjoin(parts, '_'));
    fid = fopen(fullfile(outDir, newName), 'wt');
```

```

        if fid<0, continue; end
        fprintf(fid,'%s',blk);
        fclose(fid);

        fprintf('Bloque %d guardado: %s\n',k,newName);
    end

    disp('Hecho.');
```

## B.2. SPar\_Individual.m

```

close all; clear; clc;

set(groot, ...
    'defaultTextInterpreter','latex', ...
    'defaultLegendInterpreter','latex', ...
    'defaultAxesTickLabelInterpreter','latex');

n = input('N mero de configuraciones (1 4 ): ');
if ~ismember(n,1:4), error('Debe estar entre 1 y 4.');
```

end

```

[fn, fp] = uigetfile({'*_12.txt','TXT files'}, ...
    sprintf('Selecciona %d archivo(s) *_12.txt', n), ...
    'MultiSelect','on');
if isequal(fn,0), return; end
fn = cellstr(fn);
if numel(fn)~=n, error('N mero incorrecto de archivos.');
```

end

```

files_S12 = fullfile(fp,fn);
files_S22 = cellfun(@inferir_S22,files_S12,'UniformOutput',false);
for k=1:n
    if ~isfile(files_S22{k}), error('No se encuentra %s',files_S22{k}); end
end

data_S12 = cell(n,2);
data_S22 = cell(n,2);
for k=1:n
    [f12,m12] = leer_cst_txt(files_S12{k});
    [f22,m22] = leer_cst_txt(files_S22{k});
    data_S12{k,1}=f12; data_S12{k,2}=m12;
    data_S22{k,1}=f22; data_S22{k,2}=m22;
end

figure('Color','w'); hold on; grid on; box on;

h12 = gobjects(n,1);
h22 = gobjects(n,1);
for k=1:n
    h12(k)=plot(data_S12{k,1},data_S12{k,2},'b-','LineWidth',1.5,'
        HandleVisibility','off');
    h22(k)=plot(data_S22{k,1},data_S22{k,2},'r-','LineWidth',1.5,'
        HandleVisibility','off');
end

legend([h12(1),h22(1)], ...
    {'$|S_{Z\mathrm{max}}(1),Z\mathrm{max}(2)}|$', ...
    '$|S_{Z\mathrm{max}}(2),Z\mathrm{max}(2)}|$', ...
    'Location','best','FontSize',10);

yline(0.9,'-.','LineWidth',1.2,'Color',[0.85 0 0],'HandleVisibility','off')
;

xlabel('Frecuencia (GHz)','FontSize',12);
ylabel('Magnitud $|S|$', 'FontSize',12);
```

```

title('Comparaci n de $S_{12}$ y $S_{22}$','FontSize',13);

all_f = [vertcat(data_S12{:,1}); vertcat(data_S22{:,1})];
xlim([min(all_f), max(all_f)]);

%% Funciones
function [fGHz,mag] = leer_cst_txt(fname)
    fid=fopen(fname,'r');
    C=textscan(fid,'%f%f%f%f','Delimiter',{'\t',' '}, ...
        'MultipleDelimsAsOne',true,'CommentStyle','#');
    fclose(fid);
    fGHz=C{1}; mag=C{2};
end

function s22 = inferir_S22(path_s12)
    [p,n,e]=fileparts(path_s12);
    if contains(n,'_12'), n2=strrep(n,'_12','_22');
    else, n2=regexprep(n,'12$','22'); end
    s22=fullfile(p,[n2 e]);
end

function lab = etiqueta_archivo(pathfile)
    [~,n,~]=fileparts(pathfile);
    lab=n;
end

```

### B.3. SPAr\_12.m

