

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Diseño de arrays de antenas
reconfigurables alimentados por
redes corporativas en guía de onda
con tornillos de ajuste**

**Máster Universitario en Ingeniería de
Telecomunicación**

**Autor: VILLENA MEDINA, Raquel
Tutor: SÁNCHEZ OLIVARES, Pablo**

Junio, 2017

Diseño de arrays de antenas reconfigurables alimentados por redes corporativas en guía de onda con tornillos de ajuste

AUTOR: Raquel Villena Medina
TUTOR: Pablo Sánchez Olivares

Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)
Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones (TEC)
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Junio de 2017



Resumen

Este Trabajo Fin de Máster ha tenido como objetivo la realización de una antena reconfigurable de una entrada y cuatro salidas con una red corporativa en guía de onda rectangular, bajo el estándar WR-51 en el plano H. El control dinámico de amplitud y fase ha sido implementado mediante la introducción de tornillos convencionales o tornillos de ajuste dentro de la estructura de la red. La banda de frecuencias de trabajo comprende desde los 16GHz hasta los 18GHz (banda Ku).

Fijando la posición de los tornillos de ajuste dentro de la estructura de la red se consiguen distintos desfases, de tal forma que se modifique la fase con la que llega la señal del divisor a cada una de las salidas, tratando de no modificar el reparto de potencia a cada una de ellas.

Se han tomado dos puntos de referencia en este trabajo. El primero de ellos ha sido un divisor en guía de onda WR-51 de 1 entrada y 2 salidas, en el cual se ha conseguido reducir su tamaño y acercar las salidas entre sí manteniendo la posición de los tornillos en la medida de lo posible para realizar un divisor 1 a 4. El segundo se basa en un divisor de una entrada y cuatro salidas ya diseñado en, igualmente, WR-51, en el cual se han buscado nuevas configuraciones de tornillos. En ambos diseños se ha llevado a cabo un análisis de configuración de la red corporativa, así como la implementación de la antena y su simulación para las distintas configuraciones de tornillos.

Se ha realizado la construcción del segundo diseño tras obtener valores de simulación favorables y se ha realizado una comparativa entre simulación y medida. Las medidas han sido tanto de la red como de la antena completa utilizando el analizador de redes y la cámara anecoica del grupo RFCAS en la Escuela Politécnica Superior (UAM).

Palabras clave

Red de alimentación corporativa, guía de onda, plano H, estándar WR-51, plano H, divisor de primer nivel, divisor de segundo nivel, elemento radiante, parámetros S, adaptación, reflexión, array lineal, tornillo, diagrama de radiación.

Abstract

The aim of this project is the realization of a reconfigurable antenna of one input and four outputs with a corporate network in rectangular waveguide, under standard WR-51 in plane H. The control of the amplitude and phase has been through the introduction of conventional screws or adjustment screws into the network structure. The band of frequencies of the electromagnetic spectrum in which it has been worked is the band Ku, that includes from the 16GHz to the 18GHz.

By fixing the position of the adjusting screws within the network structure different phase is achieved on each of the outputs of the waveguide, but trying not to modify the distribution of power signal to each of them.

Two benchmarks have been taken in this work based in some other projects in RFCAS researching group. The first of these has been a 1-input and 2-outputs WR-51 waveguide divider, in which it has been possible to reduce its size and to bring the outputs closer together by maintaining the position of the screws as far as possible to make a divider 1 to 4. The second one is based on a divider of one input and four outputs already designed in also WR-51, in which new configurations of screws have been provided. In both designs, a configuration analysis of the corporate network has been carried out, as well as the implementation of the antenna and its simulation for the different configurations of screws.

The construction of the second design was carried out after obtaining favorable simulation values and a comparison was made between simulation and measurement. The measurement has been in both: network and radiation. It has been used the network analyzer and the Anechoic chamber of the RFCAS group in Escuela Politécnica Superior (UAM).

Keywords

Corporate power supply, waveguide, H-plane, standard WR-51, H-plane, first level divider, second level divider, radiant element, S parameters, adaptation, reflection, linear array, screw, radiation pattern.

Agradecimientos

Llega la versión de agradecimientos 2.0.

Como no puede ser de otra manera y porque se lo merece mogollón, gracias a mi tutor Pablo Sánchez Olivares por confiar, otra vez más, en mí, y otorgarme este maravilloso proyecto para cerrar la etapa universitaria de mi vida. ¡Tornillos al poder!

Por supuesto, gracias a la secta RFCAS, siempre estaremos ahí, ya sea por WhatsApp para compartir chorradas el 90% del tiempo, o por coincidencias aleatorias paseando por Madrid. Fuimos y siempre seremos RFCAS.

Y claro, gracias a los que siempre estamos ahí. Manu, compañero, por un año de TFM duro de narices pero que han dado o darán finalmente sus frutos. Al final echaré de menos tus momentos DJ y todo... menos el reggaetón. Eso jamás. Gabriel, el adoptado RFCaniano. Gracias por amenizarme tardes de soledad y por esas pedazo de meriendas del VIPS.

Quiero dedicar aquí un pequeñito espacio a aquellos compañeros de guerra de este año del Máster, tanto viejas como nuevas amistades. Ha sido un año, por decirlo de alguna manera suave y políticamente correcta, duro. Pero nos llevamos la experiencia al mundo laboral y buenos amigos al mundo personal, que esto último siempre sienta de maravilla. Y Carlos, menudo super contrato a dos años que nos ha salido, éxito rotundo. Ahora toca “desintoxicación”, como tú dices.

Ovejas, siempre ahí. Desperdigadas por el mundo, pero siempre juntas.

Otros desperdigados por el mundo, telecos y no tan telecos (ejemejem, traidores, ejemejem). Ojocuidao, que un día de estos me planto con la maleta en tierras nórdicas y no os libráis de mí ni con agua hirviendo. Y a los telecos en España, aunque no nos hemos visto apenas este año, no me olvido de vosotros.

¿La familia? Oh la familia, esas personas que conocen las palabras pero no entienden el contexto cuando les hablo de mi proyecto o mi trabajo. Se agradece el intento, de veras. No todos estamos tan mal de la cabeza como para querer dedicarnos a esto.

Gente caminera, vosotros sabéis quiénes sois. Aunque estos dos años de máster he estado en el mural de personas desaparecidas allá por a ETSICCP (vaya nombrecito que os traéis, la leche), yo os guardo un huequito en mi teleco corazón.

Y a ti, porque anda que no aguantas mis tonterías, y mis momentos esporádicos de idea feliz. Porque también intentas entender algo, pero las ondas no se ven, y si no se ven no existen. Ahí te quería yo ver usando Twitter en tu móvil sin la existencia de las ondas. Y porque las discusiones geeks que tenemos son lo más de lo más.

Y para el que se vaya a leer esta memoria, gracias y ¡mucho ánimo!

¡HakunaMatata! Vive y sé feliz.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	MOTIVACIÓN	1
1.2	OBJETIVOS.....	1
1.3	ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	2
2.	ESTADO DEL ARTE	3
2.1	CONCEPTO BÁSICO DE ANTENA	3
2.2	ELEMENTOS RADIANTES	8
2.3	GUÍA DE ONDA.....	12
2.4	CONCEPTO DE ARRAY DE ANTENAS	14
3.	FUNCIONAMIENTO DE LOS TORNILLOS DE AJUSTE	17
3.1	ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA DE LA RED.....	17
3.2	TORNILLOS DE AJUSTE DE FASE.....	17
3.3	DIVISOR DE POTENCIA DE PRIMER NIVEL	19
3.4	CONCLUSIONES DEL DIVISOR DISEÑADO EN [1].....	22
4.	ANTENA 1: ARRAY DE BOCINAS.....	25
4.1	DISEÑO DEL DIVISOR DE PRIMER NIVEL	25
4.2	DISEÑO DEL DIVISOR DE SEGUNDO NIVEL.....	26
4.3	DIVISOR COMPLETO	31
4.4	ELEMENTO RADIANTE: BOCINA	39
4.5	ANTENA FINAL.....	41
5.	ANTENA 2: ARRAY PARCHE+RANURA APLIADA	49
5.1	DIVISOR DE PRIMER NIVEL	50
5.2	DISEÑO DEL DIVISOR DE SEGUNDO NIVEL.....	54
5.3	DIVISOR COMPLETO	58
5.4	ESTUDIO DE MODOS SUPERIORES.....	66
5.5	ELEMENTO RADIANTE: PARCHE+RANURA APILADA	68
5.6	ANTENA FINAL.....	70
6.	CONSTRUCCIÓN Y MEDIDA	73
6.1	PROTOTIPO DE LA RED	73
6.2	MEDIDA DE LA ANTENA.....	74
7.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	83
7.1	CONCLUSIONES	83

7.2	TRABAJO FUTURO	83
	REFERENCIAS	85
Anexo A.	Comparativa del factor de array ideal y real para el diseño de la red 1.....	I
Anexo B.	Diagramas de radiación para el diseño de la red corporativa 2 con ranura y parche como elemento radiante	VII
Anexo C.	Planos del prototipo construido	XV
Anexo D.	Comparativa de los diagramas de radiación medidos vs simulado	XVII
Anexo E.	Comparativa de diagramas de radiación simulados, medidos y teóricos. XXI	
Anexo F.	Medidas de transmisión y adaptación de la antena medida con el analizador de redes	XXXI
Anexo G.	Calibración del analizador de redes.....	XXXIV
Anexo H.	Optimización de la transición entre el divisor de nivel 1 y los divisores de nivel 2 de la red 1	XXXVI
Anexo I.	Medida en transmisión de la antena 2	XXXVIII
Anexo J.	Estudio de modos superiores en la red 2	XXXIX
Anexo K.	Estudio de modos superiores en la antena 2	XLI

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2- 1 Parámetros circuitales de una antena	4
Figura 2- 2 Ondas incidentes y reflejadas en un dispositivo de n puertas.....	5
Figura 2- 3 Diagrama de radiación en un sistema de coordenadas polares	6
Figura 2- 4 Diagrama de radiación	7
Figura 2- 5 Parches rectangular y circular.....	9
Figura 2- 6 Representación esquemática de una ranura general	10
Figura 2- 7 Grado de acoplamiento en ranura sobre guía en función de su orientación con respecto a las líneas de corriente que circulan por su interior	10
Figura 2- 8 Bocina piramidal y geometría de una bocina	11
Figura 2- 9 Guía de onda rectangular	12
Figura 2- 10 Ancho de banda monomodo en una guía.....	13
Figura 2- 12 Iris en guía de onda.....	13
Figura 2- 13 Array lineal	14
Figura 2- 14 Desapuntamiento del Factor de Array para un array de 4 elementos separados $0.8\lambda_0$, con alimentación uniforme y desfase progresivo	15
Figura 3- 1 Introducción de un tornillo una guía de onda	Figura 3- 2 Introducción de un iris en una guía de
Figura 3- 3 Introducción de un tornillo sin cortocircuitar en una guía de onda	18
Figura 3- 4 Introducción de un tornillo una guía de onda	18
Figura 3- 5 Divisor inicial y su respuesta en adaptación, transmisión y fase, extraídas de [1]	19
Figura 3- 6 Prueba con un tornillo, extraído de [1]	20
Figura 3- 7 Adaptación de la estructura con un tornillo, extraído de [1]	20
Figura 3- 8 Movimiento en la carta de Smith al introducir un tornillo, extraído de [1].	20
Figura 3- 9 Módulo de parámetros de transmisión con un tornillo, extraído de [1].....	20
Figura 3- 10 Fase de parámetros de transmisión con un tornillo, extraído de [1]	20
Figura 3- 11 Prueba con dos tornillos, extraídos de [1]	21
Figura 3- 12 Adaptación de la estructura con dos tornillos, extraído de [1]	21
Figura 3- 13 Movimiento en la carta de Smith al introducir dos tornillos, extraído de [1]	21
Figura 3- 14 Módulo de parámetros de transmisión con dos tornillos, extraído de [1]..	21
Figura 3- 15 Fase de parámetros de transmisión con dos tornillos, extraído de [1].....	21
Figura 3- 16 Esquema de posición de tornillos del divisor 1-2, extraído de [1]	22
Figura 3- 17 Desfases producidos por cada combinación de par de tornillos, extraídos de [1]	22
Figura 4- 1 Esquema de la antena 1 completa	25
Figura 4- 2 Posiciones de los tornillos en el divisor de primer nivel de la red 1, extraído de [1].....	26
Figura 4- 3 Diseño de divisor de 2º nivel propuesto de la red 1.....	26
Figura 4- 4 Adaptación del divisor de 2º nivel propuesto de la red 1	26
Figura 4- 5 Estudio de los tornillos 1,2 situados en la parte externa de la red 1	27
Figura 4- 6 Estudio de los tornillos 1,2 situados en la parte interna de la red 1.....	27
Figura 4- 7 Tornillo 7 situado entre los tornillos 1 y 2 de la red 1	27
Figura 4- 8 Tornillos en la estructura del divisor de segundo nivel de la red 1	28

Figura 4- 9 Configuración 45° del divisor de primer nivel de la red 1	28
Figura 4- 10 Adaptación (S11) de la configuración 45° del divisor de primer nivel de la red 1	28
Figura 4- 11 Reparto de potencia para 45° del divisor de segundo nivel de la red 1	28
Figura 4- 12 Diferencia de fase para 45° del divisor de segundo nivel de la red 1	28
Figura 4- 13 Configuración 50° del divisor de primer nivel de la red 1	29
Figura 4- 14 Adaptación (S11) de la configuración 50° del divisor de primer nivel de la red 1	29
Figura 4- 15 Reparto de potencia para 50° del divisor de segundo nivel de la red 1	29
Figura 4- 16 Diferencia de fase para 50° del divisor de segundo nivel de la red 1	29
Figura 4- 17 Configuración 70° del divisor de primer nivel de la red 1	29
Figura 4- 18 Adaptación (S11) de la configuración 70° del divisor de primer nivel de la red 1	29
Figura 4- 19 Reparto de potencia para 70° del divisor de segundo nivel de la red 1	29
Figura 4- 20 Diferencia de fase para 70° del divisor de segundo nivel de la red 1	29
Figura 4- 21 Configuración 90° del divisor de primer nivel de la red 1	30
Figura 4- 22 Adaptación (S11) de la configuración 90° del divisor de primer nivel de la red 1	30
Figura 4- 23 Reparto de potencia para 90° del divisor de segundo nivel de la red 1	30
Figura 4- 24 Diferencia de fase para 90° del divisor de segundo nivel de la red 1	30
Figura 4- 25 Configuración 105° del divisor de primer nivel de la red 1	30
Figura 4- 26 Adaptación (S11) de la configuración 105 ° del divisor de primer nivel de la red 1	30
Figura 4- 27 Reparto de potencia para 105° del divisor de segundo nivel de la red 1 ...	30
Figura 4- 28 Diferencia de fase para 105° del divisor de segundo nivel de la red 1	30
Figura 4- 29 Configuración 120° del divisor de primer nivel de la red 1	31
Figura 4- 30 Adaptación (S11) de la configuración 120° del divisor de primer nivel de la red 1	31
Figura 4- 31 Reparto de potencia para 120° del divisor de segundo nivel de la red 1 ...	31
Figura 4- 32 Diferencia de fase para 120° del divisor de segundo nivel de la red 1	31
Figura 4- 33 Estructura del divisor completo de la red 1	32
Figura 4- 34 Adaptación de la estructura del divisor completo de la red 1	32
Figura 4- 35 Reparto de potencia de la estructura del divisor completo de la red 1	32
Figura 4- 36 Adaptación en carta de Smith de la estructura del divisor completo de la red 1	32
Figura 4- 37 Redes finales con las configuraciones de desfases progresivos de la red 132	
Figura 4- 38 Redes finales con las configuraciones de desfases quasi-progresivos de la red 1	33
Figura 4- 39 Resultados CST para configuración 20-20-20.....	34
Figura 4- 40 Resultados CST para configuración 50-50-50.....	34
Figura 4- 41 Resultados CST para configuración 70-70-70.....	35
Figura 4- 42 Resultados CST para configuración 120-120-120.....	35
Figura 4- 43 Resultados CST para configuración 30-20-30.....	36
Figura 4- 44 Resultados CST para configuración 40-30-15.....	36
Figura 4- 45 Resultados CST para configuración 50-40-30.....	37
Figura 4- 46 Resultados CST para configuración 50-40-50.....	37
Figura 4- 47 Resultados CST para configuración 70-70-50.....	38
Figura 4- 48 Resultados CST para configuración 90-80-70.....	38
Figura 4- 49 Geometría de una bocina	40
Figura 4- 50 Esquema bocina sectorial plano H.....	40

Figura 4- 51 Esquema bocina sectorial plano E	40
Figura 4- 52 Resultados de la bocina piramidal óptima	41
Figura 4- 53 Resultados de la antena 1 con la configuración 0-0-0	42
Figura 4- 54 Resultados de la antena 1 con la configuración 20-20-20	42
Figura 4- 55 Resultados de la antena 1 con la configuración 50-50-50	43
Figura 4- 56 Resultados de la antena 1 con la configuración 70-70-70	43
Figura 4- 57 Resultados de la antena 1 con la configuración 120-120-120	44
Figura 4- 58 Resultados de la antena 1 con la configuración 30-20-30	44
Figura 4- 59 Resultados de la antena 1 con la configuración 40-35-15	45
Figura 4- 60 Resultados de la antena 1 con la configuración 50-40-30	45
Figura 4- 61 Resultados de la antena 1 con la configuración 50-40-50	46
Figura 4- 62 Resultados de la antena 1 con la configuración 70-70-50	46
Figura 4- 63 Resultados de la antena 1 con la configuración 90-80-70	47
Figura 5- 1 Esquema de la antena 2.....	49
Figura 5- 2 Divisor de primero nivel de la red 2	50
Figura 5- 3 Divisor de primer nivel con los tornillos posicionados	51
Figura 5- 4 Desfases conseguidos y pares de tornillos empleados en el divisor en de primer nivel en la red 2 diseñada	51
Figura 5- 5 Esquema para 35° del divisor de primer nivel de la red 2	52
Figura 5- 6 Adaptación (S11) para 35° del divisor de primer nivel de la red 2.....	52
Figura 5- 7 Reparto de potencia para 35° del divisor de primer nivel de la red 2	52
Figura 5- 8 Diferencia de fase para 35° del divisor de primer nivel de la red 2.....	52
Figura 5- 9 Esquema para 55° del divisor de primer nivel de la red 2	52
Figura 5- 10 Adaptación (S11) para 55° del divisor de primer nivel de la red 2.....	52
Figura 5- 11 Reparto de potencia para 55° del divisor de primer nivel de la red 2	52
Figura 5- 12 Diferencia de fase para 55° del divisor de primer nivel de la red 2.....	52
Figura 5- 13 Esquema para 85° del divisor de primer nivel de la red 2	53
Figura 5- 14 Adaptación (S11) para 85° del divisor de primer nivel de la red 2.....	53
Figura 5- 15 Reparto de potencia para 85° del divisor de primer nivel de la red 2	53
Figura 5- 16 Diferencia de fase para 85° del divisor de primer nivel de la red 2.....	53
Figura 5- 17 Esquema para 130° del divisor de primer nivel de la red 2	53
Figura 5- 18 Adaptación (S11) para 130° del divisor de primer nivel de la red 2.....	53
Figura 5- 19 Reparto de potencia para 130° del divisor de primer nivel de la red 2	53
Figura 5- 20 Diferencia de fase para 130° del divisor de primer nivel de la red 2	53
Figura 5- 21 Divisor de segundo nivel de la red 2	54
Figura 5- 22 Divisor de segundo nivel con los tornillos posicionados.....	55
Figura 5- 23 Desfases conseguidos y pares de tornillos empleados en el divisor en Y en la red 2 diseñada	55
Figura 5- 24 Posición de los tornillos para desfase de 20° del divisor en Y de la red 2.	56
Figura 5- 25 Adaptación (S11) para 20° del divisor de segundo nivel de la red 2	56
Figura 5- 26 Reparto de potencia para 20° del divisor en Y de la red 2	56
Figura 5- 27 Diferencia de fase para 20° del divisor en Y de la red 2.....	56
Figura 5- 28 Posición de los tornillos para desfase de 45° del divisor en Y de la red 2.	56
Figura 5- 29 Adaptación (S11) para 45° del divisor de segundo nivel de la red 2	56
Figura 5- 30 Reparto de potencia para 45° del divisor en Y de la red 2	56
Figura 5- 31 Diferencia de fase para 45° del divisor en Y de la red 2.....	56
Figura 5- 32 Posición de los tornillos para desfase de 65° del divisor en Y de la red 2.	57
Figura 5- 33 Adaptación (S11) para 65° del divisor de segundo nivel de la red 2	57
Figura 5- 34 Reparto de potencia para 65° del divisor en Y de la red 2.....	57

Figura 5- 35 Diferencia de fase para 65° del divisor en Y de la red 2	57
Figura 5- 36 Posición de los tornillos para desfase de 85° del divisor en Y de la red 2	57
Figura 5- 37 Adaptación (S11) para 85° del divisor de segundo nivel de la red 2	57
Figura 5- 38 Reparto de potencia para 85° del divisor en Y de la red 2	57
Figura 5- 39 Diferencia de fase para 85° del divisor en Y de la red 2	57
Figura 5- 40 Posición de los tornillos para desfase de 130° del divisor en Y de la red 2	58
Figura 5- 41 Adaptación (S11) para 130° del divisor de segundo nivel de la red 2	58
Figura 5- 42 Reparto de potencia para 130° del divisor en Y de la red 2	58
Figura 5- 43 Diferencia de fase para 130° del divisor en Y de la red 2	58
Figura 5- 44 Estructura del divisor completo de la red 2	58
Figura 5- 45 Adaptación de la estructura del divisor completo de la red 2	58
Figura 5- 46 Reparto de potencia de la estructura del divisor completo de la red 2	59
Figura 5- 47 Adaptación en carta de Smith de la estructura del divisor completo de la red 2	59
Figura 5- 48 Redes finales con las configuraciones de desfases progresivos de la red 2	59
Figura 5- 49 Redes finales con las configuraciones de desfases quasi-progresivos de la red 2	60
Figura 5- 50 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 20-20-20	61
Figura 5- 51 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 65-65-65	61
Figura 5- 52 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 40-35-40	62
Figura 5- 53 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 45-40-45	62
Figura 5- 54 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 45-85-40	63
Figura 5- 55 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 65-55-45	63
Figura 5- 56 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 85-85-45	64
Figura 5- 57 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 85-90-85	64
Figura 5- 58 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 130-100-130	65
Figura 5- 59 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 130-145-130	65
Figura 5- 60 Modos superiores de la red 2 en la configuración 0-0-0	67
Figura 5- 61 Modos superiores de la red 2 en la configuración 130-145-130	67
Figura 5- 62 Elemento radiante unitario, con sustratos (izquierda) y sin sustratos (derecha), extraído de [2]	68
Figura 5- 63 Array de elementos radiantes, con sustratos (izquierda) y sin sustratos (derecha), extraídos de [2]	68
Figura 5- 64 Parámetro de reflexión pasiva del array, extraído de [2]	69
Figura 5- 65 Parámetro de reflexión activa del array, extraído de [2]	69
Figura 5- 66 Diagrama de radiación estimado, extraído de [2]	70
Figura 5- 67 Antena 2 completa (izquierda) y red 2 en guía de onda (derecha)	70
Figura 5- 68 Detalle de las ranuras de los elementos radiantes	70
Figura 5- 69 Detalle de los parches apilados de los elementos radiantes	70

Figura 6- 1 Prototipo 1: red	73
Figura 6- 2 A la izquierda, salida del divisor. A la derecha, entrada del divisor con flange WR51.....	74
Figura 6- 3 Elementos radiantes: parches, foam y ranuras, extraído de [2]	74
Figura 6- 4 Medida de la antena 2 en adaptación	75
Figura 6- 5 Medida en radiación de la antena 2	76
Figura 6- 6 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 0-0-0	76
Figura 6- 7 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 20-20-20	77
Figura 6- 8 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 45-40-45	77
Figura 6- 9 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 65-55-45	78
Figura 6- 10 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 85-85-45	78
Figura 6- 11 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 85-90-85	79
Figura 6- 12 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 130-100-130	79
Figura 6- 13 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 130-145-130	80
Figura 6- 14 Resultados en dirección de máximo apuntamiento de la antena para 16.5GHz	81
Figura 6- 15 Resultados en dirección de máximo apuntamiento de la antena para 17 GHz	81
Figura 6- 16 Ejemplo de apuntamiento positivo y negativo para una configuración.....	82
Figura 6- 17 Apuntamientos positivos y negativos de todas las configuraciones	82
 Figura A- 1Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 0-0-0	I
Figura A- 2Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 20-20-20 I	I
Figura A- 3Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 50-50-50II	II
Figura A- 4Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 70-70-70II	II
Figura A- 5Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 120-120-120	III
Figura A- 6Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 30-20-30	III
Figura A- 7Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 40-35-15	IV
Figura A- 8Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 50-40-30	IV
Figura A- 9Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 50-40-50	V
Figura A- 10Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 70-70-50	V
Figura A- 11Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 90-80-70	VI
 Figura B- 1Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 0-0-0.....	VII
Figura B- 2Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 0-0-0..	VII