```

% SPAr_12.m
close all; clear; clc;

labelParam = 'R'; % dejar '' para usar nombre de archivo

set(groot, ...
    'defaultTextInterpreter','latex', ...
    'defaultLegendInterpreter','latex', ...
    'defaultAxesTickLabelInterpreter','latex');

folder = uigetdir('', 'Selecciona la carpeta con .txt');
if isequal(folder,0), return; end
filesInfo = dir(fullfile(folder,'*.txt'));
if isempty(filesInfo), error('No hay .txt en %s',folder); end
[~,idx] = sort({filesInfo.name}); filesInfo = filesInfo(idx);
files = fullfile({filesInfo.folder},{filesInfo.name});

figure('Color','w'); hold on; grid on; box on; grid minor;
labels = cell(1,numel(files));
xmin = +inf; xmax = -inf;
results = struct('name',[],'label',[],'fStart',[],'fEnd',[],'BW',[]);
thr = 0.9;

for k = 1:numel(files)
    [fGHz, mag, params] = leer_cst_txt(files{k});
    plot(fGHz,mag,'LineWidth',1.6);
    xmin = min(xmin, fGHz(1));
    xmax = max(xmax, fGHz(end));

    if ~isempty(labelParam) && isfield(params, lower(labelParam))
        keyL = key_to_latex(labelParam);
        valS = params.(lower(labelParam)).str;
        labels{k} = sprintf('$s=%s$', keyL, valS);
    else
        [~, base, ext] = fileparts(files{k});
        labels{k} = sprintf('\texttt{$s$}', base, ext);
    end
end

```

```

end

[f1,f2,bw] = max_contiguous_bw(fGHz,mag,thr);
results(k).name = files{k};
results(k).label = labels{k};
results(k).fStart = f1;
results(k).fEnd = f2;
results(k).BW = bw;
end

draw_yline(thr,'--','LineWidth',1.2,'Color',[0.85 0 0],'HandleVisibility','off');
xlabel('Frecuencia (GHz)','FontSize',12);
ylabel('$|S_{\mathrm{max}}(1)\backslash,Z\mathrm{max}(2)}|$', 'FontSize',12);

ttl = 'Comparaci\''on de $|S_{\mathrm{max}}(1)\backslash,Z\mathrm{max}(2)}|$',
if ~isempty(labelParam), ttl = sprintf('%s\nVariaci\''on de $%s$', ttl,
    key_to_latex(labelParam)); end
title(ttl,'FontSize',13);

legend(labels,'Location','best');
xlim([xmin xmax]);

BWnum = [results.BW]';
[~,ord] = sort(BWnum,'descend');
disp('== BW (|S|>=0.9), ordenado ===');
disp(struct2table(results(ord)));

%% Funciones
function [fGHz, mag, params] = leer_cst_txt(fname)
    raw = fileread(fname);
    params = parse_params(raw);
    fid = fopen(fname,'r');
    if fid==-1, error('No se pudo abrir: %s',fname); end
    C = textscan(fid,'%f%f%f%f%f','Delimiter',{'\t',' '}, ...
        'MultipleDelimsAsOne',true,'CommentStyle','#');
    fclose(fid);
    if numel(C)<2 || isempty(C{1}) || isempty(C{2})
        error('Formato inesperado en %s',fname);
    end
    fGHz = C{1}; mag = C{2};
end

function params = parse_params(raw)
    params = struct();
    tok = regexp(raw,'#\s*Parameters\s*=\s*\{(.*)\}', 'tokens','once');
    if isempty(tok), return; end
    kv = regexp(tok{1},'([^\s;]+)=([^\s;]+)', 'tokens');
    for i=1:numel(kv)
        key = strtrim(lower(kv{i}{1}));
        val = strtrim(kv{i}{2});
        num = str2double(val);
        params.(key).str = val;
        if ~isnan(num), params.(key).val = num; end
    end
end

function out = key_to_latex(k)
    switch lower(strtrim(k))
        case 'l', out='L';
        case 'l_diag', out='L_{\mathrm{diag}}';
        case 'r', out='R';
        case 'a', out='a';
        case 'ax', out='a_x';
        case 'ay', out='a_y';
        case 'alpha', out='\alpha';
    end
end

```