Figura B- 3Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 20-20-20	VIII
Figura B- 4Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 20-20-20	VIII
Figura B- 5Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 65-65-65	VIII
Figura B- 6Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 65-65-65	IX
Figura B- 7Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 40-35-40.	IX
Figura B- 8Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 40-35-40	IX
Figura B- 9Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 45-40-45...	X
Figura B- 10Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 45-40-45	X
Figura B- 11Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 45-85-40.	X
Figura B- 12Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 45-85-40	XI
Figura B- 13Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 65-55-45	XI
Figura B- 14Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 65-55-45	XI
Figura B- 15Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 85-85-45	XII
Figura B- 16Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 85-85-45	XII
Figura B- 17Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 85-90-85	XII
Figura B- 18Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 85-90-85	XIII
Figura B- 19Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 130-100-130	XIII
Figura B- 20Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 130-100-130	XIII
Figura B- 21Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 130-145-130	XIV
Figura B- 22Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 130-145-130	XIV
Figura C- 1Plano de la tapa del prototipo	XV
Figura C- 2Plano de la base del prototipo	XVI
Figura D- 1Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 0-0-0	XVII
Figura D- 2Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 20-20-20	XVII
Figura D- 3Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 40-85-45	XVIII
Figura D- 4Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 45-40-45	XVIII
Figura D- 5Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 65-55-45	XVIII

Figura D- 6Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 65-65-65	XIX
Figura D- 7Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 85-85-45	XIX
Figura D- 8Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 85-90-85	XIX
Figura D- 9Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 130-100-130	XX
Figura D- 10Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 130-145-130	XX
Figura E- 1 Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 0-0-0.....	XXI
Figura E- 2 Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 0-0-0.....	XXI
Figura E- 3Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 20-20-20.....	XXII
Figura E- 4Comparativa diagramas a 17GHz para la configuración 20-20-20.....	XXII
Figura E- 5Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 40-85-45....	XXIII
Figura E- 6 Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 40-85-45.....	XXIII
Figura E- 7Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 45-40-45...	XXIV
Figura E- 8 Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 45-40-45.....	XXIV
Figura E- 9Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 65-55-45.....	XXV
Figura E- 10Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 65-55-45.....	XXV
Figura E- 11Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 65-65-65.	XXVI
Figura E- 12 Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 65-65-65...	XXVI
Figura E- 13Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 85-85-45	XXVII
Figura E- 14Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 85-85-45...	XXVII
Figura E- 15Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 85-90-85	XXVIII
Figura E- 16 Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 85-90-85.	XXVIII
Figura E- 17Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 130-100-130	XXIX
Figura E- 18 Comparativa diagramas a 17GHz para la configuración 130-100-130	XXIX
Figura E- 19Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 130-145-130	XXX
Figura E- 20Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 130-145-130	XXX
Figura F- 1 Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 20-20-20	XXXI
Figura F- 2Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 40-45-40	XXXI
Figura F- 3Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 65-55-45	XXXI
Figura F- 4Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 65-65-65	XXXII
Figura F- 5Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 40-85-45	XXXII
Figura F- 6Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 85-90-85	XXXII
Figura F- 7Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 130-100-130.....	XXXIII

Figura F- 8 Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 130-145-130.....	XXXIII
Figura G- 1 Analizador de redes Agilent E571C del RFcas.....	XXXIV
Figura G- 2 Kit de calibración WR-51 Flann Microwave LTD Calibration Kit 19703	XXXIV
Figura G- 3 Kit de calibración para coaxial Agilent 85052D 3.5mm Economy Calibration Kit	XXXV
Figura H- 1 Ejemplo de estructura del modelo circuital para el estudio de las transiciones de la red 1	XXXVI
Figura H- 2 Adaptación optimizada con ADS para la red 1.....	XXXVI
Figura I- 1 Módulo de medida de la red, extraído de [2]	XXXVIII
Figura J- 1 Modos superiores de la red 2 en la configuración 20-20-20	XXXIX
Figura J- 2 Modos superiores de la red 2 en la configuración 40-45-40	XXXIX
Figura J- 3 Modos superiores de la red 2 en la configuración 85-85-45	XL
Figura J- 4 Modos superiores de la red 2 en la configuración 85-90-85	XL
Figura J- 5 Modos superiores de la red 2 en la configuración 130-100-130	XL
Figura K- 1 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 0-0-0	XLI
Figura K- 2 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 20-20-20	XLI
Figura K- 3 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 40-85-45	XLII
Figura K- 4 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 65-55-45	XLII
Figura K- 5 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 85-85-45	XLIII
Figura K- 6 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 85-90-85	XLIII
Figura K- 7 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 130-100-130 ...	XLIV
Figura K- 8 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 130-145-130 ...	XLIV

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2- 1 División en frecuencias microondas	3
Tabla 3- 1 Posiciones de los tornillos del divisor 1-2, extraído de [1]	22
Tabla 4- 1 Posiciones de los tornillos de la estructura de divisor de segundo nivel de la red 1	28
Tabla 4- 2 Desfases conseguidos y pares de tornillos empleados en el divisor de segundo nivel en la red 1	28
Tabla 4- 4 Resumen de resultados de la red 1	39
Tabla 4- 5 Parámetros de la bocina piramidal óptima	40
Tabla 4- 6 Comparativa de resultados de apuntamiento ideal vs real de la red 1	48
Tabla 4- 7 Resumen de resultados de la red 2	66
Tabla 5- 1 Posiciones de los tornillos de la estructura de divisor de primer nivel de la red 2	51
Tabla 5- 3 Posiciones de los tornillos de la estructura de divisor en Y nivel de la red 2 diseñada	55
Tabla 5- 5 Comparativa de resultados de apuntamiento ideal vs real de la red 2	71
Tabla H- 1 Comparativa de resultados de desfase circuitales vs electromagnéticos del divisor completo de la red 1	XXXVII
Tabla I- 1 Medidas de desfase en red del prototipo	XXXVIII

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Actualmente existen diversas tecnologías que permiten realizar comunicaciones vía satélite con distintas prestaciones en alta frecuencia. Sin embargo, el uso de la guía de onda como red de alimentación asegura unas pérdidas muy bajas (imprescindibles si se quiere que la transmisión de la señal sea óptima para una comunicación) incluso a frecuencias muy altas. En contraposición a las buenas prestaciones en cuestión de transmisión se debe tener en cuenta que esta tecnología es más cara y físicamente más voluminosa y pesada que otras como líneas coaxiales o microstrip en las frecuencias de trabajo deseadas que podrían ser válidas, aunque presenten mayor atenuación.

Debido a las necesidades del mercado de reducir el tamaño y la cantidad de antenas existentes se hace uso de las llamadas antenas reconfigurables. Estas antenas permiten mediante distintos métodos modificar sus prestaciones de tal forma que puedan ser utilizadas para diferentes fines. Estas prestaciones se modifican dentro de la red de alimentación mediante la introducción de otros elementos. Se suelen usar componentes electrónicos que proporcionan bajo coste y una gran velocidad de conmutación. Sin embargo, pueden ser complejos de integrar en el sistema y producir un elevado nivel de pérdidas. Por lo tanto, en este trabajo se propone la utilización de tornillos convencionales sobre redes de guía para conseguir una red de alimentación variable con muy pocas pérdidas, además de tener una integración más sencilla y de bajo coste.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es diseñar un divisor de potencia como red corporativa que sea capaz de modificar las propiedades de la agrupación de antenas. Esta agrupación de antenas produce el diagrama de radiación, que depende de la distancia entre los elementos, la alimentación que se da a cada uno de ellos y sendas fases. Este diagrama de radiación tiene su máximo o lóbulo principal, centrado, típicamente, en 0° o 90° , es decir, apuntamiento broadside o endfire respectivamente.

Lo que se pretende es modificar esta dirección de apuntamiento mediante la introducción de unos tornillos convencionales (a partir de ahora tornillos de ajuste) que permite focalizar la señal transmitida a distintas direcciones ajustando la fase obtenida en cada elemento, mejorando así las prestaciones de la comunicación. Esta red corporativa se diseña en guía de onda WR-51 y utiliza una ranura con parche apilado como elemento radiante. Los tornillos de ajuste de fase utilizados son convencionales de métrica M2 (diámetro del tornillo de 2mm).

Se diseñan dos redes corporativas en la tecnología anteriormente nombrada. La primera de ellas basada en el Trabajo de Fin de Grado de Gema María Fernández Romero [1] como continuación del trabajo futuro. La segunda basada en el Proyecto de Fin de Carrera de Alfonso Tomás Muriel Barrado [2], donde se parte de su diseño de red corporativa divisoria y se estudia la posición de los tornillos de ajuste para modificar el apuntamiento del array.

El proceso de diseño parte del estudio de la posición de dichos tornillos de ajuste en los elementos de divisor 1-2 de cada una de las redes presentadas. Una vez realizado ese

estudio y decididas las posiciones, se estudia la estructura completa del divisor 1-4. Tras verificar los ajustes de fase teorizados se procede al estudio del desapuntamiento del array en la antena completa (red corporativa y elementos radiantes extraídos del trabajo de [2]). Finalmente se comprueba el correcto funcionamiento con la red corporativa construida y medida en la cámara anecoica.

Por último, se propone una estructura de divisor 1-8 para estudiar el efecto de desapuntamiento causado por 8 elementos radiantes.

1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción.** Motivación, objetivos y organización de la memoria.
- **Capítulo 2: Estado del arte.** Resumen de las características principales de una antena. Análisis de los elementos radiantes utilizados en este proyecto. Análisis de la tecnología utilizada para la red corporativa en este proyecto. Breve introducción de iris en guía de onda. Definición de agrupación de antenas.
- **Capítulo 3: Funcionamiento de los tornillos de ajuste.** Breve introducción del uso de tornillos de ajuste en redes de alimentación en guía para modificar las características de la agrupación de antenas (o array).
- **Capítulo 4: Antena 1 - Array de bocinas.** Diseño e implementación de un array de antenas con bocinas como elemento radiante.
- **Capítulo 5: Antena 2 - Array de parches+ranura apilados.** Diseño e implementación de un array de antenas con parches con ranura apilados como elemento radiante.
- **Capítulo 6: Construcción y medida.** Construcción de la antena 2 y comparativa entre simulación y medidas obtenidas.
- **Capítulo 7: Conclusiones y trabajo futuro.**
- **Referencias.**

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 CONCEPTO BÁSICO DE ANTENA

La definición de antena según el IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineering) “es un dispositivo generalmente metálico creado con el objetivo de radiar o recibir ondas electromagnéticas”, y que, además, “adapta la salida del transmisor o entrada del receptor al medio”.

Las antenas se pueden caracterizar por su comportamiento en radiación, directividad, polarización, ganancia, ancho de banda e impedancia. Se diseñan de tal forma que trabajen en un ancho de banda de frecuencia específico. Las bandas más comunes son las microondas, que abarcan desde los 300 MHz hasta los 300 GHz.

Tabla 2- 1 División en frecuencias microondas

Banda	Frecuencia	Longitud de onda (λ)
L	1 – 2 GHz	30-15 cm
S	2 – 4 GHz	15-7.5 cm
C	4 – 8 GHz	7.5 – 3.75 cm
X	8 – 12.4 GHz	3.75 – 2.42 cm
Ku	12.4 – 18 GHz	2.42 – 1.66 cm
K	18 – 26.5 GHz	1.66 – 1.11 cm
Ka	26.5 – 40 GHz	1.11 cm – 7.5 mm
Mm	40 – 300 GHz	7.5 – 1 mm

2.1.1 TIPOS DE ANTENAS

Debido a la gran posibilidad de diseño de antenas debido a la elección de sus parámetros y las diferentes tecnologías, existen diversos tipos agrupados de la siguiente forma:

- **Antenas lineales:** construidas con hilos conductores eléctricamente delgados.
- **Antena microstrip:** fabricadas sobre circuito impreso con espesores menores a $0.2\lambda_0$.
- **Antenas de apertura:** la radiación sale a través de una embocadura.
- **Agrupaciones:** conjunto de cualquier tipo de antena simple.
- **Antenas inteligentes:** agrupaciones de antenas que permiten adaptar las características de radiación en función al entorno gracias a un algoritmo de procesamiento.

2.1.2 PARÁMETROS DE UNA ANTENA

Los parámetros característicos de una antena son aquellos que permiten analizarla como una caja negra, ya sea desde un punto de vista circuital (en el cual se estudia la impedancia y la adaptación) o direccional (donde se estudia la ganancia, la directividad o el diagrama de radiación).

2.1.2.1 IMPEDANCIA

La impedancia de entrada de una antena es aquella que se define en su borde. En el caso de considerar la línea de transmisión que une una antena y generador como parte de la misma, esta impedancia ya no se define en sus bordes, sino en la propia línea.

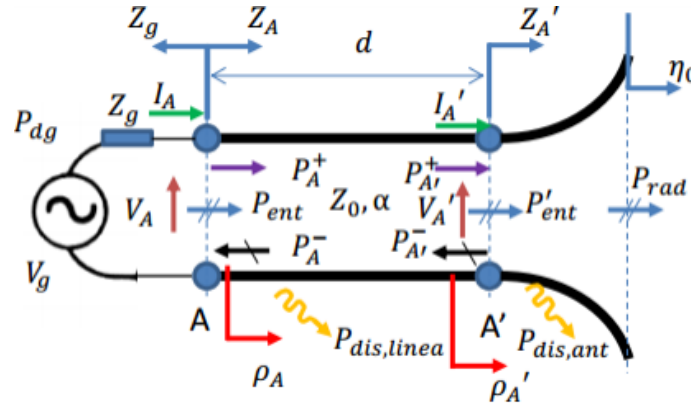


Figura 2- 1 Parámetros circuitales de una antena

Si se considera el voltaje que cae a la entrada de la línea V_A y a la corriente que entrega el generador I_A la impedancia de entrada a la antena seguiría la relación natural de voltaje sobre impedancia. Esta impedancia consta de parte real R_A e imaginaria X_A de tal forma que:

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = R_A + jX_A \quad (2.1)$$

Normalmente se quiere conseguir que la parte imaginaria o reactancia sea 0, ya que así se consigue una mejor resonancia.

La resistencia de entrada R_A , a su vez, puede separarse en dos diferentes resistencias, una de pérdidas y otra de radiación, mediante las cuales se extraen las potencias radiadas y disipadas.

$$R_A(w) = R_{rad} + R_L \quad (2.2)$$

La R_L ofrece información acerca de la potencia perdida debido al uso de conductores no perfectos y pérdidas del dieléctrico, generando disipación de calor de esa potencia perdida, mientras que la R_{rad} ofrece información sobre la potencia radiada por la antena.

$$P_{dis,total} = 0.5|I_A|^2 R_L; P_{rad} = 0.5|I_A|^2 R_{rad} \quad (2.3)$$

Otro parámetro importante a la hora de caracterizar y definir una antena es el coeficiente de reflexión, que relaciona la onda reflejada con la incidente en la discontinuidad. El coeficiente de adaptación indica la trasferencia de potencia entre las discontinuidades.

$$\rho_A = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0}; \Gamma = \frac{Z_A - Z_g^*}{Z_A + Z_g^*}; \quad (2.4)$$

2.1.2.2 PARÁMETROS DE DISPERSIÓN

Los parámetros S o parámetros de dispersión describen el comportamiento de cualquier dispositivo microondas. Cada terminal tiene definida una señal incidente (a_i) y otra reflejada (b_i).

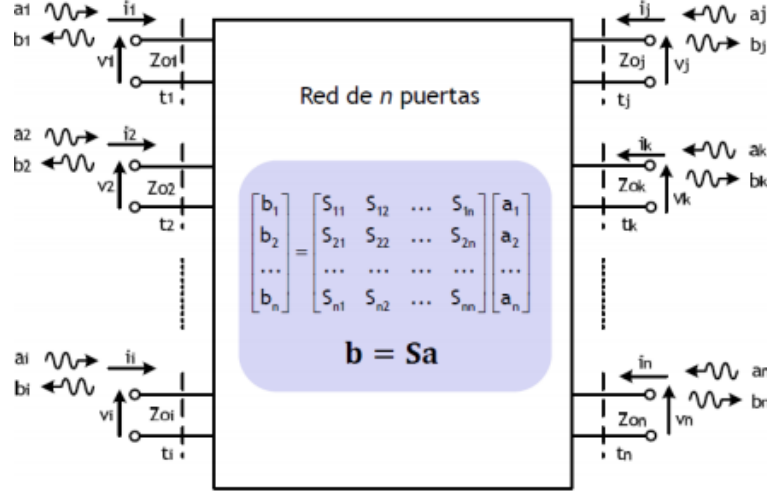


Figura 2- 2 Ondas incidentes y reflejadas en un dispositivo de n puertos

La matriz de parámetros S es la que relaciona las ondas incidentes y reflejadas de la red, que además es independiente de la frecuencia de funcionamiento del dispositivo. Se define de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Para calcular cada uno de los parámetros S_{ij} es necesario cargar cada uno de los terminales con su impedancia característica, menos el terminal i -ésimo donde se debe colocar un generador para crear la señal incidente. Cuando todas las ondas incidentes restantes son cero, se define como:

$$S_{ij} = \left(\frac{b_j}{a_i} \right), a_k = 0, \forall k \neq i \quad (2.6)$$

Se puede asignar una explicación física a los parámetros S como se describe a continuación, tal que los parámetros S_{ii} son los parámetros de reflexión y los S_{ji} son los de transmisión:

$$|S_{ii}|^2 = \frac{\text{Potencia reflejada en la puerta } i}{\text{potencia disponible en el generador en la puerta } i} \quad (2.7)$$

$$|S_{ji}|^2 = \frac{\text{Potencia reflejada en la puerta } j}{\text{potencia disponible en el generador en la puerta } i}; i \neq j \quad (2.8)$$

El parámetro que relaciona las señales incipientes (a_n) y salientes (b_n) para cada elemento de un dispositivo, es conocido como parámetro de reflexión activa. Suponiendo un dispositivo de cuatro elementos, este parámetro se define así para el elemento 2:

$$\Gamma_2 = \frac{b_2}{a_2} = S_{21} \frac{a_1}{a_2} + S_{22} + S_{23} \frac{a_3}{a_2} + S_{24} \frac{a_4}{a_2} \quad (2.9)$$

Si se considera alimentación uniforme, como ocurre en las redes de alimentación corporativas, $a_i = 1, \forall i$, por lo que la expresión anterior solo depende de los parámetros S. La expresión del parámetro de reflexión activa, separando parte real e imaginaria de los parámetros de dispersión, es la siguiente:

$$\Gamma_2 = |S_{21}|e^{j\phi_{21}} + |S_{22}|e^{j\phi_{22}} + |S_{23}|e^{j\phi_{23}} + |S_{24}|e^{j\phi_{24}} \quad (2.10)$$

2.1.2.3 DIAGRAMA DE RADIACIÓN

Un diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas angulares del espacio, por lo que se utiliza un sistema esférico de coordenadas, donde r es la distancia al origen, θ es el ángulo polar con respecto al eje $\hat{z}$ y ϕ es el ángulo correspondiente al eje $\hat{x}$ o azimut.

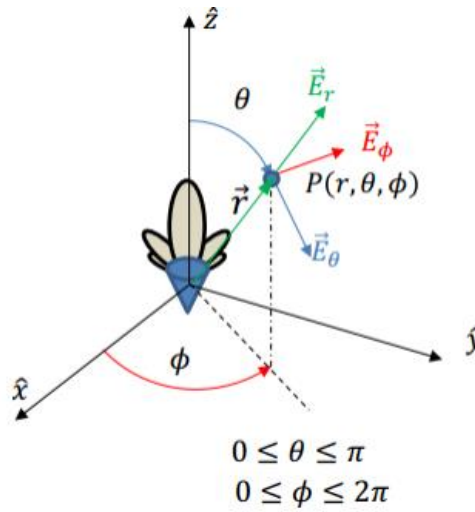


Figura 2- 3 Diagrama de radiación en un sistema de coordenadas polares

Por tanto, el campo queda definido por tres componentes:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}(r, \theta, \phi) = \vec{E}_r(r, \theta, \phi) + \vec{E}_\theta(r, \theta, \phi) + \vec{E}_\phi(r, \theta, \phi) \quad (2.11)$$

En el caso de antenas directivas y con polarización lineal basta con conocer los diagramas de los planos principales plano E (plano que contiene al vector de campo eléctrico $\vec{E}$ y la dirección de máxima radiación) y plano H (plano que contiene al vector de campo eléctrico $\vec{H}$ y la dirección de máxima radiación).

En antenas directivas y con polarización lineal es suficiente con conocer cómo se comporta la antena en los dos planos principales: el plano E, que contiene al vector E y

la dirección de máxima radiación, y el plano H, que contiene el vector H e igualmente la dirección de máxima radiación

Se puede observar el diagrama de radiación en coordenadas cartesianas. Para ello se realizan cortes del diagrama tridimensional para un θ o un φ fijos. Los parámetros característicos que se pueden extraer del diagrama de radiación en coordenadas cartesianas son los siguientes:

- Lóbulo principal: lóbulo con el máximo de radiación.
- Lóbulos secundarios: resto de lóbulos del diagrama.
- SLL o nivel de lóbulos secundarios: relación entre los niveles de lóbulo principal y los laterales.
- Ancho de haz a -3dB: ancho entre los puntos del lóbulo principal con una caída de -3dB o, lo que es lo mismo, una caída de la mitad de la potencia.
- Ancho de haz entre nulos: ancho entre dos nulos de radiación consecutivos.

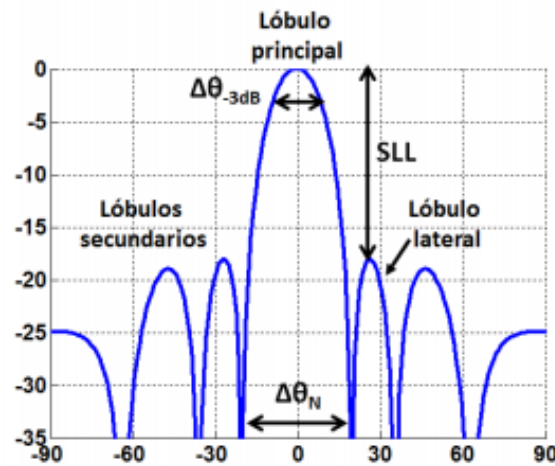


Figura 2- 4 Diagrama de radiación

2.1.2.4 DIRECTIVIDAD, GANANCIA, EFICIENCIA Y POLARIZACIÓN

Para definir los parámetros de directividad, ganancia y eficiencia hay que explicar brevemente los conceptos de ángulo sólido e intensidad de radiación:

Ángulo sólido

Es el equivalente tridimensional al radián: es la superficie abarcada por un cono formado por una sucesión de líneas radiales con vértice en el centro de una esfera, cuya unidad en el SI es el *estereorradián*.

$$d\Lambda = \frac{dS}{r^2} = \frac{r^2 \sin \theta d\theta d\phi}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.12)$$

Intensidad de radiación

Se define como la potencia radiada por unidad de ángulo sólido, dando información sobre la cantidad de energía que es capaz de emitir en una dirección concreta. A partir de esta intensidad de radiación U se puede saber cuánta potencia es capaz de radiar la antena:

$$P_{rad} = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} U(\theta, \phi) d\Lambda = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} U(\theta, \phi) d\Lambda = \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.13)$$

Directividad

La ganancia directiva $D(\theta, \phi)$ relaciona la intensidad de radiación de la antena en cada dirección del espacio con aquella de una antena isotrópica que radiara la misma potencia total. La D_0 es la directividad en la dirección de máxima radiación.

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{iso}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} = 4\pi \frac{r^2 |\langle \vec{S}(r, \theta, \phi) \rangle|}{P_{rad}} \quad (2.14)$$

Ganancia

La ganancia de potencia $G(\theta, \phi)$ relaciona la intensidad de radiación de la antena con la de una antena isotrópica que aceptase la misma potencia entregada que aquella bajo estudio. De la misma forma, G_0 es el valor de la ganancia en la dirección de máxima radiación.