```

        case 'beta', out='\beta';
        case 'gamma', out='\gamma';
        case 'theta', out='\theta';
        case 'g', out='g';
        case 'h', out='h';
        case 't', out='t';
        otherwise, out=k;
    end
end

function draw_yline(y, varargin)
    if exist('yline','file')==2
        yline(y,varargin{:});
    else
        xl = xlim; plot([xl(1) xl(2)],[y y],varargin{:});
    end
end

function [f1,f2,bw] = max_contiguous_bw(fGHz,mag,thr)
    ok = mag>=thr;
    if ~any(ok), f1=NaN; f2=NaN; bw=0; return; end
    d = diff([false; ok; false]);
    s = find(d==1); e = find(d==-1)-1;
    bwv = fGHz(e)-fGHz(s);
    [bw,idx] = max(bwv);
    f1 = fGHz(s(idx)); f2 = fGHz(e(idx));
end

```

## B.4. FaseDiffVSParam.m

```

% FaseDiffVSParam.m
close all; clear; clc;

paramKey = 'alpha'; % par metro para el eje X (p.ej. 'alpha', '
    gamma','L',...)
refPolicy = 'min'; % 'min' | 'max' | 'first' (elige referencia)
fTargetStr = input('Frecuencia objetivo en GHz (vac o = media): ','s');

set(groot, ...
    'defaultTextInterpreter','latex', ...
    'defaultLegendInterpreter','latex', ...
    'defaultAxesTickLabelInterpreter','latex');

folder = uigetdir('', 'Carpeta con .txt');
if isequal(folder,0), return; end
info = dir(fullfile(folder,'*.txt'));
if isempty(info), error('No hay .txt en %s',folder); end
[~,idx] = sort({info.name}); info = info(idx);
files = fullfile({info.folder},{info.name});

N = numel(files);
F = cell(N,1); PH = cell(N,1); PVAL = nan(N,1); LAB = strings(N,1);
for k=1:N
    [fGHz, ~, phDeg, params] = leer_cst_txt_phase(files{k});
    F{k} = fGHz; PH{k} = unwrap(phDeg*pi/180)*180/pi;
    if isfield(params, lower(paramKey)) && isfield(params.(lower(paramKey))
        , 'val')
        PVAL(k) = params.(lower(paramKey)).val;
        LAB(k) = sprintf('$%s=%s$', key_to_latex(paramKey), params.(lower(
            paramKey)).str);
    else
        [~,n,e] = fileparts(files{k});
        LAB(k) = sprintf('\texttt{%s%s}', n, e);
    end
end

```

```

end

switch lower(refPolicy)
    case 'min',    [~,iref] = min(PVAL);
    case 'max',    [~,iref] = max(PVAL);
    otherwise,     iref = 1;
end

useTarget = ~isempty(strtrim(fTargetStr));
if useTarget
    f0 = str2double(fTargetStr);
    if isnan(f0), error('Frecuencia inv lida.');
```

end

```

    phiAt = nan(N,1);
    for k=1:N
        phiAt(k) = interp1(F{k}, PH{k}, f0, 'linear','extrap');
    end
    dphi = angdiff_deg(phiAt, phiAt(iref));
    x = PVAL; y = dphi;
    xlab = sprintf('Parametro %s$', key_to_latex(paramKey));
    ylab = sprintf('$\Delta\varphi$ a %.3f GHz (deg)', f0);
    ttl = sprintf('Diferencia de fase vs %s (referencia: %s)', ...
        key_to_latex(paramKey), char(LAB(iref)));
else
    fmin = max(cellfun(@(v)v(1), F));
    fmax = min(cellfun(@(v)v(end), F));
    if fmin >= fmax, error('No hay solape de banda.');
```

end