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} = 4\pi \frac{r^2 |\langle \vec{S}(r, \theta, \phi) \rangle|}{P_{ent}} \quad (2.15)$$

Eficiencia

La eficiencia ζ mide las pérdidas totales en los terminales de entrada y en la estructura de la antena.

$$\zeta_{tot} = \frac{P_{rad}}{P_{dg}} = \frac{D_0}{G_0} \quad (2.16)$$

Polarización

La polarización del campo radiado por una antena es la figura que traza a lo largo del tiempo en una misma dirección el vector del campo radiado junto con su sentido de giro. Se define estando el observador en la antena.

En función de cómo sea el campo radiado se clasifica en distintas polarizaciones:

- **Polarización lineal:** el campo proyectado desde el plano del observador es una línea recta. Esta puede ser vertical u horizontal.
- **Polarización circular:** el campo proyectado se mueve sobre una circunferencia. Esta puede ser a derechas o a izquierdas.
- **Polarización elíptica:** el campo proyectado se mueve sobre una elipse. Esta puede ser circular a izquierdas o circular a derechas.

2.2 ELEMENTOS RADIANTES

Los elementos radiantes utilizados en una antena pueden ser de distinta naturaleza (ranuras, dipolos, aberturas...). En este apartado se describen aquellos utilizados en este proyecto.

2.2.1 PARCHES

Este tipo de antenas se construyen con tecnología de sustrato impreso, como es el caso de la microstrip. La línea microstrip es un tipo de línea de transmisión fabricada en tecnología impresa que se utiliza para transmitir señales de microondas. Está constituida por una fina lámina (strip) de material conductor de espesor t y anchura W , que es separada del plano de masa por una fina capa de material dieléctrico de altura h y constante dieléctrica ϵ_r . Los campos se generan tanto en el sustrato, donde se concentra la mayor parte, como en el aire. Por esto se dice que el modo propagado por las líneas microstrip no es puramente TEM, sino un quasi-TEM.

Las formas típicas de los parches son rectangulares y circulares. El modo de alimentar los parches suele ser por línea de transmisión microstrip o por sonda coaxial, aunque también puede usarse alimentación a través de líneas por proximidad o con una ranura intermedia entre la línea y el parche, como es el caso de este proyecto.

Esta tecnología tiene tanto ventajas como inconvenientes:

- **Ventajas:** puede ser fabricado utilizando placas y maquinaria de circuitos impresos o PCBs. Es más barato, ligero y compacto que la tecnología tradicional de guía de onda.
- **Inconvenientes:** tiene baja capacidad de manejo de energía y mayores pérdidas que la guía de onda. Además, por no estar cerrada es susceptible de captar más ruido.

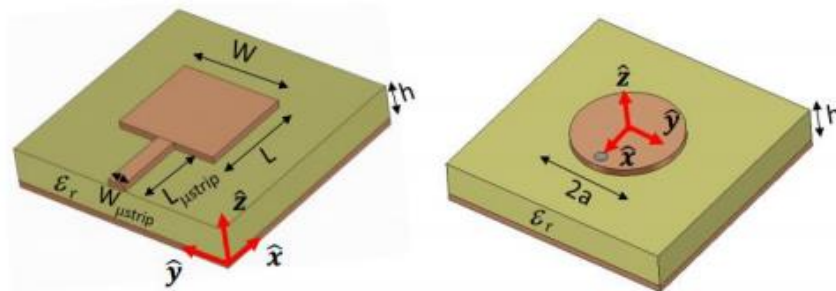


Figura 2- 5 Parches rectangular y circular

ALIMENTACIÓN MICROSTRIP

Hay múltiples formas para alimentar las antenas de parche. Las cuatro más típicas son las siguientes:

- **Alimentación por línea microstrip:** se utiliza una línea microstrip con un ancho considerablemente menor que el del parche. Es una alimentación sencilla de construir, de adaptar y de modelar. Sin embargo, si el sustrato es demasiado alto pueden aumentar las ondas de superficie y la radiación espúrea, reduciendo así el ancho de banda del parche que ya de por sí es limitado.
- **Alimentación por coaxial:** el alma del conector es soldada al parche mientras que el conductor exterior es unido al plano de masa. Al igual que la línea microstrip, es muy sencilla de fabricar e implementar e incluso disminuye la radiación espúrea, pero el ancho de banda disminuye igualmente y es mucho más difícil de diseñar.

- **Alimentación por acoplamiento por proximidad:** tiene el mayor ancho de banda de las cuatro, pudiendo alcanzar el 13%, es fácil de diseñar y tiene poca radiación espúrea pero su construcción es más difícil que las anteriores.
- **Alimentación por acoplamiento por ranura:** es la más difícil de fabricar de las cuatro y tiene un ancho de banda muy estrecho. Sin embargo, es algo más sencillo de modelar y tiene poca radiación espúrea. La ranura de acoplamiento está formada por dos sustratos separados por un plano de masa. En el sustrato inferior hay una línea microstrip de alimentación la cual acopla al parche a través de la ranura que hay entre ambos sustratos.

2.2.2 RANURAS

Se define ranura (slot) como una apertura en uno de los planos de masa de la línea de transmisión. A través de esta apertura la señal se escapa en forma de radiación.

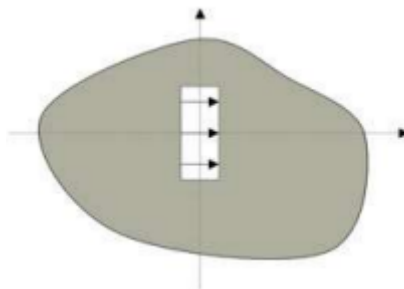


Figura 2-6 Representación esquemática de una ranura general

Se debe tener en cuenta a la hora de diseñar una ranura que una de las dimensiones de la ranura debe ser mucho menor que la longitud de onda de la señal incidente y la otra dimensión debe ser ligeramente inferior a la longitud de onda para así lograr resonancia.

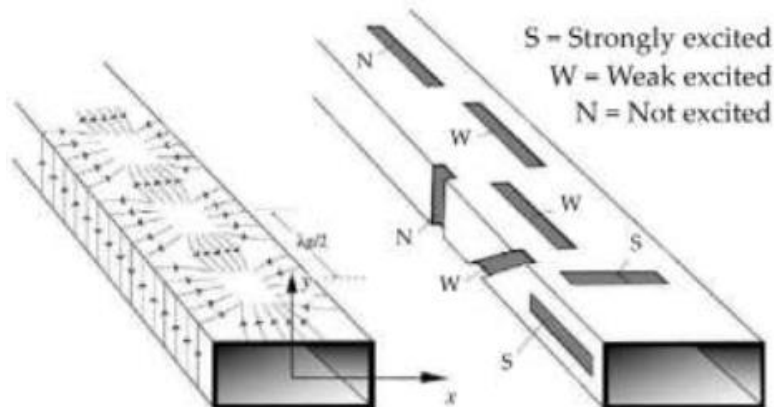


Figura 2-7 Grado de acoplamiento en ranura sobre guía en función de su orientación con respecto a las líneas de corriente que circulan por su interior

La ranura alimentada por guía de onda (tal y como se diseña en este proyecto) se puede categorizar en una de las tres siguientes según su orientación:

- **Ranura S (excitación fuerte):** dispuestas a lo largo del eje $\hat{x}$ en la cara de mayor anchura de la guía y a lo largo del eje y en la otra, ambas centradas respecto a su centro. Acopla niveles altos de potencia debido a que las líneas de corriente en estas zonas circulan perpendiculares a la dimensión mayor de la ranura, en la dirección de propagación.

- **Ranura N** (excitación nula): similares a las ranuras de tipo S, pero dispuestas perpendicularmente a ellas, de manera que la corriente circula paralela a la dimensión mayor de la ranura, y no acopla ningún nivel de potencia.
- **Ranura W** (excitación débil): orientadas de la misma manera que las ranuras tipo N, pero desplazadas hacia uno de los bordes laterales de la guía, de manera que va acoplando más potencia cuanto más se acerquen a él. Esto es debido a que desde el centro al borde de la cara de la guía las líneas giran progresivamente hasta llegar a los 90°.

2.2.3 BOCINAS

Una bocina es una antena de tipo apertura que tiene como características gran ancho de banda y pocas pérdidas. Estas antenas son alimentadas mediante guía de onda que propaga uno o varios modos. Las dimensiones van aumentando progresivamente hasta que la apertura equivalente en la boca de la guía tenga las dimensiones adecuadas para conseguir la directividad deseada. Para aumentar esta directividad se aumenta la dimensión correspondiente en función de en qué plano se realiza la apertura, produciéndose una diferencia de fase. Esta diferencia de fase implica que la distribución de campos en las bocinas será el mismo que en la guía de alimentación pero con un término de fase adicional.

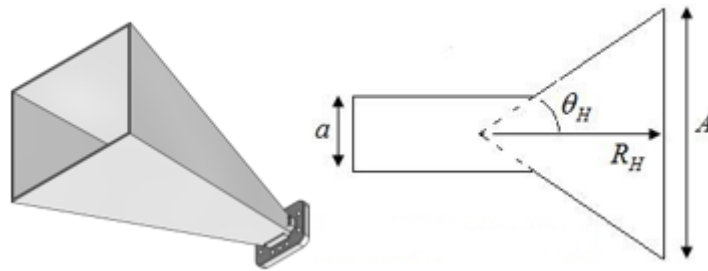


Figura 2- 8 Bocina piramidal y geometría de una bocina

Hay varios tipos de bocinas:

- **Bocina en plano H:** su apertura se produce en el plano horizontal y se alimenta por guía de onda rectangular. Propagan el modo fundamental de la guía rectangular TE_{10}
- **Bocina en plano E:** su apertura se produce en el plano vertical y se alimenta por guía de onda rectangular. Propagan el modo fundamental de la guía rectangular TE_{10}
- **Bocina piramidal:** su apertura se produce en ambos planos y se alimenta por guía de onda rectangular. Propagan el modo fundamental de la guía rectangular TE_{10}
- **Bocina cónica:** se alimenta por guía de onda circular, y propagan el modo fundamental TE_{11}

Para diseñar una bocina óptima (aquella que produzca máxima directividad y ganancia en la frecuencia de diseño) y mínimo error de fase en su apertura se deben tener en cuenta sendos parámetros fijando el valor de R_1 .

En el caso de bocinas sectoriales plano H las fórmulas son las que aparecen a continuación:

$$A_{opt} = \sqrt{3\lambda_0 R_1} \quad (2.17) \quad t_{opt} = \frac{A_{opt}^2}{8\lambda_0 R_1} \quad (2.18)$$

Si se trata de una bocina sectorial plano E las fórmulas son:

$$B_{opt} = \sqrt{2\lambda_0 R_2} \quad (2.19) \quad s_{opt} = \frac{B_{opt}^2}{8\lambda_0 R_2} \quad (2.20)$$

A su vez, la combinación de ambos tipos de bocinas son las reglas de diseño de mínimo error de fase para la bocina piramidal.

La distancia longitudinal que debe tener la bocina óptima depende del radio R_1 y un factor de corrección definida como

$$\gamma_{plano1} = \text{atan}\left(\frac{A_{opt}}{2R_1}\right) \quad (2.21) \quad L_1 = R_1 - \frac{a}{2 \tan(\gamma_{plano1})} \quad (2.22)$$

2.3 GUÍA DE ONDA

Una guía de onda es un elemento físico que propaga ondas electromagnéticas. Está formada por un único conductor cerrado metálico con un dieléctrico en su interior, usualmente aire. Este tipo de antenas, debido a su estructura, reduce la disipación de energía, lo que las hace apropiadas para aplicaciones en altas frecuencias y, en concreto, para el rango de las microondas.

Una guía de onda es un elemento físico que se encarga de la propagación de una onda mediante el confinamiento de esta dentro ella. La transmisión de señales por guías de onda reduce la disipación de energía, lo que las hace apropiadas para aplicaciones en altas frecuencias y, en concreto, para el rango de las microondas.

Guía rectangular

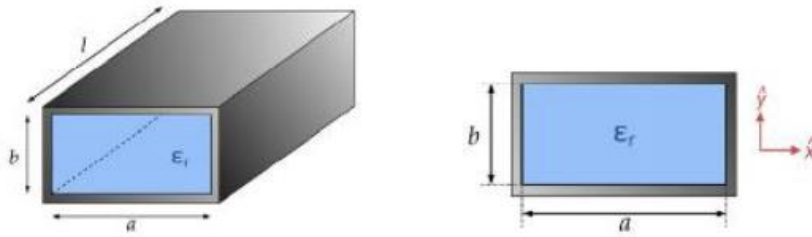


Figura 2- 9 Guía de onda rectangular

Los modos que se propagan por este tipo de guía son el modotransversal eléctrico TE_{mn} y transversal magnético TM_{mn} , donde los subíndices m y n identifican al modo. El cálculo de las frecuencias de corte se corresponde con la siguiente expresión:

$$fc_{m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}, \quad TE_{mn}: m, n \geq 0, TM_{mn}: m, n \geq 1 \quad (2.21) \quad c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.22)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el medio dieléctrico que rellena la guía y $c_0 \approx 3 * 10^8 \text{ m/s}$ la velocidad de la luz en el vacío.

La longitud de onda en el interior de la guía de onda rectangular se calcula como se indica a continuación:

$$\lambda_{g_{m,n}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{fc_{m,n}}{f_0}\right)^2}} \quad (2.23) \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.24)$$

En este tipo de guías siempre se asume que $a > b$ por lo que el modo fundamental propagado es el TE_{10} . Un modo fundamental es aquel que tiene menor frecuencia de corte. Teóricamente, dentro de una guía existen todos los modos. Dependiendo de si la frecuencia de corte f_c del modo está por encima o por debajo de la frecuencia central f_0 a la que se excite la guía de onda dicho modo se propagará por ella o no.

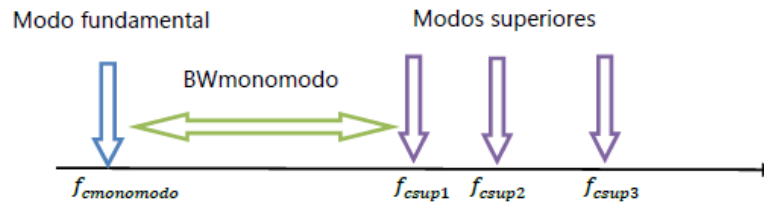


Figura 2- 10 Ancho de banda monomodo en una guía

2.3.1 IRIS EN GUÍA DE ONDA

Un iris es una variación de una de las dimensiones de la guía en un segmento de la misma. Un iris que reduzca el ancho de una guía de onda rectangular es equivalente a añadir una inductancia que modifique la impedancia vista a lo largo de la guía. También existen otros iris que modifican el circuito equivalente de la siguiente forma:

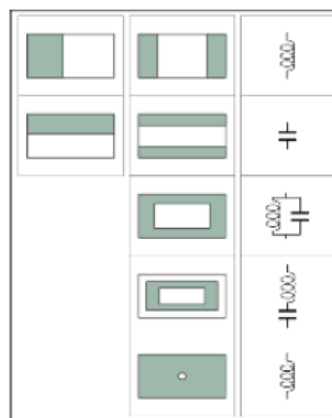


Figura 2- 11 Iris en guía de onda

Los valores de las inductancias y capacitancias que introducen los iris son directamente proporcionales al tamaño de los mismos. El distinto comportamiento de un iris en una u otra dimensión es debido a que unos se oponen al paso del campo eléctrico y los otros al del magnético. Hay que prestar especial atención al usar estas estructuras ya que al concentrar el campo eléctrico y/o magnético, la potencia que se puede transportar por la guía sin llegar a una situación de ruptura es menor que en una guía normal.

Gracias a la introducción de estos elementos dentro de la guía de onda puede conseguirse una modificación de las impedancias que se ven desde los distintos puntos de la misma y por lo tanto mejorar la adaptación. Otra función de los iris es la realización de filtros en guía de onda, ya que si se conocen sus circuitos equivalentes pueden diseñarse redes LC con valores determinados. También puede favorecerse la propagación de unos modos frente a otros utilizando determinadas geometrías.

En este proyecto se busca modificar la fase obtenida a la salida del divisor de potencia en función del número y la posición de tornillos introducidos en la red corporativa para así

cubrir un generoso rango de apuntamientos en el diagrama de radiación de la antena completa.

2.4 CONCEPTO DE ARRAY DE ANTENAS

Un array es un conjunto de antenas, normalmente las mismas, ordenadas en el espacio que se comportan como una sola. A veces es necesario utilizar este tipo de estructuras en función de la aplicación y los requerimientos necesarios.

Los factores que definen a un array son los siguientes, cuyas fórmulas de cálculo dependen de la alimentación, la fase y el número de elementos:

- La colocación geométrica del array
- El espaciado entre los elementos (d)
- La amplitud con la que se alimenta cada elemento (a_n)
- La fase con la que se alimenta cada elemento (α_n)
- El diagrama de radiación de cada elemento.

En función de cómo estén distribuidos los elementos que compongan un array estos pueden ser lineales, planos o conformados. En este proyecto se utiliza un array lineal.

Array lineal

Es un conjunto de N elementos situados sobre el mismo eje.

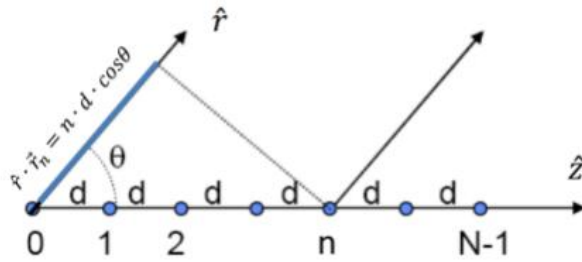


Figura 2- 12 Array lineal

Suponiendo que los elementos que lo forman son iguales y que equidistan entre sí, su vector de posición quedaría definido como $\mathbf{r}_n = n \cdot d \cdot \hat{z}$, y su alimentación como $A_n = a_n \cdot e^{j\alpha_n}$, con lo que el factor de array es:

$$F_A(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N a_n \cdot e^{j(n \cdot k_0 \cdot d \cdot \cos \theta + \alpha_n)} \quad (2.25)$$

En función de la alimentación del array se conseguirá un comportamiento distinto. Los más comunes son fase progresiva, uniforme en amplitud y fase, uniforme en amplitud y fase progresiva y taper.

Para clarificar este punto, se propone un ejemplo en el cual se tiene un array de cuatro elementos separados $0,8\lambda_0$, alimentados de forma uniforme y con fases progresivas entre las salidas, esto es, un incremento constante de la fase en cada uno de ellas. Se puede ver que, conforme se aumenta el desfase progresivo entre los elementos, el lóbulo principal del diagrama cambia de dirección de apuntamiento. Además, si este desapuntamiento es muy grande, se aprecia el indeseado efecto del *grating lobe*.

Este efecto supone la visibilidad de la réplica del lóbulo principal dentro del rango de visión de la señal del array, lo que produce que la antena no funcione como debiera ya

que se reparte la señal de la misma en dos o más puntos (lóbulo principal y réplicas del mismo).

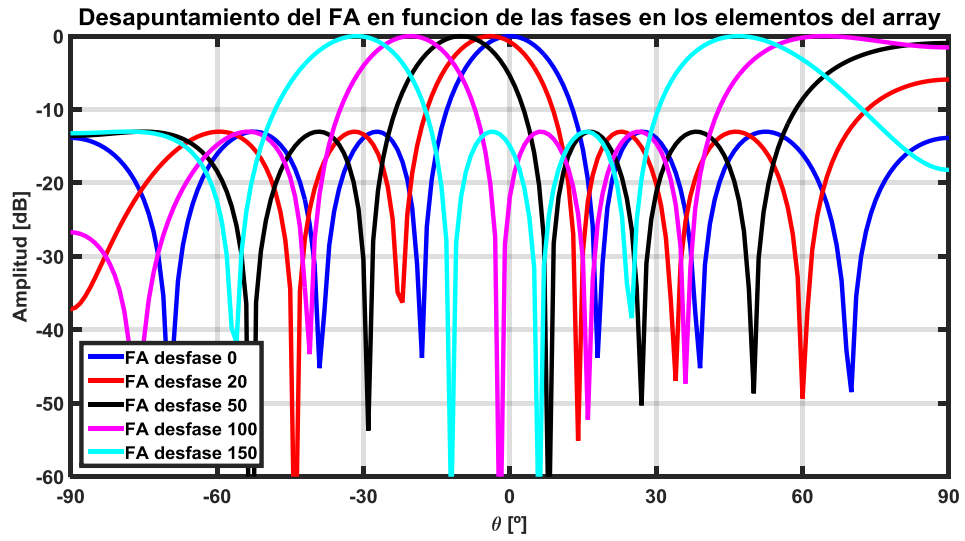


Figura 2- 13 Desapuntamiento del Factor de Array para un array de 4 elementos separados $0.8\lambda_0$, con alimentación uniforme y desfase progresivo

3. FUNCIONAMIENTO DE LOS TORNILLOS DE AJUSTE

La motivación principal para realizar este proyecto fueron los resultados conseguidos en el Trabajo Fin de Grado de Gema Fernández Romero [1], en el cual se estudió el funcionamiento de la guía mediante la introducción de unos tornillos metálicos convencionales o tornillos de ajuste, para modificar las fases conseguidas a la salida de una guía de onda, en este caso de un divisor. Estos tornillos introducen una discontinuidad en la estructura del divisor, de tal forma que modifican mecánicamente la fase de los coeficientes de transmisión para cada uno de los puertos de salida. Debido a esto, en función de los tornillos que se introduzcan se produce un desfase controlable y además, manteniendo un nivel de adaptación aceptable en la entrada.

3.1 ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA DE LA RED

Las especificaciones de la red de alimentación son las siguientes:

- Banda de trabajo: banda Ku (de 16-18 GHz).
- Frecuencia central en $f_c = 17 \text{ GHz}$
- Guía de onda WR-51 con diseño en plano H
- Características principales:

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f_0} = 17.6 \text{ mm}; \quad \varepsilon_r = 1 \text{ (aire)};$$

Guía WR-51

Se trabaja dentro del ancho de banda monomodo entre las frecuencias 11.57 GHz que corresponden al modo fundamental (TE_{10}) y 23.14 GHz que corresponden a los primeros modos degenerados (TE_{01} y TE_{20}). Las dimensiones y las características de esta guía de onda son:

$$a = 12.954 \text{ mm}; b = 6.477 \text{ mm}; f_{c_{TE_{10}}} = \frac{c_0}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\varepsilon_r}}; \lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{TE_{10}}}}{f_c}\right)^2}} = 24,08 \text{ mm}$$

3.2 TORNILLOS DE AJUSTE DE FASE

Para conseguir los desfases dentro de la red se hace uso de tornillos de ajuste. En el grupo de investigación Radiofrecuencia: Circuitos Antenas y Sistemas (RFCAS) se ha comprobado que estos tornillos son el equivalente a la introducción de un iris metálico dentro de la estructura, con la diferencia de que en este caso se puede introducir una longitud concreta, y se puede tanto extraer como posicionar con facilidad. Esta introducción de tornillos produce un efecto capacitivo o inductivo dentro de la red (en este caso en tecnología de guía de onda).

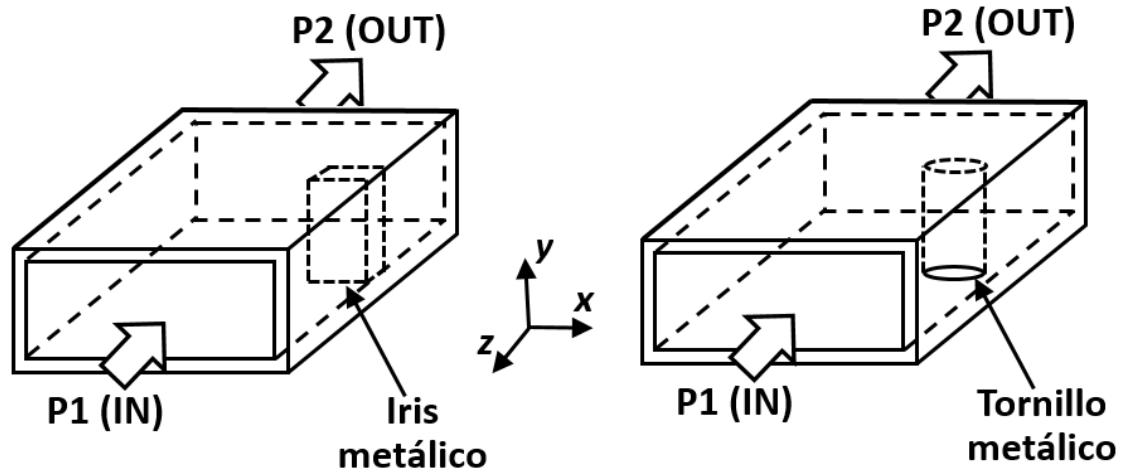


Figura 3- 1 Introducción de un tornillo una guía de onda Figura 3- 2 Introducción de un iris en una guía de

En el caso de los tornillos de métrica M2 empleados en este proyecto se decide cortocircuitar la estructura tal como se hizo en [1], ya que en proyectos anteriores [3], [4] y [5] se ha visto que es difícil controlar una longitud de penetración concreta en la guía, lo cual produce resultados erróneos respecto a las posiciones simuladas. Este efecto indeseado debido a las limitaciones mecánicas de introducción de tornillo son más acusados conforme aumenta la frecuencia. Ya se vieron errores significativos a frecuencias más bajas en otros trabajos, por lo que en la frecuencia de operación de este proyecto esos errores serían más pronunciados aún.

Para cortocircuitar la guía se introducen los tornillos desde la parte inferior de la guía de forma perpendicular a la base de la misma hasta que tocan la cara interna. Resumiendo, cada uno de los tornillos de ajuste utilizados en este proyecto van a tener dos únicas configuraciones (ilustradas en las siguientes figuras):

1. El tornillo no se introduce dentro de la guía de onda (Figura 3- 3).
2. El tornillo se introduce completamente en la guía de onda hasta tocar (cortocircuitar) la cara superior de la misma (Figura 3- 4).

De esta manera, la discontinuidad producida por el tornillo insertado generará un desfase adicional sobre la señal propagante a través de la guía de onda, que permitirá obtener diferentes configuraciones de desfases relativos en una red con varias guías de alimentación.

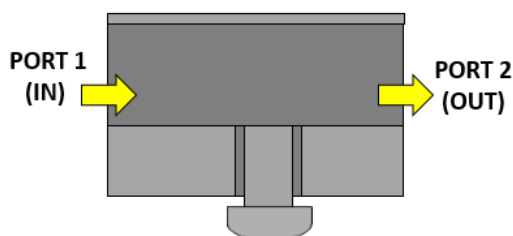


Figura 3- 3 Introducción de un tornillo sin cortocircuitar en una guía de onda

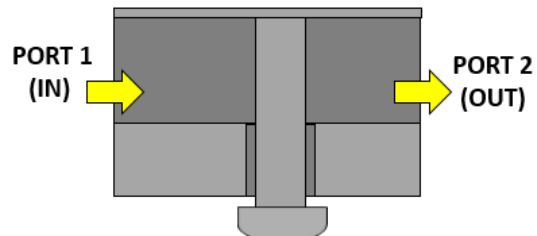


Figura 3- 4 Introducción de un tornillo una guía de onda (cortocircuitar cara inferior y superior)

3.3 DIVISOR DE POTENCIA DE PRIMER NIVEL

Se parte del modelo de divisor de potencia de primer nivel de una puerta de entrada (puerto 1) y dos de salida (puertos 2 y 3), diseñado en [2], en el cual se busca un reparto de señal de igual fase y módulo.

Sobre este divisor que está perfectamente diseñado se van a introducir los tornillos de ajuste para, como se ha comentado anteriormente, conseguir modificar el desfase relativo entre las dos puertas de salida. Los resultados que se muestran durante todo el desarrollo del diseño son:

- S_{11} o coeficiente de adaptación: la estructura debe estar adaptada a la entrada, de tal manera que toda la potencia entrante se transmita a las puertas de salida.
- Coeficientes de transmisión (S_{21} y S_{31}):
 - Amplitud: parte de la señal que llegan a los puertos 2 y 3 cuando se introduce por la entrada (puerto 1). Se intentarán que los divisores sigan manteniendo un reparto de potencia equiamplitud (teóricamente -3dB) hacia cada salida.
 - Fase: se intentará modificar la diferencia de fase entre los puertos 2 y 3. Cuantos más niveles de desfases relativos se consigan mayor número de configuraciones diferentes se podrán obtener en la estructura final propuesta en este trabajo.

Este divisor cuenta con discontinuidades creadas a partir de introducción de septums, estrechamientos o chaflanes para no perder la señal en transmisión y contar con una adaptación óptima.

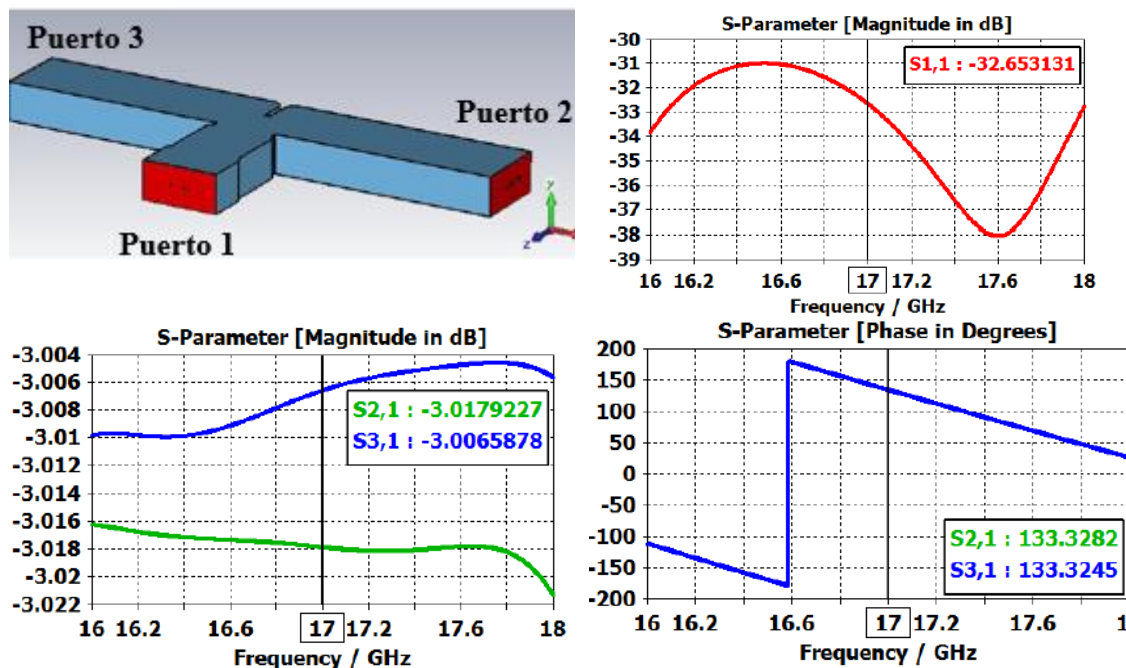


Figura 3- 5 Divisor inicial y su respuesta en adaptación, transmisión y fase, extraídas de [1]

Tras comprobar la buena respuesta tanto en adaptación como en transmisión y fase del divisor, se procede a introducir tornillos.

En primer lugar, se estudiaron los efectos que se producen al introducir un único tornillo, el cual provoca, una vez vistos los resultados, un movimiento capacitivo en la impedancia de entrada del divisor. Esto genera una desadaptación aumentando su valor hasta -13dB.

También se debe tener en cuenta que al provocar esta discontinuidad se ha producido una diferencia tanto en el reparto de potencia como en la fase en cada puerto de salida.

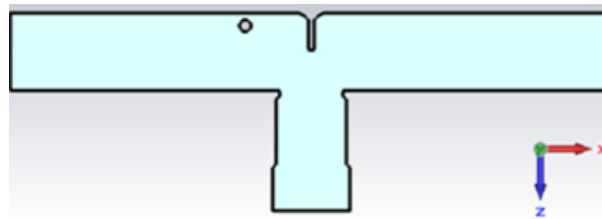


Figura 3- 6 Prueba con un tornillo, extraído de [1]

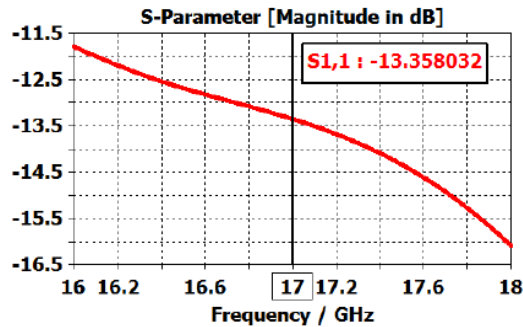


Figura 3- 7 Adaptación de la estructura con un tornillo, extraído de [1]

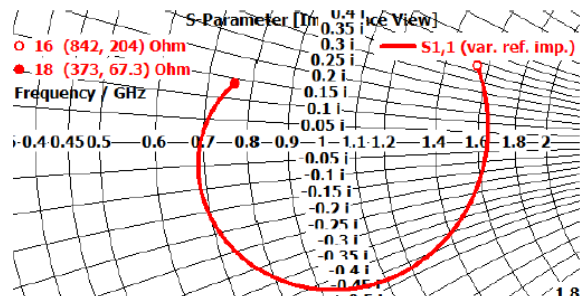


Figura 3- 8 Movimiento en la carta de Smith al introducir un tornillo, extraído de [1]

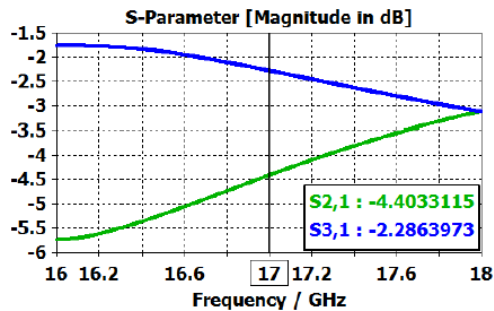


Figura 3- 9 Módulo de parámetros de transmisión con un tornillo, extraído de [1]

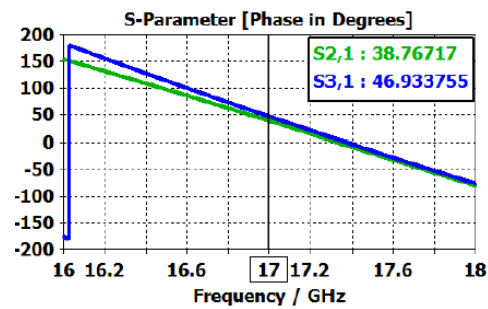


Figura 3- 10 Fase de parámetros de transmisión con un tornillo, extraído de [1]

Teniendo en cuenta estudios anteriores dentro de este grupo [3], [4] y [5], se decide utilizar un par de tornillos, intentando que uno de ellos compense esa desadaptación producida por el primero.

Para compensar el efecto producido por uno de los tornillos es necesario situar el otro a una distancia de $\lambda_g/4$ del primero, de tal forma que se consigue el movimiento opuesto en Carta de Smith (esta distancia de $\lambda_g/4$ implica dar media vuelta a la carta), y, por tanto, se adapta la estructura. En el ejemplo de la Figura 3- 7 se tiene un efecto capacitivo que se compensa con un efecto inductivo, de tal forma que se corrige la desadaptación, que se puede consultar en Figura 3- 12. Existe un efecto contraproducente que es la reducción del ancho de banda obtenida debido a la presencia de las discontinuidades (los tornillos).

Se comprobó que, si no se cortocircuitaba la guía al completo, es decir, si no se introducía el tornillo de forma completa en la estructura, la desadaptación producida era demasiado fuerte como para recuperarla solo con el otro tornillo del par. Los resultados al introducir un par de tornillos se pueden apreciar a continuación.

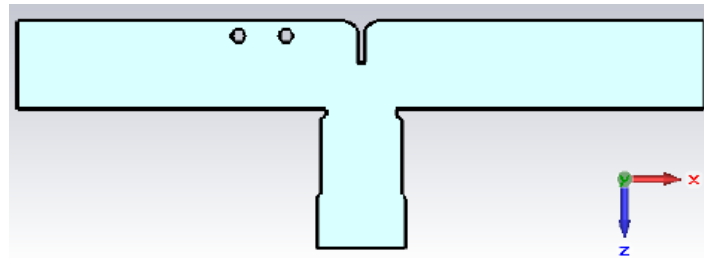


Figura 3- 11 Prueba con dos tornillos, extraídos de [1]

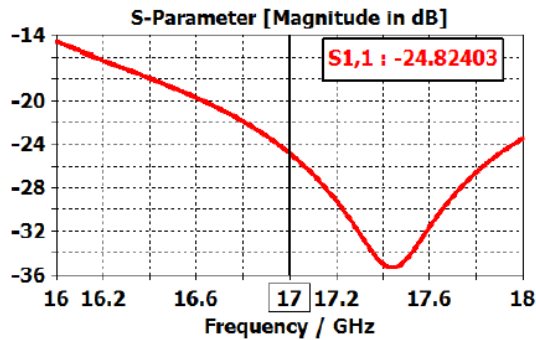


Figura 3- 12 Adaptación de la estructura con dos tornillos, extraído de [1]

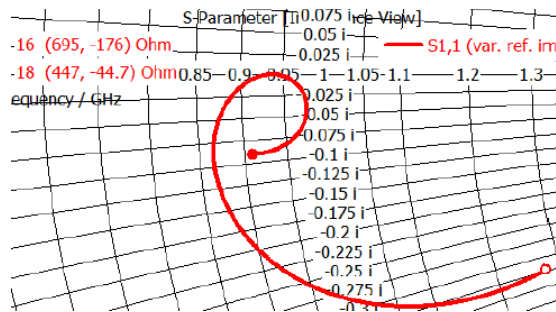


Figura 3- 13 Movimiento en la carta de Smith al introducir dos tornillos, extraído de [1]

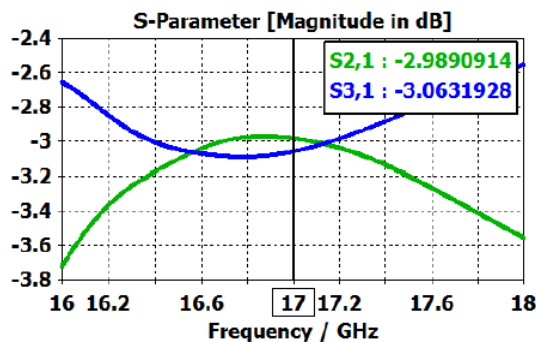


Figura 3- 14 Módulo de parámetros de transmisión con dos tornillos, extraído de [1]

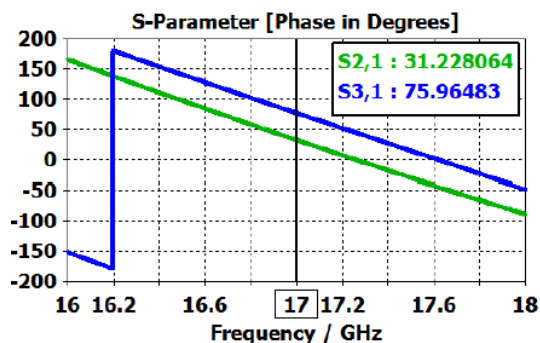


Figura 3- 15 Fase de parámetros de transmisión con dos tornillos, extraído de [1]

De esta manera, los resultados mostrados desde la Figura 3- 12 a la Figura 3- 15 demuestran claramente que la inserción de una pareja de tornillos de ajuste sobre un divisor en guía de onda convencional puede producir un aumento del desfase relativo entre las puertas de salida del divisor, manteniendo un nivel de adaptación, así como de reparto equipotencial bastante aceptable.

Con el fin de conseguir distintos desfases en los puertos de salida del divisor, se buscaron diferentes posiciones de pares de tornillos y la combinación entre ellos. Los pares de tornillos y sus posiciones, así como los desfases producidos por cada combinación introducida son los siguientes:

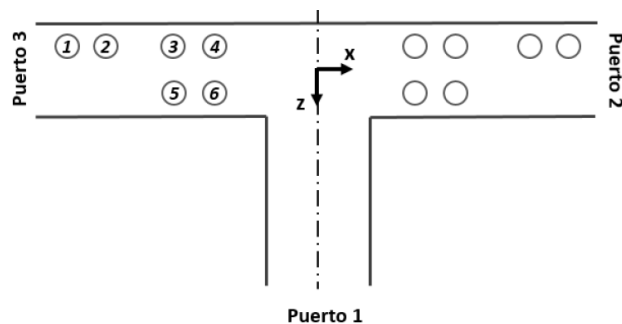


Figura 3- 16 Esquema de posición de tornillos del divisor 1-2, extraído de [1]

Tabla 3- 1 Posiciones de los tornillos del divisor 1-2, extraído de [1]

Tornillo	X (mm)	Z (mm)
1	-34	-4
2	-27	-4
3	-18	-4
4	-11	-4
5	-18	4
6	-11	4

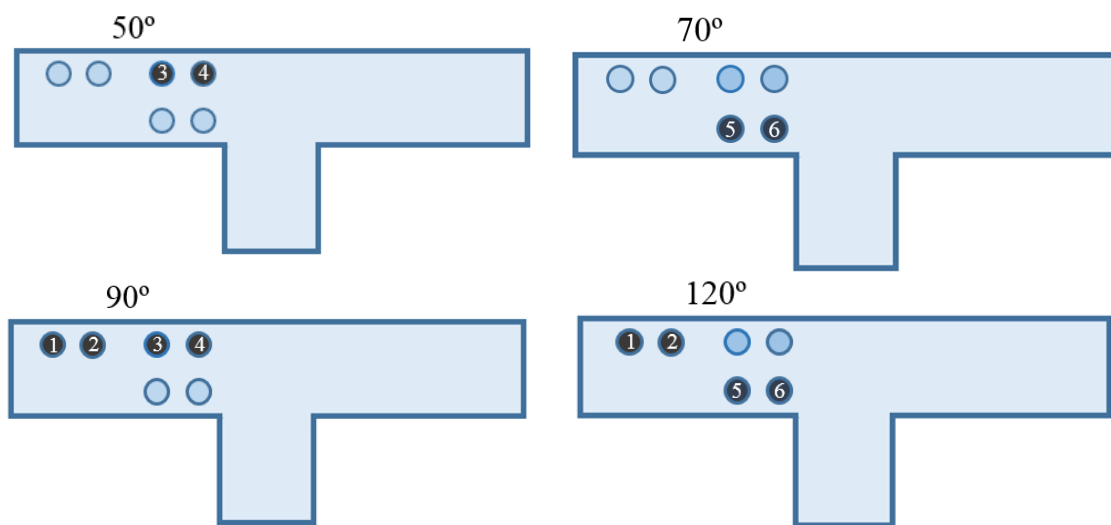


Figura 3- 17 Desfases producidos por cada combinación de par de tornillos, extraídos de [1]

Una vez definidas estas posiciones y pares de tornillos, se procedió a su simulación, obteniendo resultados positivos. Además, se comprobó que el control de fase de transmisión a cada puerto es independiente, de tal forma que, si se quiere conseguir un desfase de, por ejemplo, 90°, en el puerto 1 y otro de 50° en el puerto 2, globalmente se consigue un desfase relativo entre las puertas de salida de 40°.

3.4 CONCLUSIONES DEL DIVISOR DISEÑADO EN [1]

En el Trabajo de fin de Grado en el que se basa este proyecto, se propuso una red corporativa como divisor de una entrada y cuatro salidas haciendo uso de tres divisores en T con el objetivo de conseguir distintos desapuntamientos del array utilizando una única antena. Estos desapuntamientos se consiguen gracias a la combinación de pares de tornillos que producen desfases en los puertos de salida de la estructura.

Se creó y construyó un primer divisor en T con una entrada y dos salidas para comprobar experimentalmente el correcto funcionamiento de la red. Una vez comprobado dicho comportamiento de forma satisfactoria, se propuso un diseño de 1 entrada y cuatro salidas, con sus desapuntamientos teóricos en función de una alimentación de array uniforme y los desfases propuestos con el uso de los pares de tornillos.

Sin embargo, la distancia real entre los elementos de salida con los divisores diseñados era demasiado grande ($5\lambda_0$), lo que dio lugar a unos diagramas de radiación con *grating lobe* que hacían inviables su utilización, y por ende, la antena.

En este trabajo se propone realizar una mejora de dicho divisor acercando los elementos de salida entre sí para tratar de evitar el indeseado defecto de *grating lobe*, y manteniendo en la medida de lo posible los desfases conseguidos y los pares de tornillos empleados. Esto conlleva implementar divisores de potencia muy compactos, de tal manera que, al contrario que los trabajos predecesores, ha sido necesario implementar un divisor diferente para cada uno de los niveles de divisor de la red global. Además, tanto el diseño, caracterización, fabricación y validación experimental del prototipo de antena final han sido realizados a lo largo de TFM, culminando las investigaciones y los diseños presentados tanto en [1] como en [2].

4. ANTENA 1: ARRAY DE BOCINAS

En este capítulo se explica el proceso de diseño de la primera antena propuesta. Este diseño consta de un divisor de una entrada y cuatro salidas en guía de onda y con bocinas como elemento radiante. Para que no se produzca el efecto de *grating lobe*, es necesario que los elementos no estén separados más de λ_0 .

En este primer diseño se realiza un acercamiento de los elementos de salida de la red de alimentación de la distancia original de $5\lambda_0$ a $3\lambda_0$. Debido a que la distancia conseguida entre elementos no es menor de λ_0 , se hace uso de bocinas como elemento radiante ya que son muy directivas y ayudan a bajar el nivel de lóbulos secundarios, eliminado así el indeseado efecto.

El proceso de diseño comienza con el diseño del divisor 1-4, donde se hace cada divisor de 1-2 de forma independiente (simulación de una puerta de entrada y dos de salida). Luego se integran y se obtiene el divisor 1-4 final.

En paralelo se diseña el array de cuatro antenas. Para ello, se diseña el elemento unitario separado (en este caso una bocina con un único puerto de entrada) y se replica cuatro veces para formar el array.

Por último, tanto el array como el divisor se interconectan. Las puertas de salida del divisor se conectan a las puertas de entrada de las bocinas, dando lugar a la antena final.

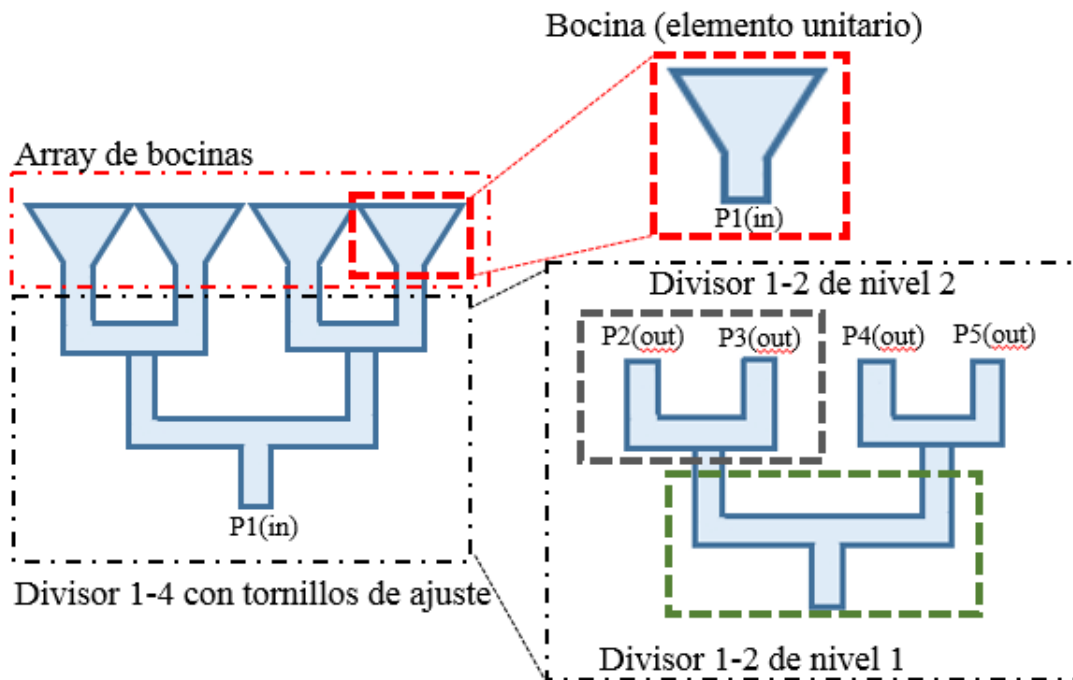


Figura 4- 1 Esquema de la antena 1 completa

4.1 DISEÑO DEL DIVISOR DE PRIMER NIVEL

En el caso del divisor de primer nivel únicamente se modifica la longitud de los brazos del divisor explicado en 3.3, de tal forma que con el diseño conseguido en los divisores de segundo nivel se puedan acercar los elementos entre sí.

4.2 DISEÑO DEL DIVISOR DE SEGUNDO NIVEL

Para realizar el diseño de los divisores de segundo nivel se parte del modelo de divisor explicado en 3, en el cual se busca respetar los desfases de 50° , 70° , 90° y 120° pero modificando la estructura para provocar el acercamiento de los elementos radiantes y evitar el indeseado efecto del *grating lobe*.