```

    fgrid = linspace(fmin,fmax,1500).';
    phiGrid = nan(numel(fgrid),N);
    for k=1:N
        phiGrid(:,k) = interp1(F{k}, PH{k}, fgrid,'linear');
    end
    dphiGrid = angdiff_deg(phiGrid, phiGrid(:,iref));
    y = mean(dphiGrid,1,'omitnan').';
    x = PVAL;
    xlab = sprintf('Parametro %s$', key_to_latex(paramKey));
    ylab = '$\overline{\Delta\varphi}$ en banda (deg)';
    ttl = sprintf('Diferencia de fase media vs %s (ref: %s)', ...
        key_to_latex(paramKey), char(LAB(iref)));
end

ok = ~isnan(x);
x = x(ok); y = y(ok); LAB = LAB(ok);

haveFit = numel(x) > 1 && range(x) > 0;
if haveFit
    p = polyfit(x,y,1);
    yfit = polyval(p,x);
end

figure('Color','w'); hold on; grid on; box on;
plot(x,y,'o','MarkerSize',6,'DisplayName','$\Delta\varphi$');
if haveFit
    plot(x,yfit,'-','LineWidth',1.2,'DisplayName',sprintf('Ajuste: y=%.3g x
        %+.3g',p(1),p(2)));
end
xlabel(xlab); ylabel(ylab); title(ttl);
legend('Location','best');

T = table(x,y,'VariableNames',{'Param','DeltaPhaseDeg'});
T = sortrows(T,'Param');
disp(T);
if haveFit
    fprintf('Pendiente (deg/unidad de %s): %.6g\n', paramKey, p(1));
end

%% Funciones
```

```

function [fGHz, mag, phDeg, params] = leer_cst_txt_phase(fname)
    raw = fileread(fname);
    params = parse_params(raw);
    fid = fopen(fname, 'r');
    if fid == -1, error('No se pudo abrir: %s', fname); end
    C = textscan(fid, '%f%f%f%f', 'Delimiter', {'\t', ' '}, ...
        'MultipleDelimsAsOne', true, 'CommentStyle', '#');
    fclose(fid);
    if numel(C) < 3 || isempty(C{1}) || isempty(C{3})
        error('Se esperan al menos 3 columnas (Freq, |S|, Fase) en %s',
            fname);
    end
    fGHz = C{1}; mag = C{2}; phDeg = C{3};
end

function params = parse_params(raw)
    params = struct();
    tok = regexp(raw, '#\s*Parameters\s*=\s*\{(.*)\}', 'tokens', 'once');
    if isempty(tok), return; end
    kv = regexp(tok{1}, '([^\s;]+)=([\s;]+)', 'tokens');
    for i = 1: numel(kv)
        key = strtrim(lower(kv{i}{1}));
        val = strtrim(kv{i}{2});
        num = str2double(val);
        params.(key).str = val;
        if ~isnan(num), params.(key).val = num; end
    end
end

function out = key_to_latex(k)
    switch lower(strtrim(k))
        case 'l', out = 'L';
        case 'l_diag', out = 'L_{\mathrm{diag}}';
        case 'r', out = 'R';
        case 'alpha', out = '\alpha';
        case 'beta', out = '\beta';
        case 'gamma', out = '\gamma';
        case 'g', out = 'g';
        otherwise, out = k;
    end
end

function d = angdiff_deg(a, b)
    d = a - b;
    d = mod(d + 180, 360) - 180;
end

```

## B.5. FaseDiffVSAngulo.m

```

% FaseDiffVSAngulo.m
close all; clear; clc;

base_path = "C:\Users\pablo\Desktop\TrabajoFinGrado\Agosto\Resultados\
    FigDefinitiva\IncOblique\IncOblique";
gammas = ["0", "20", "40", "60"];

set(groot, 'defaultTextInterpreter', 'latex', ...
    'defaultLegendInterpreter', 'latex', ...
    'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');

figure('Color', 'w'); hold on; grid on; box on;
colors = lines(numel(gammas));

```

```

fprintf('Diferencia de fase unwrap (\\alpha=90^\\circ - \\alpha=0^\\circ)\\n
');

for k = 1:numel(gammas)
    g = gammas(k);
    f0 = fullfile(base_path, sprintf("IncOblique_alpha0_gamma%s.txt", g))
    ;
    f90 = fullfile(base_path, sprintf("IncOblique_alpha90_gamma%s.txt", g))
    ;
    if ~isfile(f0) || ~isfile(f90)
        warning('Faltan archivos para \\gamma=%s (\\alpha=0^\\circ o \\
            alpha=90^\\circ).', g);
        continue
    end