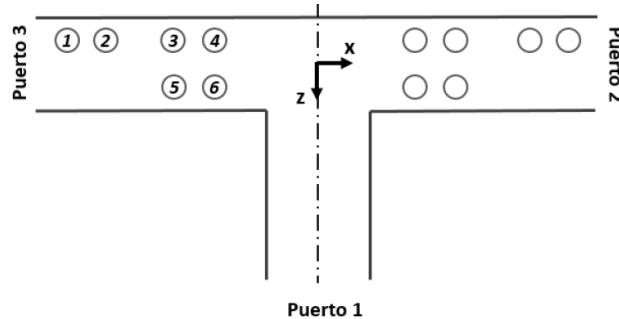


Figura 4- 2 Posiciones de los tornillos en el divisor de primer nivel de la red 1, extraído de [1]

En este caso se introduce el codo diseñado en [2] aproximadamente sobre la mitad de la estructura del divisor en T, consiguiendo una distancia de 55.254mm. que corresponde a $3\lambda_0$ aproximadamente. Debido a esta modificación de la estructura, fue necesario encontrar posiciones nuevas para los tornillos 1 y 2 (Figura 4- 2Figura 3- 16). A continuación, se muestra la respuesta el divisor en su versión de equifase, es decir, sin tornillos.

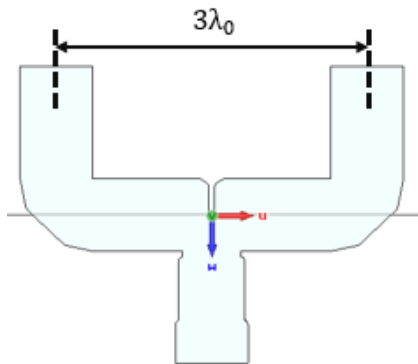


Figura 4- 3 Diseño de divisor de 2º nivel propuesto de la red 1

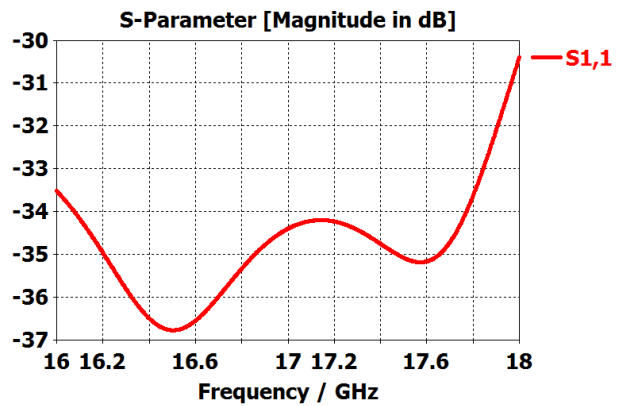


Figura 4- 4 Adaptación del divisor de 2º nivel propuesto de la red 1

Se decide buscar posiciones dentro de la segunda parte del codo (zona superior en la estructura) donde situar el par de tornillos que produzcan un desfase de 90° y 120° en conjunto con otro par de tornillos introducidos simultáneamente. Se ha realizado una optimización de posiciones y se comprobó que los tornillos situados en la cara interna de este codo cumplían los requisitos de división de potencia, mientras que en la cara externa este no se cumple.

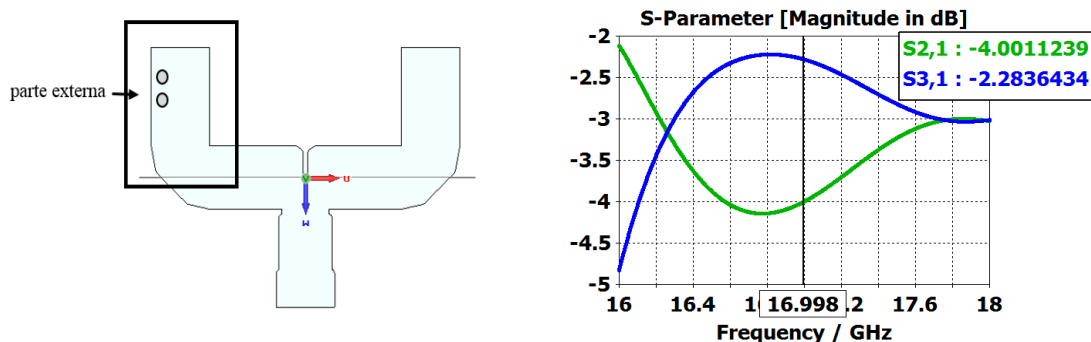


Figura 4- 5 Estudio de los tornillos 1,2 situados en la parte externa de la red 1

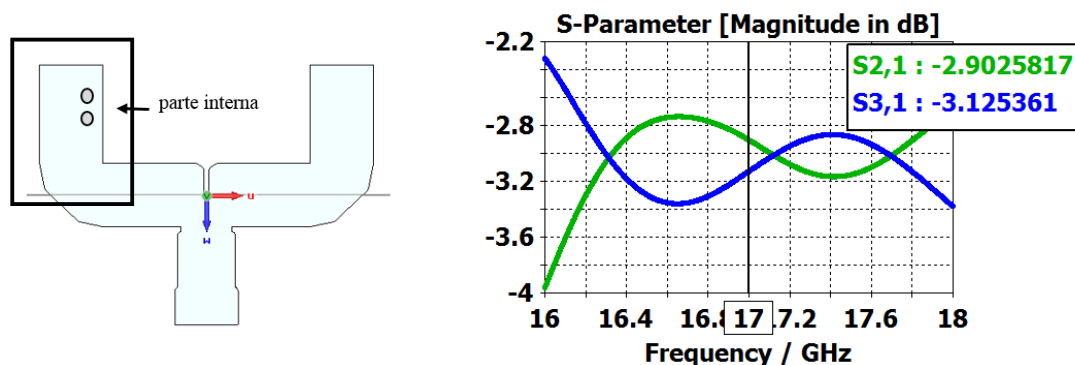


Figura 4- 6 Estudio de los tornillos 1,2 situados en la parte interna de la red 1

Además, se comprobó que este par de tornillos producían por sí solos un desfase de 45° , lo que permite ampliar el número de desfases conseguidos dentro de la guía. Se realizó la prueba de introducir los tornillos 1,2 y 5,6 (Figura 4- 2) para conseguir el desfase de 120° , sin embargo, se vio que solo llegaban a producir un desfase de 105° . Por eso se decidió buscar una posición de un séptimo tornillo situado también en la parte interior de la guía que produjese un desfase mayor y así alcanzar los 120° .

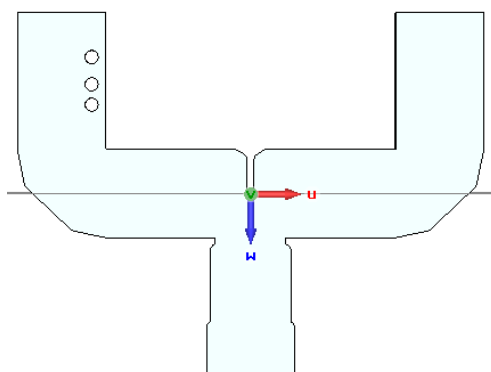


Figura 4- 7 Tornillo 7 situado entre los tornillos 1 y 2 de la red 1

Tras escoger la posición de este séptimo tornillo se consiguen los desfases buscados. Sin embargo, para conseguir los desfases necesarios en esta nueva estructura se necesitó modificar ligeramente las posiciones de los tornillos 3,4 y 5,6 con respecto a la estructura propuesta en [1]. Las nuevas posiciones de los tornillos se recogen en esta tabla:

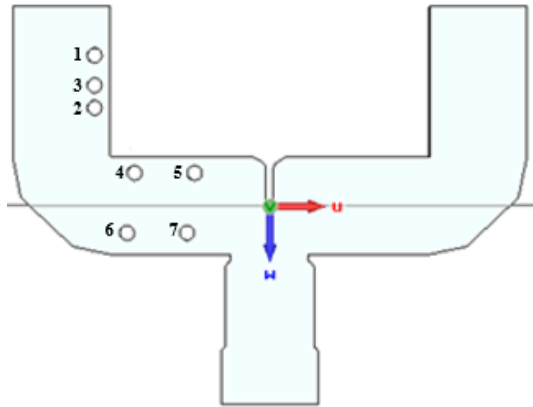


Figura 4- 8 Tornillos en la estructura del divisor de segundo nivel de la red 1

Tabla 4- 1 Posiciones de los tornillos de la estructura de divisor de segundo nivel de la red 1

Tornillo	Posición u (mm)	Posición w (mm)
1	-23.3	-20
3	-23.3	-16
2	-23.3	-13
4	-10	-4.3
5	-18	-4.3
6	-11	3.7
7	-19	3.7

Tabla 4- 2 Desfases conseguidos y pares de tornillos empleados en el divisor de segundo nivel en la red 1

Tornillos	1,2	4,5	6,7	1,2 y 4,5	1,2 y 6,7	1,2,3 y 5,6
Desfases (°)	45	50	70	90	105	120

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada desfase deseado en función de los pares de tornillos introducidos indicados en la tabla anterior:

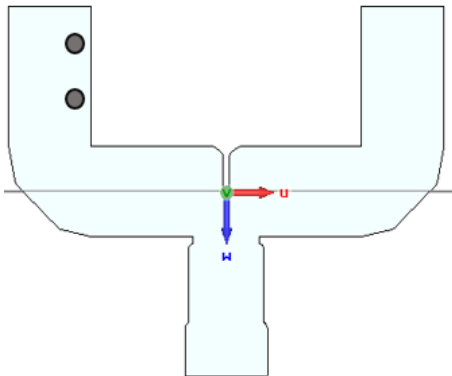


Figura 4- 9 Configuración 45° del divisor de primer nivel de la red 1

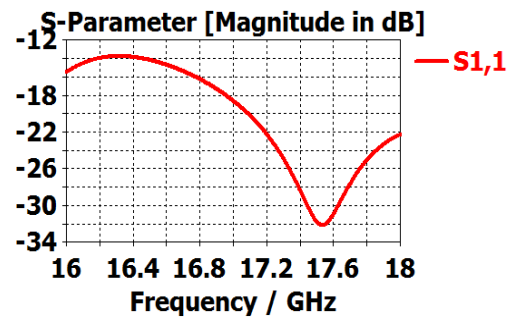


Figura 4- 10 Adaptación (S11) de la configuración 45° del divisor de primer nivel de la red 1

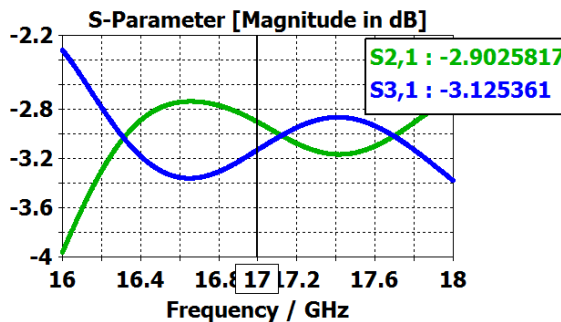


Figura 4- 11 Reparto de potencia para 45° del divisor de segundo nivel de la red 1

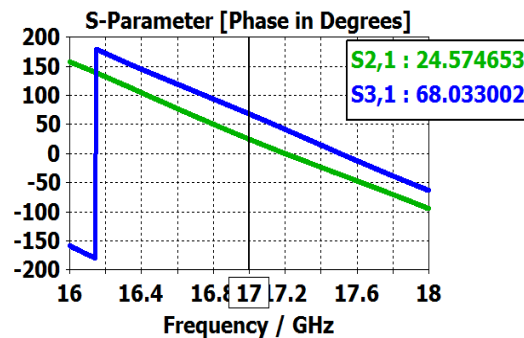


Figura 4- 12 Diferencia de fase para 45° del divisor de segundo nivel de la red 1

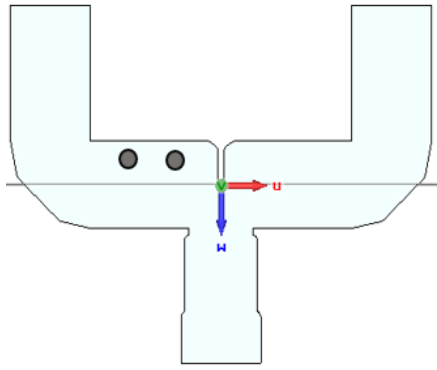


Figura 4- 13 Configuración 50° del divisor de primer nivel de la red 1

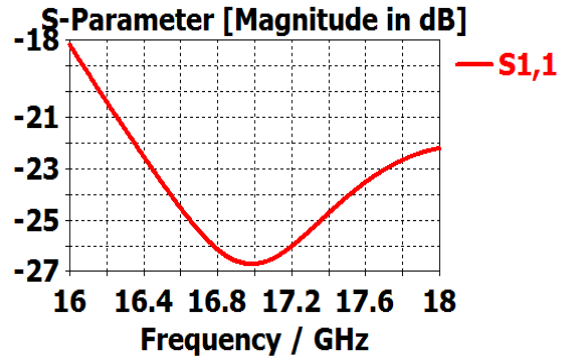


Figura 4- 14 Adaptación (S11) de la configuración 50° del divisor de primer nivel de la red 1

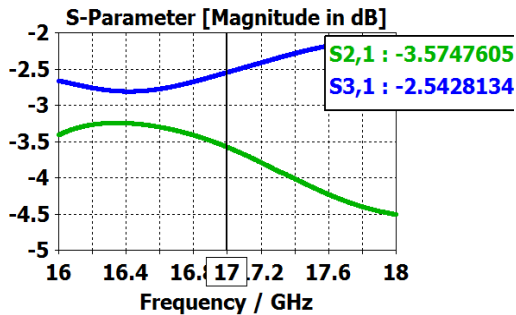


Figura 4- 15 Reparto de potencia para 50° del divisor de segundo nivel de la red 1

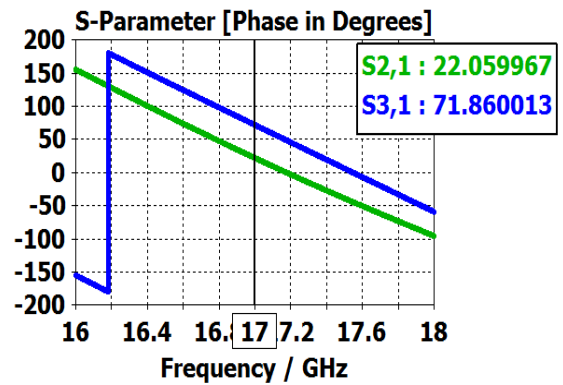


Figura 4- 16 Diferencia de fase para 50° del divisor de segundo nivel de la red 1

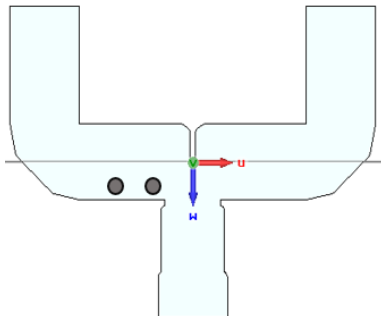


Figura 4- 17 Configuración 70° del divisor de primer nivel de la red 1

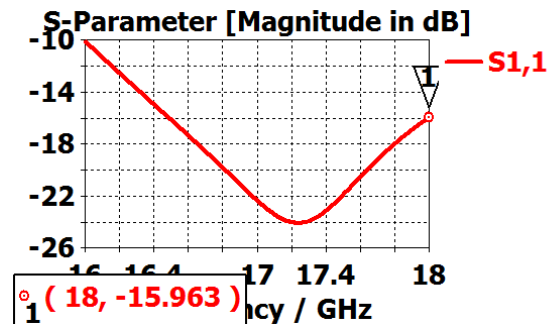


Figura 4- 18 Adaptación (S11) de la configuración 70° del divisor de primer nivel de la red 1

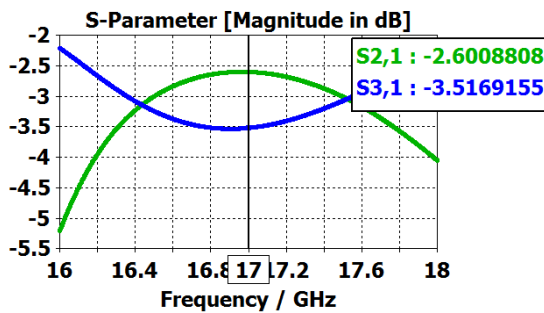


Figura 4- 19 Reparto de potencia para 70° del divisor de segundo nivel de la red 1

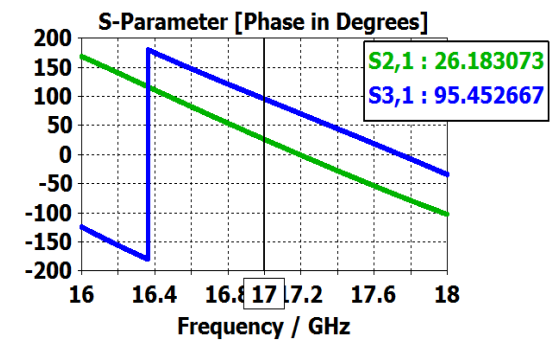


Figura 4- 20 Diferencia de fase para 70° del divisor de segundo nivel de la red 1

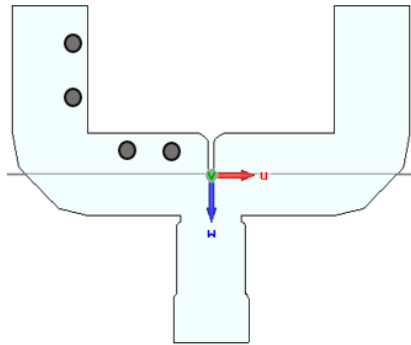


Figura 4- 21 Configuración 90° del divisor de primer nivel de la red 1

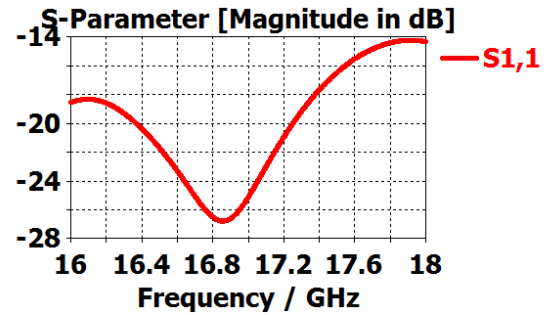


Figura 4- 22 Adaptación (S11) de la configuración 90° del divisor de primer nivel de la red 1

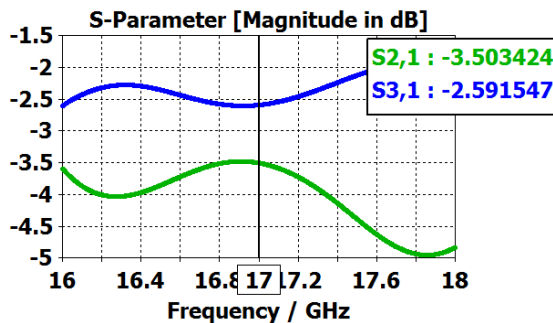


Figura 4- 23 Reparto de potencia para 90° del divisor de segundo nivel de la red 1

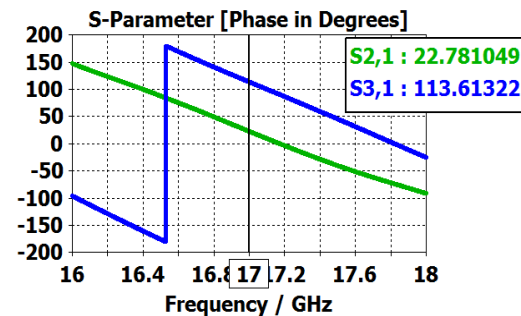


Figura 4- 24 Diferencia de fase para 90° del divisor de segundo nivel de la red 1

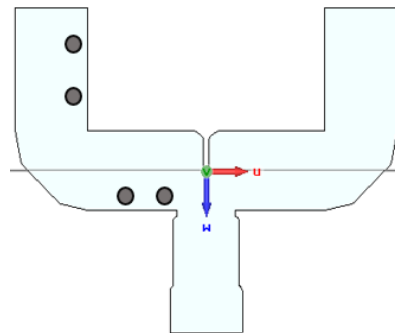


Figura 4- 25 Configuración 105° del divisor de primer nivel de la red 1

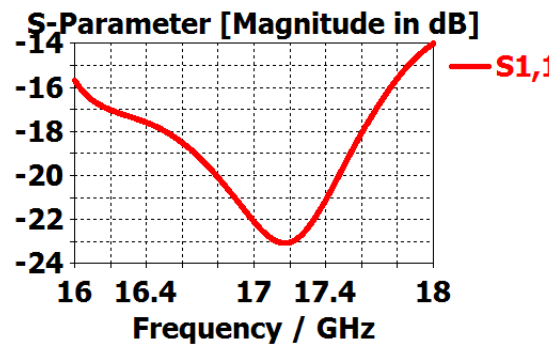


Figura 4- 26 Adaptación (S11) de la configuración 105° del divisor de primer nivel de la red 1

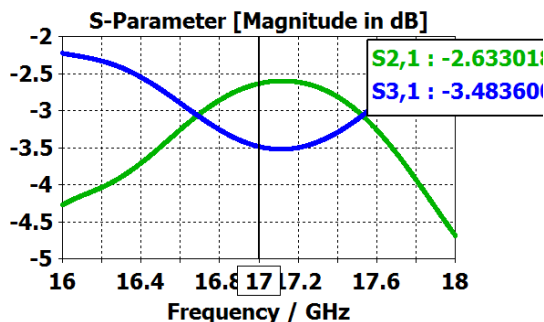


Figura 4- 27 Reparto de potencia para 105° del divisor de segundo nivel de la red 1

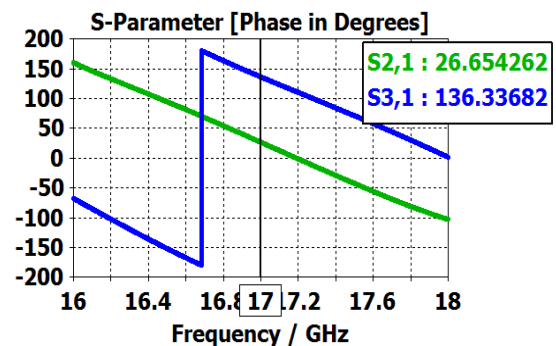


Figura 4- 28 Diferencia de fase para 105° del divisor de segundo nivel de la red 1

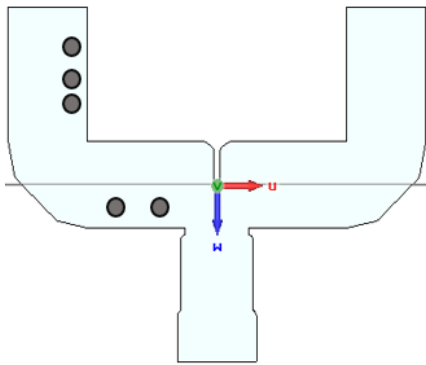


Figura 4- 29 Configuración 120° del divisor de primer nivel de la red 1

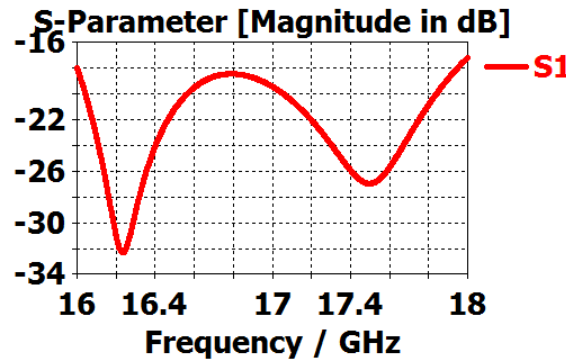


Figura 4- 30 Adaptación (S11) de la configuración 120° del divisor de primer nivel de la red 1

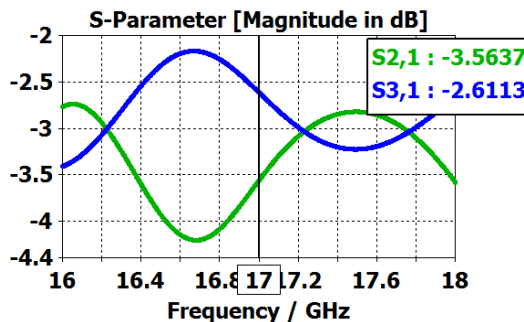


Figura 4- 31 Reparto de potencia para 120° del divisor de segundo nivel de la red 1

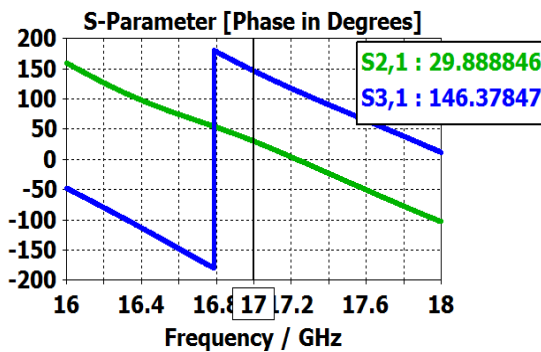


Figura 4- 32 Diferencia de fase para 120° del divisor de segundo nivel de la red 1

Se observa que, respecto al reparto de potencia a cada puerta de salida, se consiguen valores equitativos con cierto error asumible (aproximadamente 1dB de diferencia). Si se busca en las gráficas que representan la adaptación, se puede ver que las configuraciones con los tornillos situados en los brazos superiores del divisor dicho valor de reflexión es peor, lo que provoca un estrechamiento de la banda. También se observa que, con los tornillos 6 y 7 dicha adaptación es algo peor que con el uso de los tornillos 4 y 5. Esto tiene sentido porque el primer par de tornillos se encuentra más cerca de la entrada, lo que provoca que se cree una ligera desadaptación en la misma. Aun obteniendo estos pequeños inconvenientes, se ha conseguido sintonizar varias configuraciones de desfase relativo entre puertas de salida que pueden ofrecer grandes posibilidades sobre la red final.