    D0 = leerFaseUnwrapped(f0);
    D90 = leerFaseUnwrapped(f90);

    f = union(D0.freq, D90.freq);
    ph0 = interp1(D0.freq, D0.phase_unwrapped, f, 'linear');
    ph90 = interp1(D90.freq, D90.phase_unwrapped, f, 'linear');
    dph = ph90 - ph0;

    plot(f, dph, 'LineWidth', 1.6, 'Color', colors(k,:), ...
        'DisplayName', sprintf('$\\gamma=%s^\\circ$', g));
end

yline(150, '--k', '$150^\\circ$', 'Interpreter', 'latex', 'HandleVisibility', 'off
', ...
    'LabelHorizontalAlignment', 'left', 'LabelVerticalAlignment', 'bottom', '
    LineWidth', 1.1);
yline(180, '-.k', '$180^\\circ$', 'Interpreter', 'latex', 'HandleVisibility', 'off
', ...
    'LabelHorizontalAlignment', 'left', 'LabelVerticalAlignment', 'bottom', '
    LineWidth', 1.1);
yline(210, '--k', '$210^\\circ$', 'Interpreter', 'latex', 'HandleVisibility', 'off
', ...
    'LabelHorizontalAlignment', 'left', 'LabelVerticalAlignment', 'bottom', '
    LineWidth', 1.1);

xlabel('Frecuencia (GHz)');
ylabel('Diferencia de fase desenrollada ($^\\circ$)');
title('Diferencia de fase: $\\alpha=90^\\circ$ vs $\\alpha=0^\\circ$');
ylim([0 250]);
legend('Location', 'best'); hold off;

%% Funci n
function D = leerFaseUnwrapped(filename)
    fid = fopen(filename, 'r');
    if fid==-1, error('No se pudo abrir: %s', filename); end
    header = strings(0,1);
    pos = ftell(fid);
    line = fgetl(fid);
    while ischar(line) && startsWith(strtrim(line), '#')
        header(end+1) = string(line);
        pos = ftell(fid);
        line = fgetl(fid);
    end
    fseek(fid, pos, 'bof');

    C = textscan(fid, '%f%f%f%f%f', 'Delimiter', {'\\t', ' '}, ...
        'MultipleDelimsAsOne', true, 'CommentStyle', '#');
    fclose(fid);

    freq = C{1};
    pha = C{end};

```

```

pha = unwrap(pha*pi/180)*180/pi;

alphaTok = regexp(strjoin(header), 'alpha\s*=\s*([\d\.]+)', 'tokens');
gammaTok = regexp(strjoin(header), 'gamma\s*=\s*([\d\.]+)', 'tokens');
if ~isempty(alphaTok), alpha = str2double(alphaTok{end}{1}); else,
    alpha = NaN; end
if ~isempty(gammaTok), gamma = str2double(gammaTok{end}{1}); else,
    gamma = NaN; end

D.freq = freq;
D.phase_unwrapped = pha;
D.alpha = alpha;
D.gamma = gamma;
end

```

## B.6. FaseDiffVSAngulo.m

```

% FaseDiffVSAngulo.m
close all; clear; clc;

base_path = "C:\Users\pablo\Desktop\TrabajoFinGrado\Agosto\Resultados\
FigDefinitiva\IncOblique\IncOblique";
gammas = ["0", "20", "40", "60"];

set(groot, 'defaultTextInterpreter', 'latex', ...
    'defaultLegendInterpreter', 'latex', ...
    'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');

figure('Color', 'w'); hold on; grid on; box on;
colors = lines(numel(gammas));

fprintf('Diferencia de fase unwrap (\\alpha=90^\\circ - \\alpha=0^\\circ)\n
');

for k = 1:numel(gammas)
    g = gammas(k);
    f0 = fullfile(base_path, sprintf("IncOblique_alpha0_gamma%s.txt", g))
    ;
    f90 = fullfile(base_path, sprintf("IncOblique_alpha90_gamma%s.txt", g))
    ;
    if ~isfile(f0) || ~isfile(f90)
        warning('Faltan archivos para \\gamma=%s (\\alpha=0^\\circ o \\
            alpha=90^\\circ).', g);
        continue
    end