4.3 DIVISOR COMPLETO

Una vez caracterizado el divisor de primer nivel y el divisor del segundo nivel se pasa a realizar el estudio de la red completa. Para ello se realiza la unión del divisor de primer nivel con dos divisores de segundo nivel, creando así un divisor de una entrada y cuatro salidas. La estructura de la red sin tornillos es la que aparece en la Figura 4- 33 Estructura del divisor completo de la red 1. En este caso las salidas tienen la misma fase con un error de $\pm 0.1^\circ$.

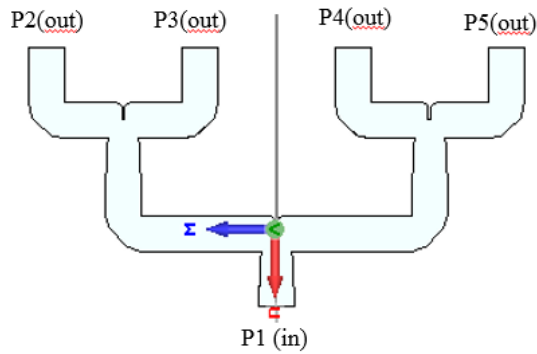


Figura 4- 33 Estructura del divisor completo de la red 1

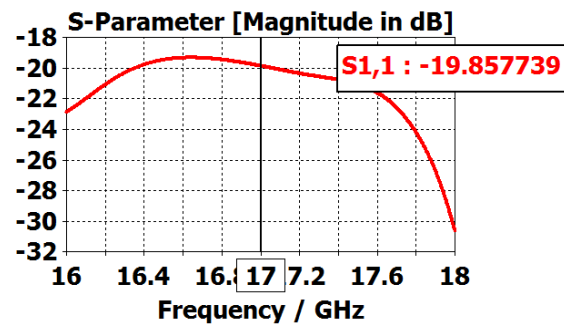


Figura 4- 34 Adaptación de la estructura del divisor completo de la red 1

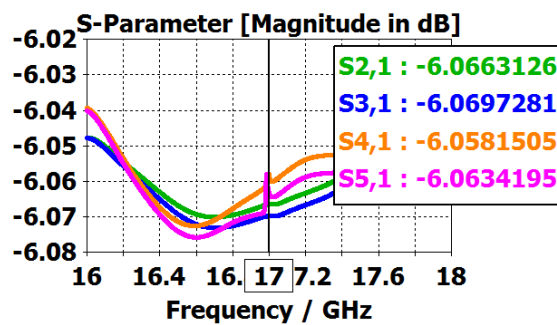


Figura 4- 35 Reparto de potencia de la estructura del divisor completo de la red 1

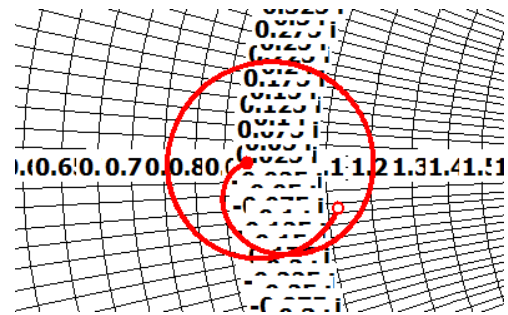


Figura 4- 36 Adaptación en carta de Smith de la estructura del divisor completo de la red 1

Una vez concluido que la unión de los divisores responde bien en adaptación y reparto de potencia, se realiza un estudio de posibles desfases a conseguir con la estructura completa. Estos desfases pueden ser progresivos (mismo valor de desfase relativo entre las puertas de salida contiguas) o quasi-progresivos (distintos valores de fase, pero cercanos, entre pares de elementos). Los desfases calculados se pueden ver en las siguientes figuras.

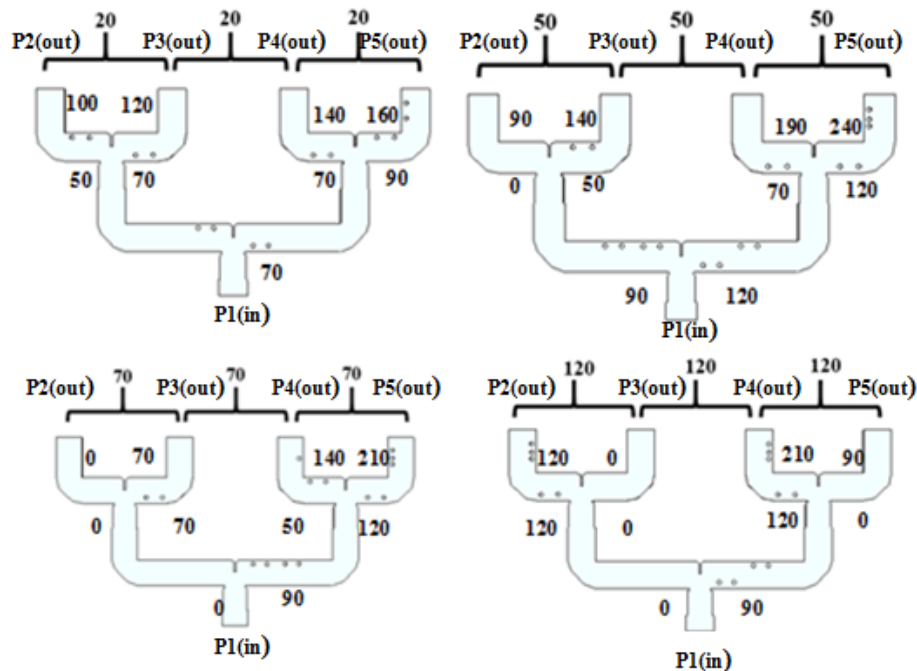


Figura 4- 37 Redes finales con las configuraciones de desfases progresivos de la red 1

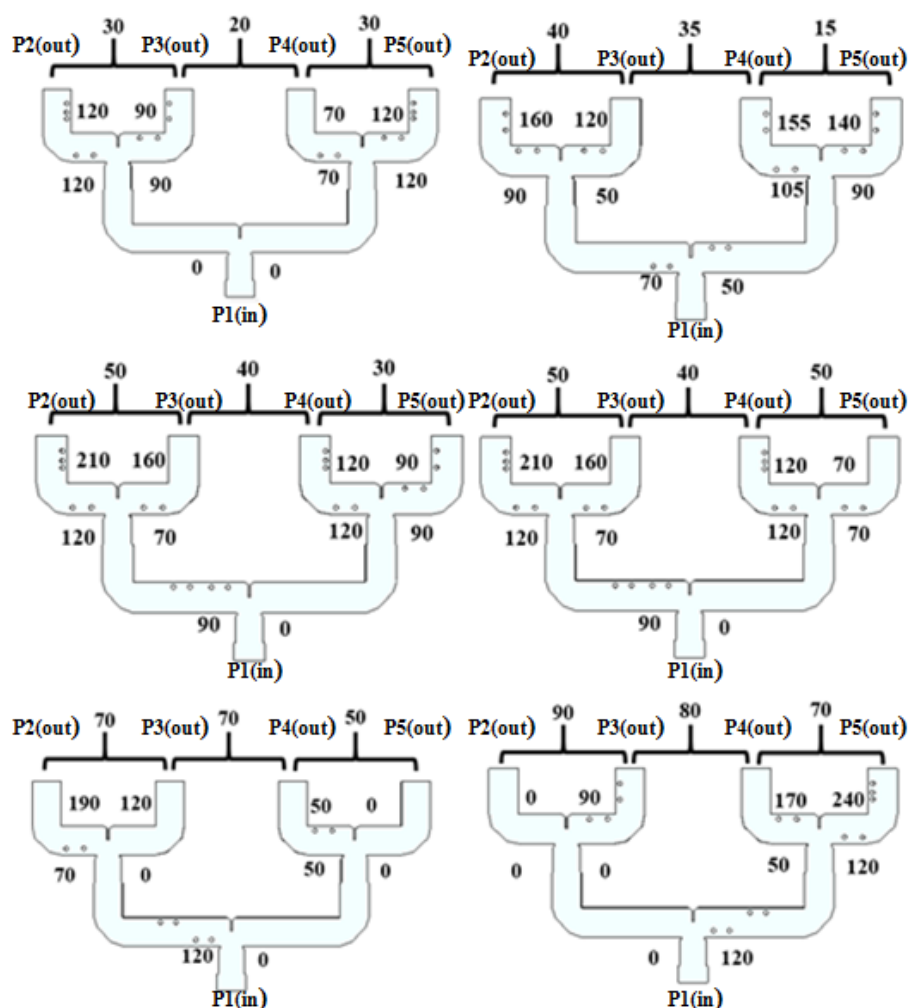


Figura 4- 38 Redes finales con las configuraciones de desfases quasi-progresivos de la red 1

Tras la caracterización de los desfases y antes de la integración final del divisor de primer nivel con los divisores de segundo nivel, la longitud del tramo que los une ha sido optimizada mediante ADS para maximizar el ancho de banda en adaptación global (es decir, para todas las configuraciones). Se puede consultar el proceso en el Anexo H.

Los resultados gráficos de simulación final para el divisor, tanto en reflexión como en transmisión, de cada una de las configuraciones estudiadas, se pueden observar a continuación:

Configuración 20-20-20

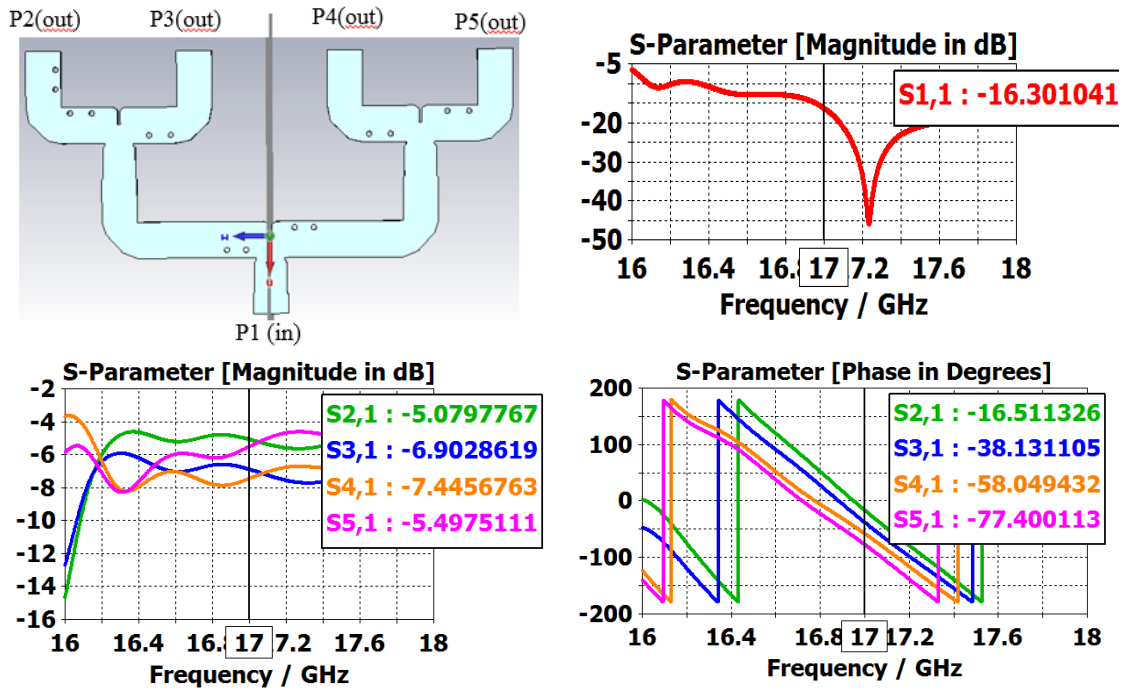


Figura 4- 39 Resultados CST para configuración 20-20-20

Configuración 50-50-50

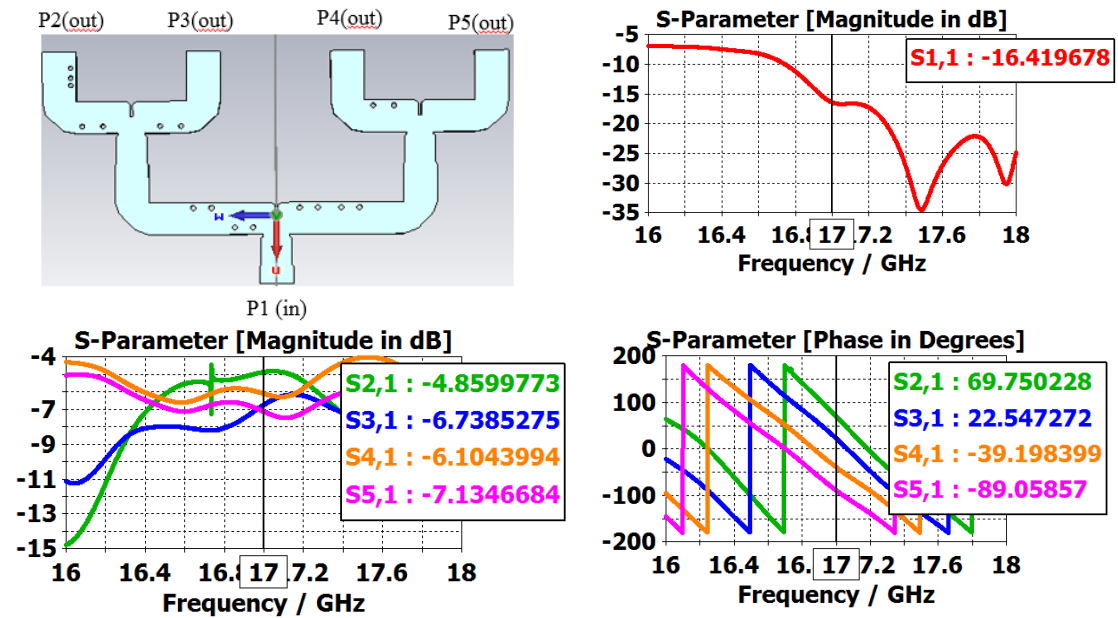
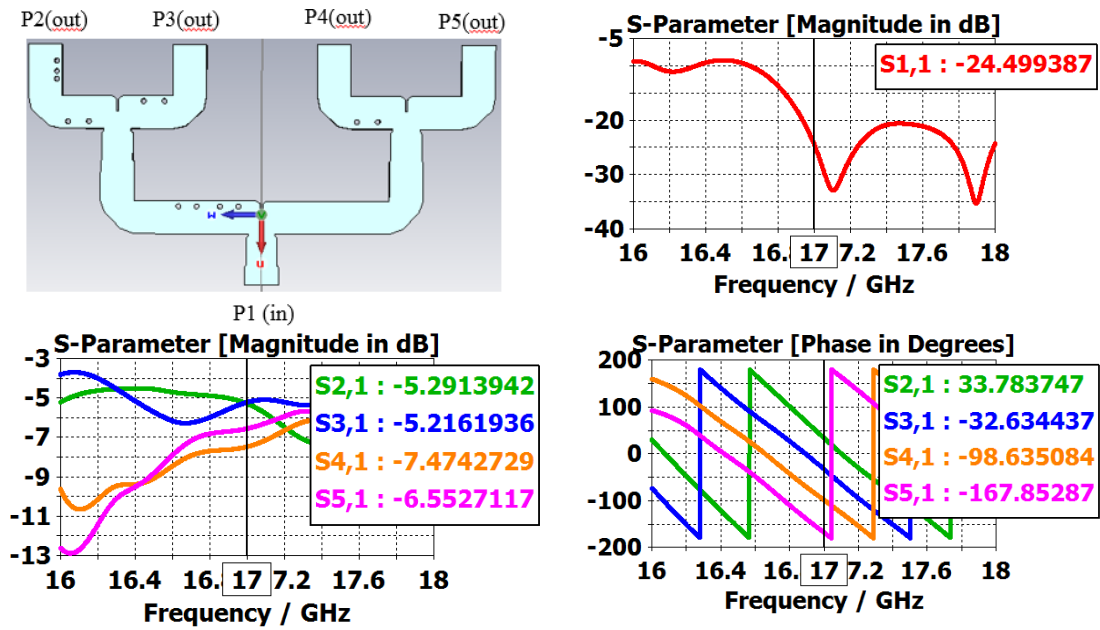
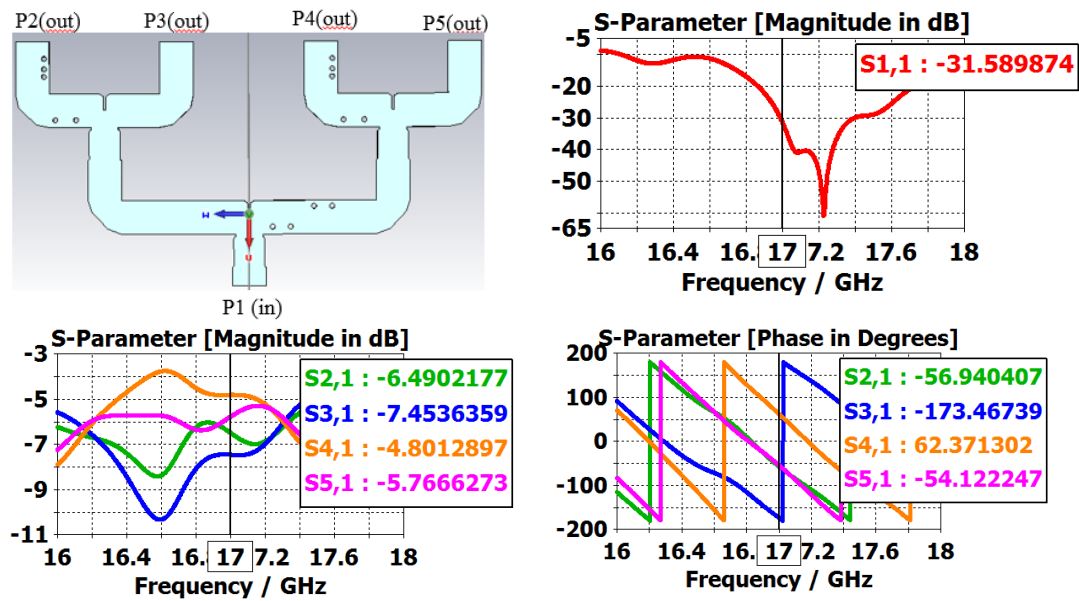