    D0 = leerFaseUnwrapped(f0);
    D90 = leerFaseUnwrapped(f90);

    f = union(D0.freq, D90.freq);
    ph0 = interp1(D0.freq, D0.phase_unwrapped, f, 'linear');
    ph90 = interp1(D90.freq, D90.phase_unwrapped, f, 'linear');
    dph = ph90 - ph0;

    plot(f, dph, 'LineWidth', 1.6, 'Color', colors(k,:), ...
        'DisplayName', sprintf('$\\gamma=%s^\\circ$', g));
end

yline(150, '--k', '$150^\\circ$', 'Interpreter', 'latex', 'HandleVisibility', 'off
', ...
    'LabelHorizontalAlignment', 'left', 'LabelVerticalAlignment', 'bottom', '
    LineWidth', 1.1);
yline(180, '-.k', '$180^\\circ$', 'Interpreter', 'latex', 'HandleVisibility', 'off
', ...

```

```

        'LabelHorizontalAlignment','left','LabelVerticalAlignment','bottom','
        LineWidth',1.1);
yline(210,'--k','$210^\circ$','Interpreter','latex','HandleVisibility','off
',...
    'LabelHorizontalAlignment','left','LabelVerticalAlignment','bottom','
    LineWidth',1.1);

xlabel('Frecuencia (GHz)');
ylabel('Diferencia de fase desenrollada ($^\circ$)');
title('Diferencia de fase: $\alpha=90^\circ$ vs $\alpha=0^\circ$');
ylim([0 250]);
legend('Location','best'); hold off;

%% Funci n
function D = leerFaseUnwrapped(filename)
    fid = fopen(filename,'r');
    if fid==-1, error('No se pudo abrir: %s',filename); end
    header = strings(0,1);
    pos = ftell(fid);
    line = fgetl(fid);
    while ischar(line) && startsWith(strtrim(line),'#')
        header(end+1) = string(line);
        pos = ftell(fid);
        line = fgetl(fid);
    end
    fseek(fid,pos,'bof');

    C = textscan(fid,'%f%f%f%f%f','Delimiter',{'\t',' '},...
        'MultipleDelimsAsOne',true,'CommentStyle','#');
    fclose(fid);

    freq = C{1};
    pha = C{end};
    pha = unwrap(pha*pi/180)*180/pi;

    alphaTok = regexp(strjoin(header),'alpha\s*=\s*([\d\.]+)','tokens');
    gammaTok = regexp(strjoin(header),'gamma\s*=\s*([\d\.]+)','tokens');
    if ~isempty(alphaTok), alpha = str2double(alphaTok{end}{1}); else,
        alpha = NaN; end
    if ~isempty(gammaTok), gamma = str2double(gammaTok{end}{1}); else,
        gamma = NaN; end

    D.freq = freq;
    D.phase_unwrapped = pha;
    D.alpha = alpha;
    D.gamma = gamma;
end

```

## B.7. CartesianRCS.m

```

close all; clearvars;

archivo = '/Users/pablo/Documents/TrabajoFinGrado/TFG/Final/ChessboardN6M6
/1DCartesian.txt';
phi_corte = 90;
col_mag = 3;
freq_GHz = 11.5;

M = readmatrix(archivo,'NumHeaderLines',2);
theta = M(:,1); phi = M(:,2); magdb = M(:,col_mag);

dphi = abs(mod(phi - phi_corte + 180, 360) - 180);
tol = 0.5;
if any(dphi <= tol)

```

```

use = dphi <= tol;
else
[~,i] = min(dphi);
use = (phi == phi(i));
end
theta = theta(use);
magdb = magdb(use);

theta = mod(theta + 180, 360) - 180;

[theta, idx] = sort(theta);
magdb = magdb(idx);

[pth,] = fileparts(archivo);
[,label] = fileparts(pth);

figure('Color','w');
plot(theta, magdb, 'LineWidth', 1.5);
grid on; box on; xlim([-180 180]);
xlabel('theta (deg)'); ylabel('RCS (dB)');
title(sprintf('%s - f=%.3g GHz', label, freq_GHz));

```

## B.8. RCSvsFreq.m

```

close all; clearvars;

angulo_deg = 40;

files = {
    '/Users/pablo/Documents/TrabajoFinGrado/TFG/Final/ColumnasN6M6_IncObli/
    Columnas_inc40.txt', ...
    '/Users/pablo/Documents/TrabajoFinGrado/TFG/Final/
    ChessboardN6M6_IncObli/Chessboard_40.txt', ...
    '/Users/pablo/Documents/TrabajoFinGrado/TFG/Final/PEC/PEC_IncObli_40.
    txt' ...
};

names = {'Columnas', 'Chessboard', 'PEC'};

set(groot, 'defaultTextInterpreter', 'latex');
set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
set(groot, 'defaultLegendInterpreter', 'latex');

figure('Color','w'); hold on; grid on; box on;

tol = 0.6;

for k = 1:numel(files)
    M = readmatrix(files{k}, 'NumHeaderLines', 2);

    if size(M,2) >= 3
        freq = M(:,1);
        ang = M(:,2);
        rcs = M(:,3);

        d = abs(mod(ang - angulo_deg + 180, 360) - 180);
        use = d <= tol;
        if ~any(use)
            [~,i] = min(d);
            use = (ang == ang(i));
            fprintf('%[s] No hay %.1f , uso %.1f m s cercano.\n', names
                {k}, angulo_deg, ang(i));
        end
        freq = freq(use); rcs = rcs(use);
    end
end

```

```

else
    freq = M(:,1); rcs = M(:,2);
end

if max(freq) > 1e6
    freq = freq/1e9;
elseif max(freq) > 1e3
    freq = freq/1e3;
end

plot(freq, rcs, 'LineWidth',1.6);
fprintf('%s      f = [%.2f, %.2f] GHz\n', names{k}, min(freq), max(freq)
);
end