Figura 4- 40 Resultados CST para configuración 50-50-50

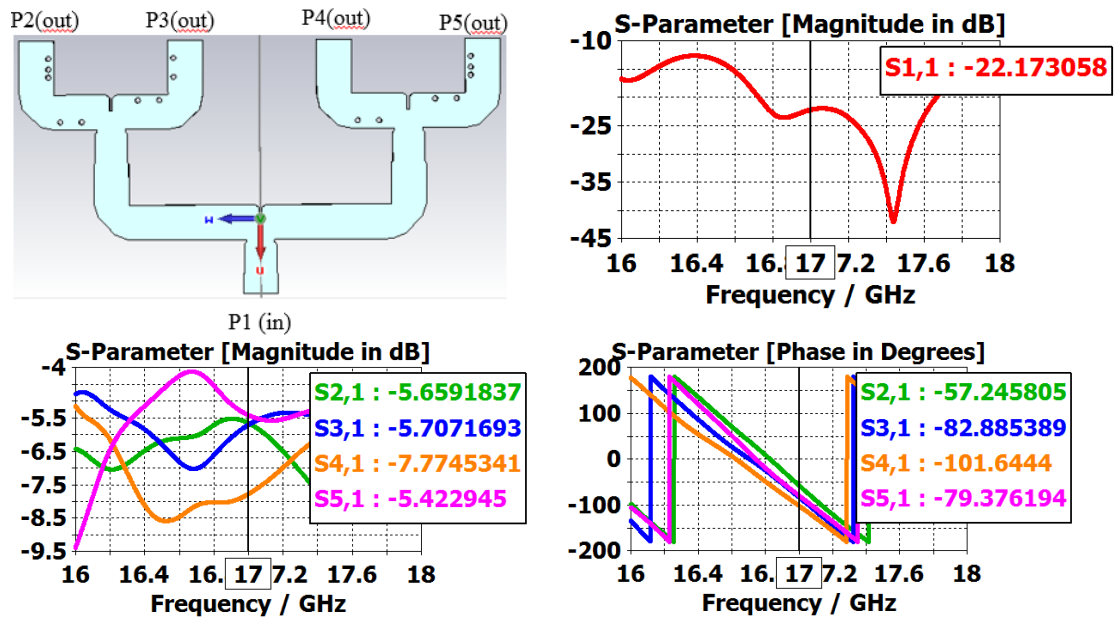
Configuración 70-70-70



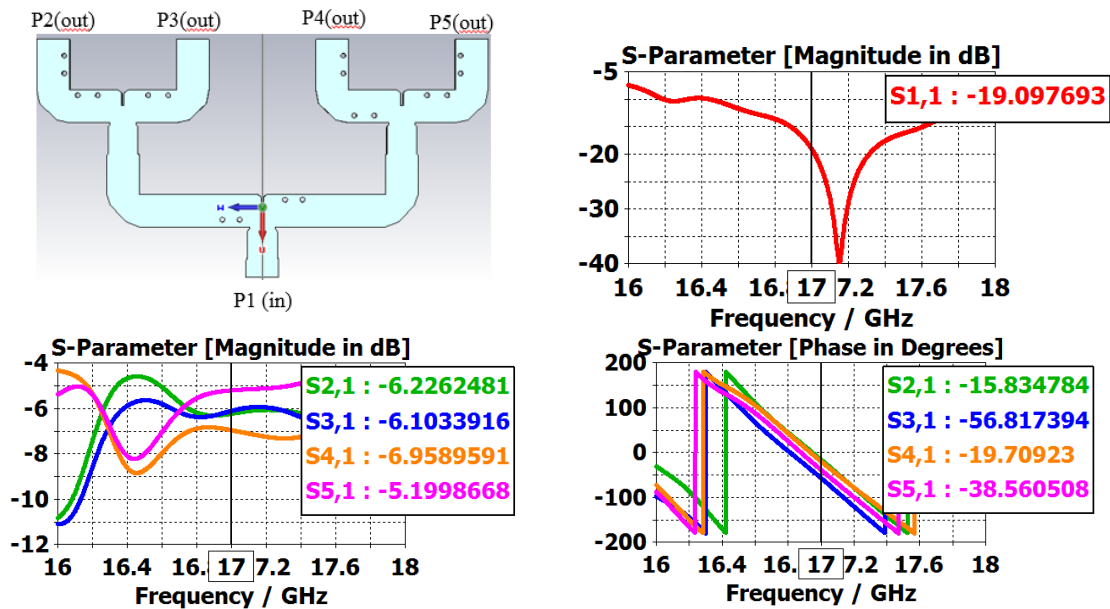
Configuración 120-120-120



Configuración 30-20-30



Configuración 40-30-15



Configuración 50-40-30

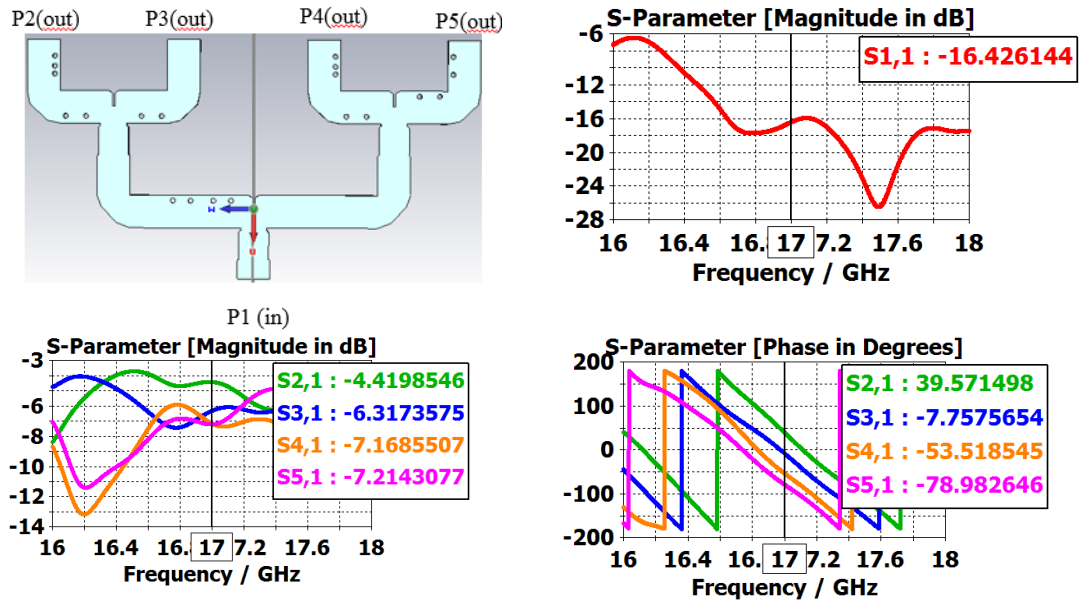


Figura 4- 45 Resultados CST para configuración 50-40-30

Configuración 50-40-50

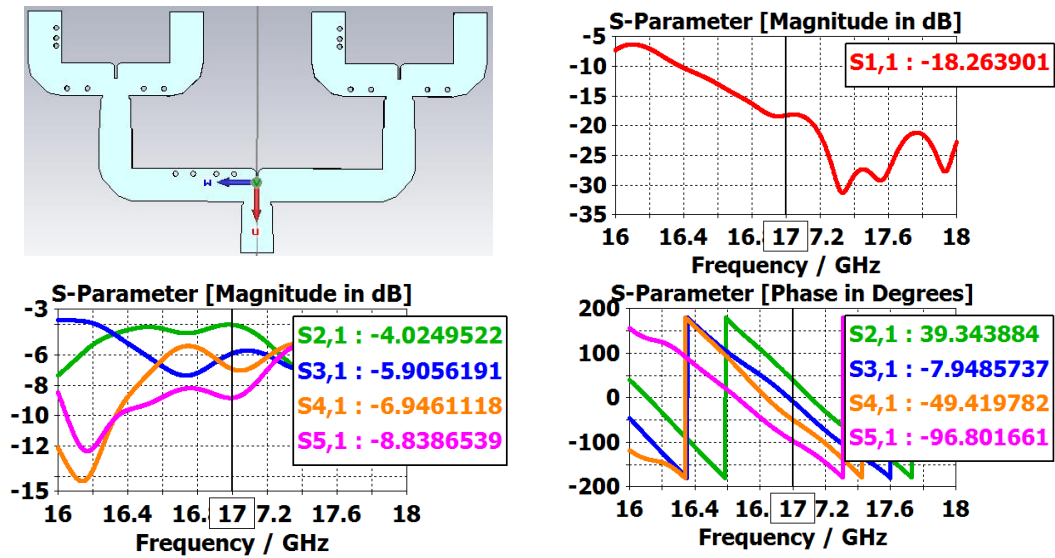


Figura 4- 46 Resultados CST para configuración 50-40-50

Configuración 70-70-50

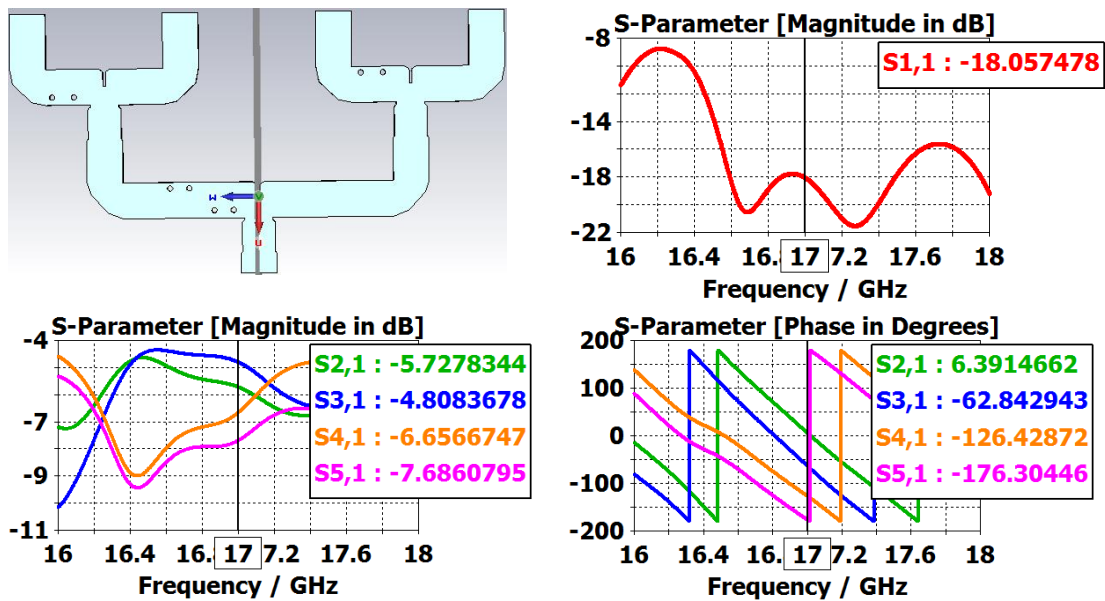


Figura 4- 47 Resultados CST para configuración 70-70-50

Configuración 90-80-70

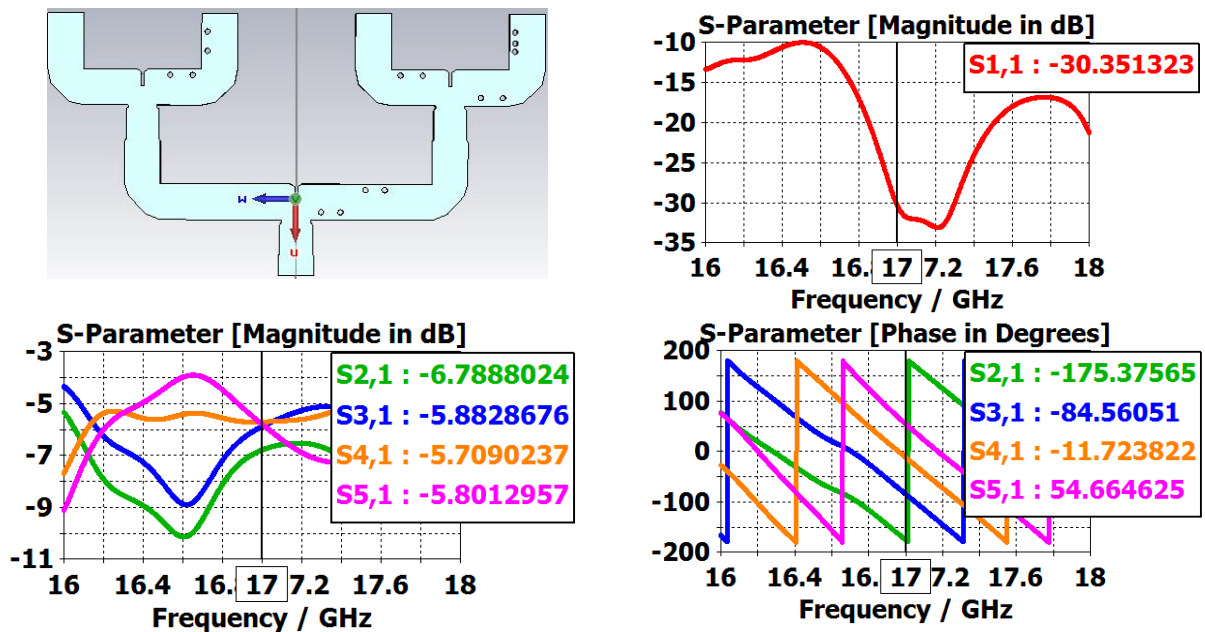


Figura 4- 48 Resultados CST para configuración 90-80-70

En la Tabla 4- 3 se recogen valores de ancho de banda por debajo de -15dB, reparto de potencia y desfases conseguidos para las configuraciones estudiadas. El reparto de

potencia esperado es de -6dB a cada una de las puertas de salida, y el desfase conseguido es el desfase obtenido entre puertas contiguas.

Se puede observar que los desfases se mantienen dentro de un error asumible (máxima desviación de error de fase de 8 grados). Además, se puede ver que el reparto de potencia se mantiene en la mayoría de las configuraciones, excepto en algunas concretas donde esta diferencia de potencia es demasiado acusada.

Otro efecto observado que ya se comentó en el capítulo 3, el hecho de introducir tornillos produce una disminución del ancho de banda, que teóricamente debe ser de 2GHz, pero se comprueba que en ninguna configuración se consigue dicho ancho. Al margen de esto, es necesario tener en cuenta que el ancho de banda de cualquier prototipo radiante final que se presente en este trabajo tendrá un ancho de banda en torno al 10%. Por tanto, se considera que los anchos de banda obtenidos para la red de alimentación propuesta son bastante aceptables.

Tabla 4- 3 Resumen de resultados de la red 1

Configuración	Ancho de banda (GHz)	Reparto de potencia				Desfase conseguido
		S ₂₁ (dB)	S ₃₁ (dB)	S ₄₁ (dB)	S ₅₁ (dB)	
20-20-20	16.5-18	-5.08	-6.9	-7.44	-5.5	22-20-19
50-50-50	16.8-18	-4.86	-6.74	-6.1	-7.13	48-61-50
70-70-70	16.6-18	-5.29	-5.21	-7.47	-6.55	65-66-70
120-120-120	16.6-17.6	-6.49	-7.45	-4.8	-5.77	117-125-116
30-20-30	16.5-17.9	-5.66	-5.71	-7.77	-5.42	26-19-22
40-30-15	16.7-17.9	-6.22	-6.1	-6.96	-5.2	41-37-18
50-40-30	16.5-18	-4.42	-6.32	-7.17	-7.21	47.5-46-25.5
50-40-50	16.5-18	-4.02	-5.9	-6.95	-8.84	47-42-47
70-70-50	16.45-18	-5.73	-4.81	-6.65	-7.69	69-63-50
90-80-70	16.8-18	-6.79	-5.88	-5.71	-5.8	90-72-66

4.4 ELEMENTO RADIANTE: BOCINA

Debido a la distancia existente entre las posiciones de los elementos radiantes del divisor (aproximadamente de $3\lambda_0$) se decide utilizar bocinas. Estas bocinas presentan muy pocas pérdidas y, en función de los parámetros de diseño, una gran directividad. Con la ventaja que supone esta última característica se decide diseñar una antena de bocina que salve el problema de la distancia entre elementos con un ancho de haz estrecho.

Ta y como se comentó brevemente en el 2.2.3, para aumentar la directividad de la bocina manteniendo el mínimo error de fase se debe aumentar tanto el valor de RH y como el de A, permitiendo así que la apertura al final de la estructura de la antena sea mayor y produzca mejor directividad.

Como limitación de apertura en la bocina diseñada se tiene la distancia existente entre las salidas de la red corporativa.

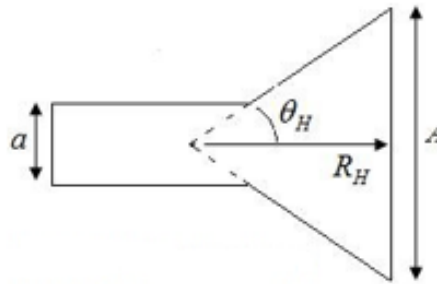


Figura 4- 49 Geometría de una bocina

BOCINA ÓPTIMA PIRAMIDAL

Se realiza el diseño de una bocina piramidal. Imponiendo de nuevo como límite las dimensiones de la apertura se extraen los valores de R_1 y R_2 .

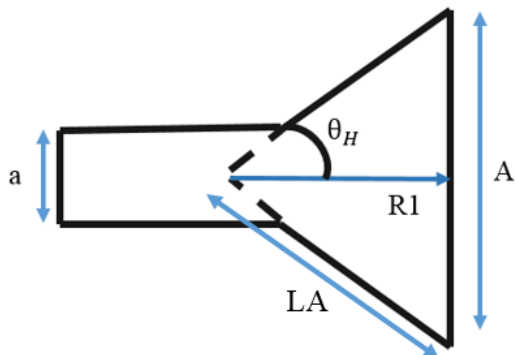


Figura 4- 50 Esquema bocina sectorial plano H

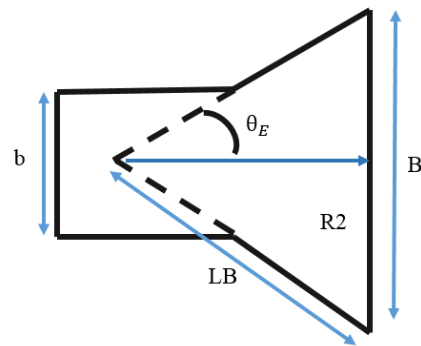


Figura 4- 51 Esquema bocina sectorial plano E

Nuevamente se calculan las dimensiones longitudinales de la bocina. Los parámetros finales de este diseño de bocina con los que se aprecian a continuación:

Tabla 4- 4 Parámetros de la bocina piramidal óptima

Apertura A (mm)	Apertura B (mm)	R1 (mm)	R2 (mm)	Corrección A (mm)	Corrección B (mm)	Longitud A (mm)	Longitud B (mm)
25.26	50.52	120.9	120.9	89.98	89.98	120.88	120.88

Se prueba el diseño de este elemento radiante, primero de forma individual para ver su diagrama de radiación y directividad, siendo esta de 19 dBi.

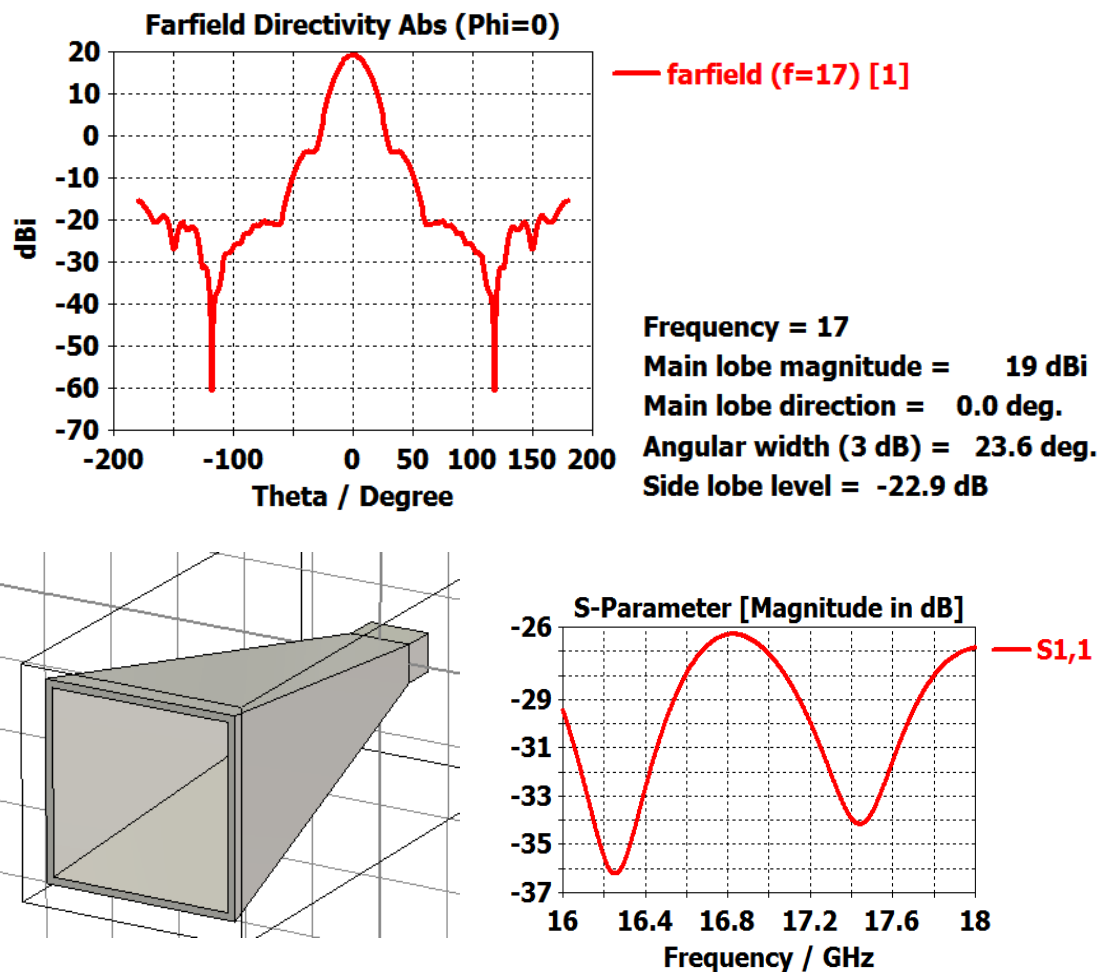


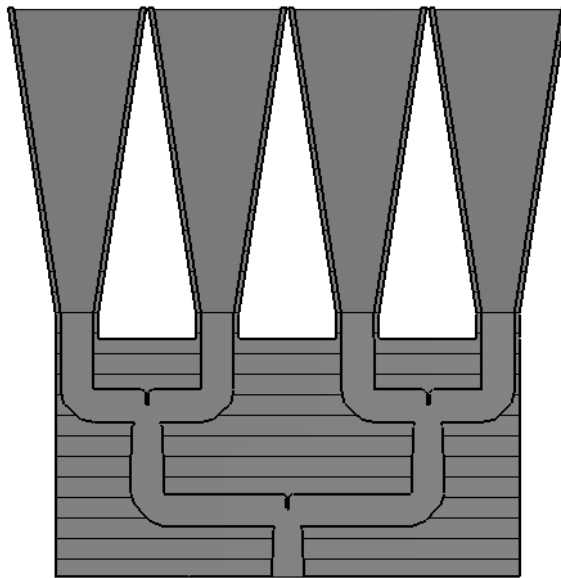
Figura 4- 52 Resultados de la bocina piramidal óptima

Una vez mirados los resultados individuales de la bocina, la cual tiene buena respuesta de adaptación en banda y una directividad considerada suficientemente buena para mitigar los *grating lobes*, se procede a la implementación del array de bocinas con la red de alimentación diseñada, probando inicialmente en la configuración por defecto, es decir, sin desfases. Ya se puede suponer que los diagramas conseguidos de la red tienen mucho *grating lobe* debido a la distancia entre elementos (mayor de λ_0), por lo que se espera que las bocinas consigan reducir este efecto.

4.5 ANTENA FINAL

A continuación, se procedió a simular el resto de configuraciones de la red corporativa diseñada con estos elementos radiantes (se presentan entre 90° y 90° ya que los diagramas conseguidos son muy directivos).

CONFIGURACIÓN 0-0-0



Apuntamiento esperado: $\theta = 0$ grados
Apuntamiento conseguido: $\theta = 0$ grados

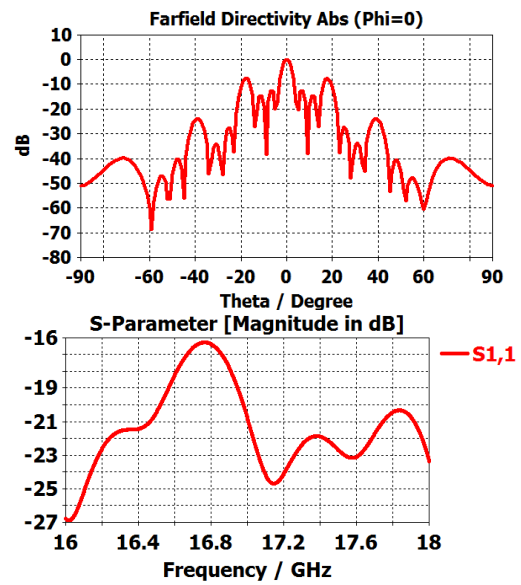
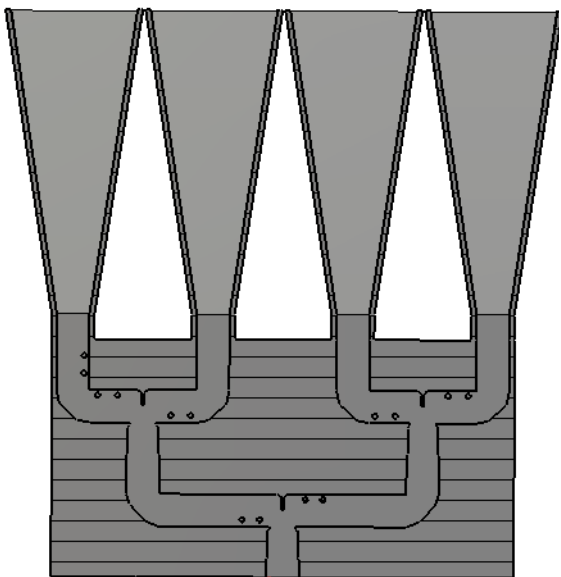


Figura 4- 53 Resultados de la antena 1 con la configuración 0-0-0

CONFIGURACIÓN 20-20-20



Apuntamiento esperado: $\theta = -4$ grados
Apuntamiento conseguido: $\theta = -1$ grados

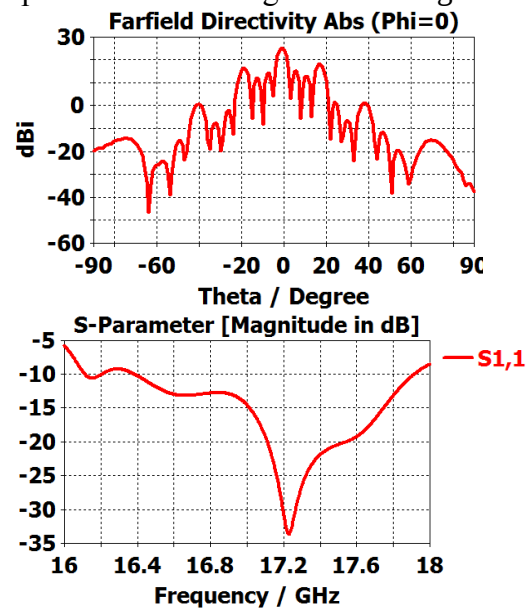


Figura 4- 54 Resultados de la antena 1 con la configuración 20-20-20

CONFIGURACIÓN 50-50-50

Apuntamiento esperado: $\theta = -10$ grados
Apuntamiento conseguido: $\theta = -2$ grados

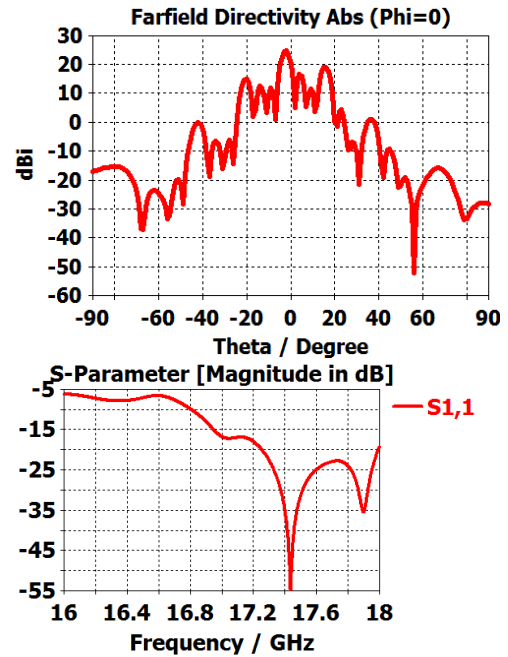
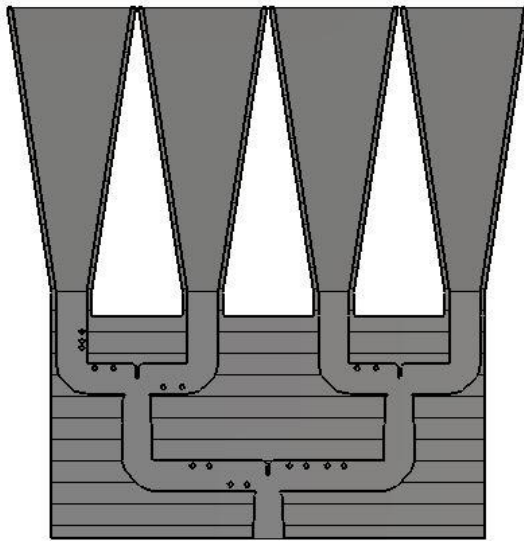