xlim([5 22]);
xlabel('f (GHz)');
ylabel('RCS (dB)');
legend(names, 'Location','best');
title(sprintf('RCS vs frecuencia -  $\theta = %.1f^\circ$ ', angulo_deg))
;

```

# Bibliografía

- [1] C. L. Holloway, E. F. Kuester, J. A. Gordon, J. O'Hara, J. Booth, and D. R. Smith, "An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 10–35, 2012.
- [2] H.-T. Chen, A. J. Taylor, and N. Yu, "A review of metasurfaces: Physics and applications," *Reports on Progress in Physics*, vol. 79, no. 7, p. 076401, 2016.
- [3] L. Zhang *et al.*, "Multiband low-rs metasurface based on phase cancellation," *Optics Express*, vol. 27, no. 20, pp. 28560–28570, 2019.
- [4] H. Yang, G. Wang, S. Xu, L. Li, and X. Chen, "A review of metasurface-based absorbers: From narrowband to broadband, from planar to non-planar," *Advanced Optical Materials*, vol. 6, no. 1, p. 1701006, 2017.
- [5] J. Cilliers, J. Smit, C. Baker, and K. Woodbridge, "On the gain in recognition performance due to the addition of polarisation in an x-band high range resolution radar evaluated for f-18 and f-35 targets using asymptotic em techniques," in *2015 IEEE Radar Conference (RadarCon)*, pp. 1296–1299, 2015.
- [6] I. Corbella, F. Torres, A. Camps, A. Colliander, M. Martin-Neira, S. Ribo, K. Rautiainen, N. Duffo, and M. Vall-llossera, "Miras end-to-end calibration: application to smos l1 processor," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 5, pp. 1126–1134, 2005.
- [7] W. Wu, K. Chen, T. J. Cui, Q. Cheng, and H. Chen, "Metasurface-enabled electromagnetic wave manipulation," *Materials Today*, vol. 32, pp. 178–194, 2020.
- [8] A. Murugesan, K. T. Selvan, A. K. Iyer, K. V. Srivastava, and A. Alphones, "A review of metasurface-assisted rcs reduction techniques," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 94, pp. 75–103, 2021.
- [9] B. Lin, W. Huang, J. Guo, Z. Wang, K. Si, and H. Ye, "An ultra-wideband 2-bit coding metasurface using pancharatnam–berry phase for radar cross-section reduction," *Scientific Reports*, vol. 12, p. 12397, 2022.
- [10] J. Su, W. Li, M. Qu, H. Yu, Z. Li, K. Qi, and H. Yin, "Ultrawideband rcs reduction metasurface based on hybrid mechanism of absorption and phase cancellation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 10, pp. 9415–9423, 2022.
- [11] A. Tarozzi, E. M. Vitucci, F. Fuschini, and R. Verdone, "Metasurfaces as 6g enabling technology: A discussion on ris applicability to industrial iot scenarios," in *2024 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 IoT (MetroInd4.0 IoT)*, pp. 377–382, 2024.
- [12] M. Arun Muthu Ram and S. Dey, "Polarization insensitive angularly stable and frequency reconfigurable programmable metasurface based ris for b5g/6g communication," in *2024 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON)*, pp. 1–5, 2024.
- [13] J. Cifuentes, J. Osa, I. Barrutia, and M. Mendicute, "Towards affordable ris devices: Electromagnetic simulation and implementation of metasurfaces," in *2024 14th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, pp. 421–426, 2024.
- [14] K. Han, H. Shi, R. Wang, and P. Zhang, "Utilizing space-time coding metasurface for fmcw radar spoofing in ris-assisted communication systems," in *2024 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA)*, pp. 108–111, 2024.

- [15] B. Riscob, N. R. Babu, A. Sinha, V. Siju, and S. K. Pathak, "Polarization independent multi-band metasurface absorber," in *2023 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON)*, pp. 1–4, 2023.
- [16] X.-Y. Luo, W.-L. Guo, K. Chen, and Y. Feng, "Polarization- and frequency-controlled multifunctional coding metasurface," in *2020 Cross Strait Radio Science Wireless Technology Conference (CSRSWTC)*, pp. 1–3, 2020.
- [17] W. Li, X. Wang, X. Liu, C. Chen, B. Yang, Y. Yang, and G.-M. Yang, "Dual-polarization 2-bit programmable metasurface element based on individual phase shifters," in *2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, vol. 1, pp. 1–3, 2024.
- [18] M. K. T. Al-Nuaimi, G.-L. Huang, W. G. Whittow, R.-S. Chen, and S.-W. Wong, "Realization of single-layer fourier phased metasurfaces for wideband rcs reduction," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 1179–1183, 2023.
- [19] H. S. Senapati, R. Anand, A. Kumar, and A. Sarkar, "Ultra-wideband dual-polarized frequency independent reflective metasurface for rcs reduction," in *2024 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON)*, pp. 1–3, 2024.
- [20] B. Kamal, B. Khan, J. Chen, Y. Yin, J. Ren, and S. Ullah, "Ultra-thin wideband polarization converting metasurface for complete ku and k bands microwave applications," in *2023 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, pp. 1–3, 2023.
- [21] X. Zeng, X. Zhong, Y. Cheng, C. Fang, and W. Wu, "Wideband rcs enhancement based on phase gradient metasurface," in *2022 IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, pp. 934–936, 2022.
- [22] Y. Xu, J. Liu, L. Gao, X. Ai, Z. Zhang, and H. Liang, "1-bit coding metasurface for wideband rcs reduction," in *2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China)*, pp. 1–3, 2022.