Figura 4- 55 Resultados de la antena 1 con la configuración 50-50-50

CONFIGURACIÓN 70-70-70

Apuntamiento esperado: $\theta = -14$ grados
Apuntamiento conseguido: $\theta = -3$ grados

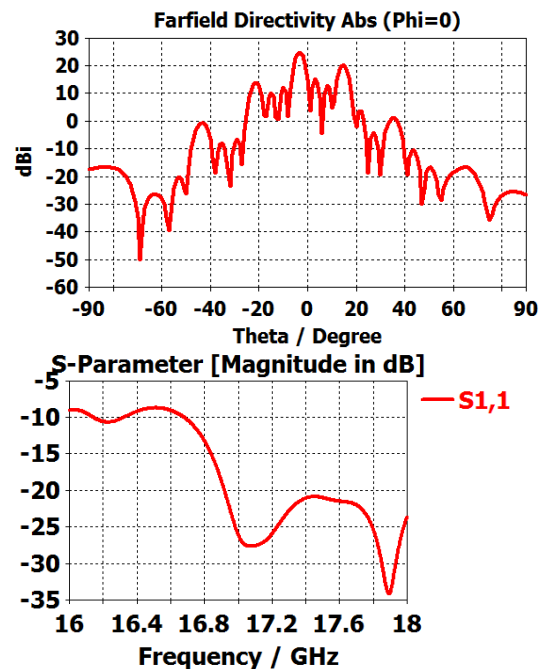
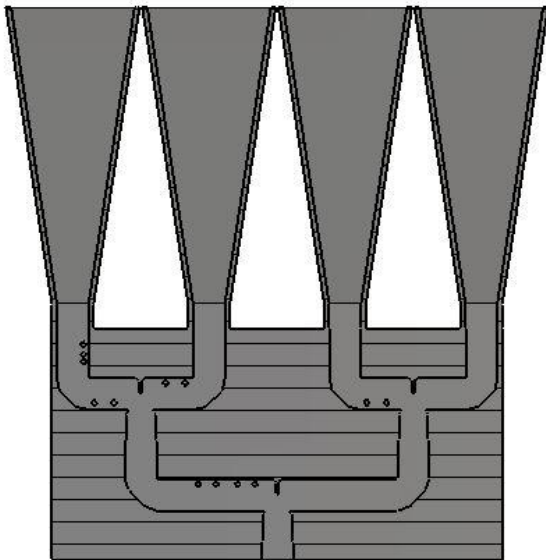


Figura 4- 56 Resultados de la antena 1 con la configuración 70-70-70

CONFIGURACIÓN 120-120-120

Apuntamiento esperado: $\theta = -25$ grados
Apuntamiento conseguido: $\theta = -6$ grados

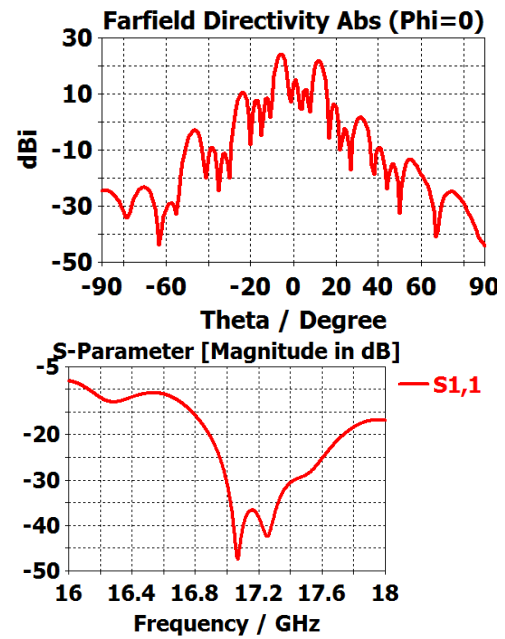
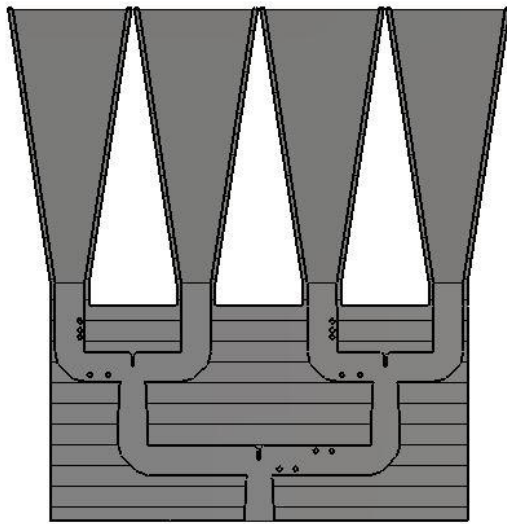


Figura 4- 57 Resultados de la antena 1 con la configuración 120-120-120

CONFIGURACIÓN 30-20-30

Apuntamiento esperado: $\theta = -5$ grados
Apuntamiento conseguido: $\theta = -1$ grados

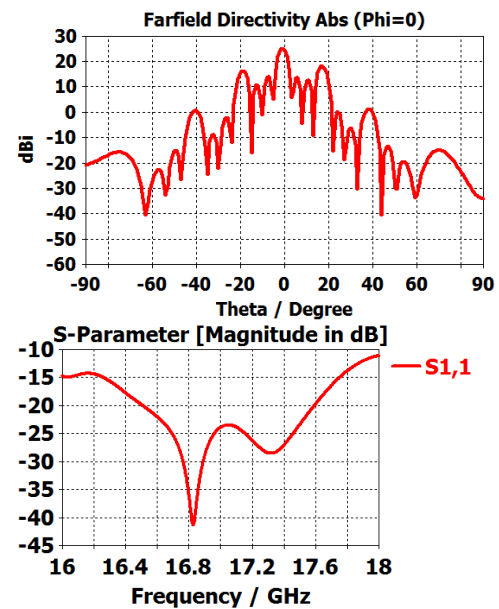
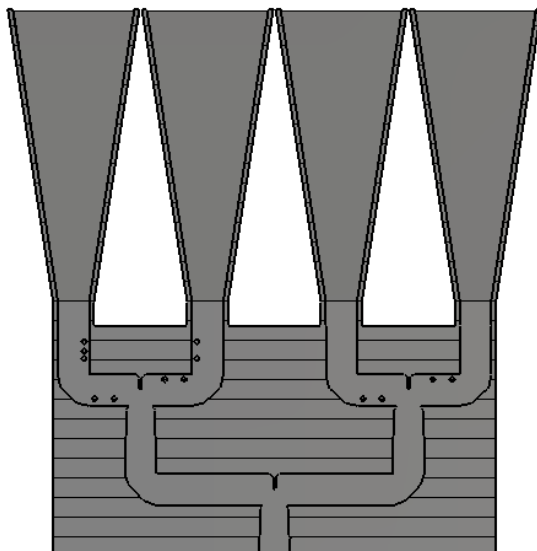


Figura 4- 58 Resultados de la antena 1 con la configuración 30-20-30

CONFIGURACIÓN 40-35-15

Apuntamiento esperado: $\theta = -6$ grados
Apuntamiento conseguido: $\theta = -2$ grados

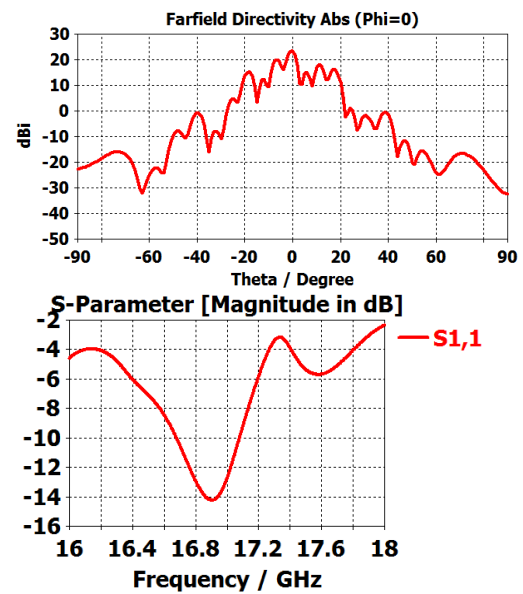
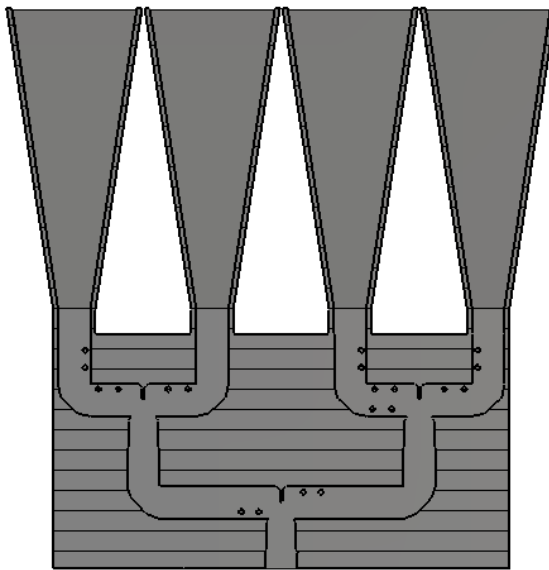


Figura 4- 59 Resultados de la antena 1 con la configuración 40-35-15

CONFIGURACIÓN 50-40-30

Apuntamiento esperado: $\theta = -8$ grados
Apuntamiento conseguido: $\theta = -3$ grados

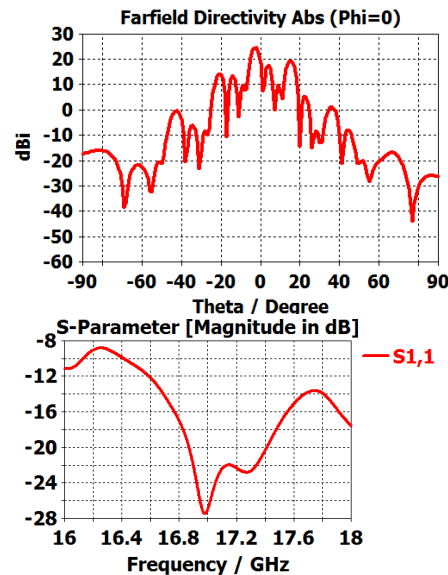
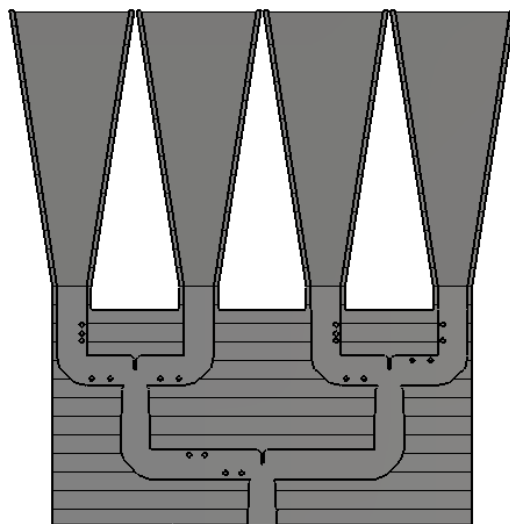
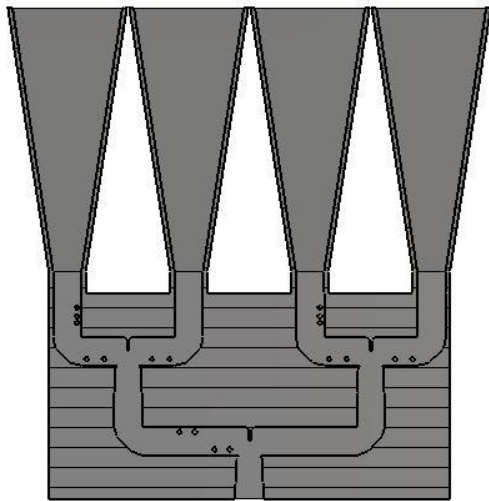


Figura 4- 60 Resultados de la antena 1 con la configuración 50-40-30

CONFIGURACIÓN 50-40-50



Apuntamiento esperado: $\theta = -9$ grados
Apuntamiento conseguido: $\theta = -3$ grados

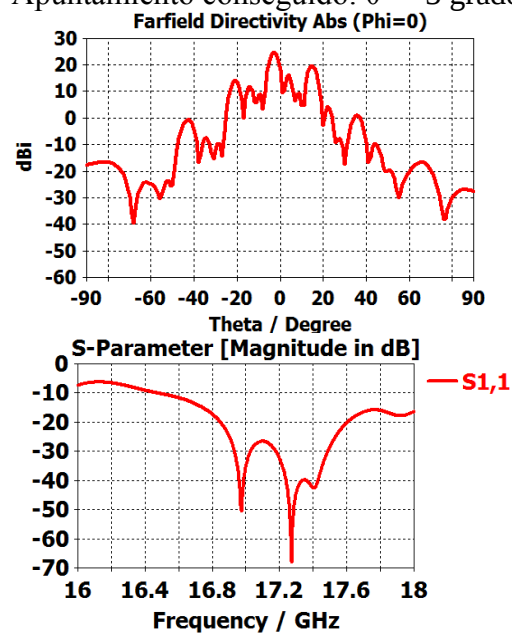
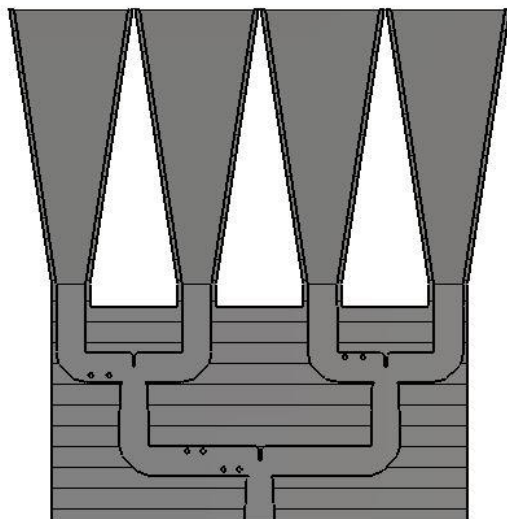


Figura 4- 61 Resultados de la antena 1 con la configuración 50-40-50

CONFIGURACIÓN 70-70-50



Apuntamiento esperado: $\theta = -13$ grados
Apuntamiento conseguido: $\theta = -3$ grados

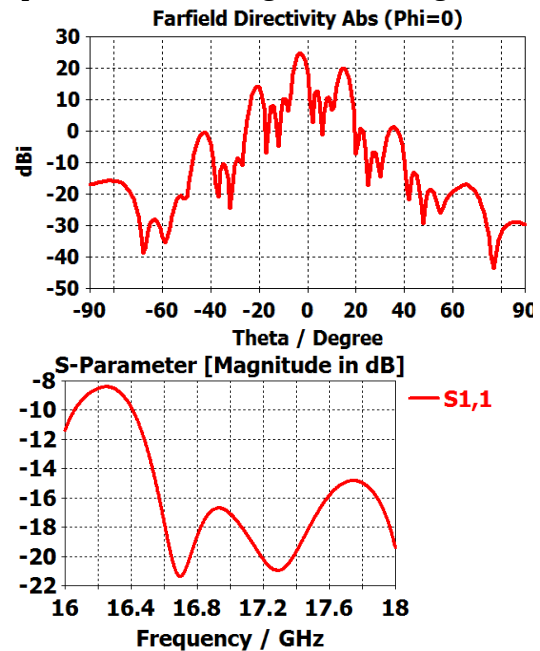


Figura 4- 62 Resultados de la antena 1 con la configuración 70-70-50

CONFIGURACIÓN 90-80-70

Apuntamiento esperado: $\theta = -16$ grados
Apuntamiento conseguido: $\theta = -4$ grados

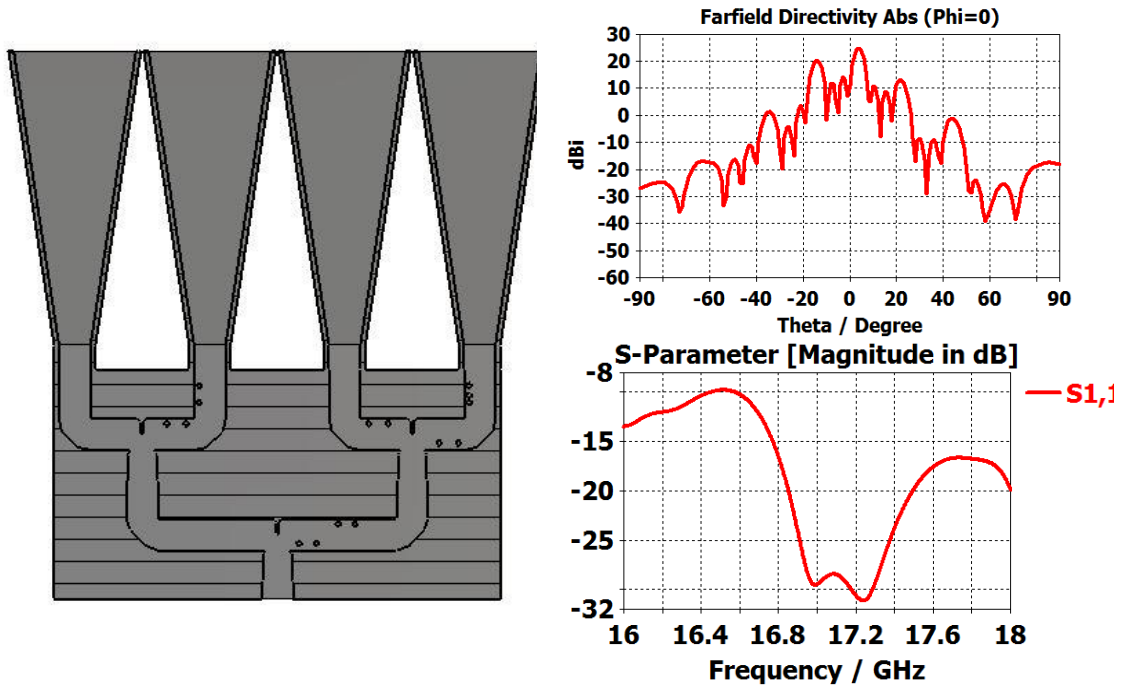


Figura 4- 63 Resultados de la antena 1 con la configuración 90-80-70

Tras estudiar los resultados se observó que, aparte de no conseguir una buena respuesta respecto a diagrama de radiación en ciertas configuraciones, tampoco se conseguían los valores de desfase esperados para cada configuración. Se ha realizado un estudio comparando un factor de array ideal (distancia máxima de elementos a $0.8\lambda_0$) y su apuntamiento respecto al factor de array conseguido con la distancia real entre los elementos ($3\lambda_0$) y se comprueba que, debido precisamente a esta distancia, los apuntamientos se modifican considerablemente, aunque el diagrama de radiación conseguido sí sea válido a niveles de lóbulos secundarios gracias al uso de la bocina.

Este efecto viene relacionado con la fórmula del apuntamiento del array, $\theta_0 = \alpha / (k_0 d)$, donde se aprecia la relación inversa entre apuntamiento máximo y distancia. Conforme aumenta el valor de d , el apuntamiento se reduce. Para poder contrarrestar este efecto sería necesario un α grande, es decir, un desfase muy alto, de tal forma que se consiga el valor deseado de θ_0 .

En el Anexo A se pueden ver las gráficas comparativas realizadas con MATLAB. Debido a los resultados obtenidos se decide descartar esta implementación de red y realizar un nuevo diseño.

En la siguiente tabla se recogen la diferencia de apuntamiento conseguida para cada configuración:

Tabla 4- 5 Comparativa de resultados de apuntamiento ideal vs real de la red 1

Configuración	Apuntamiento ideal (°)	Apuntamiento real simulado (°)
0-0-0	0	0
20-20-20	-4	-1
50-50-50	-10	-2
70-70-70	-14	-3
120-120-120	-25	-6
30-20-30	-5	-1
40-35-15	-6	-2
50-40-30	-8	-3
50-40-50	-9	-3
70-70-50	-13	-3
90-80-70	-16	-4

5. ANTENA 2: ARRAY PARCHE+RANURA APLIADA

En este capítulo se propone una nueva estructura de red de alimentación debido a los resultados insatisfactorios del primer diseño. Este divisor parte del divisor de una entrada y cuatro salidas propuesto en [2].

La principal diferencia con el diseño anterior es que se utilizan como elementos radiantes un parche y una ranura apilada, ambos alimentados por las bocas de la guía de salida. De esta forma, los elementos se han podido situar a una distancia de tan solo $0.8\lambda_0$ (mínima distancia conseguible según el ancho de las guías), por lo que se espera tanto poder mitigar el efecto de *gratinglobes* del anterior diseño como, esta vez sí, conseguir los desapuntamientos esperados teóricamente.

El inconveniente es que los divisores de este diseño son muy compactos y, por tanto, es necesario realizar un diseño completamente nuevo.

Inicialmente se decidió no plantear esta solución de antena por la complejidad de insertar tornillos en una estructura tan compacta, pero debido a que los resultados no son buenos se ha visto la necesidad de realizarla finalmente.

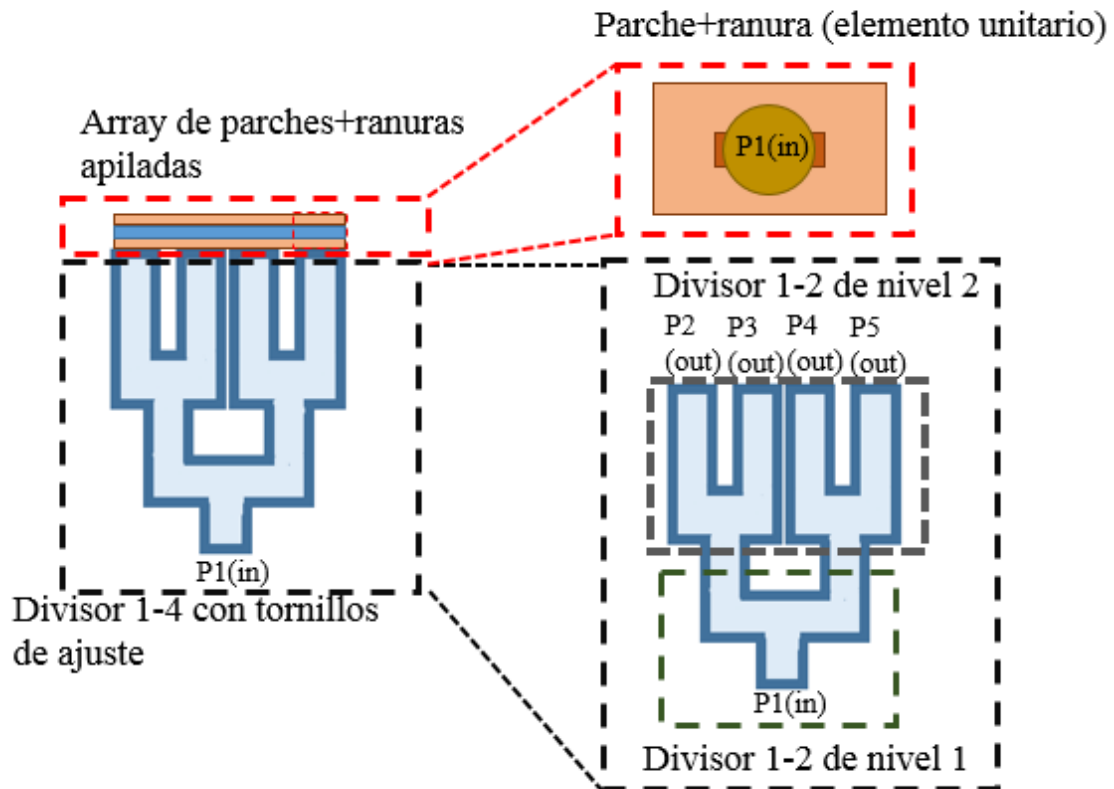


Figura 5- 1 Esquema de la antena 2

El proceso de diseño y caracterización es el mismo que en 4, estudiando primero cada divisor por separado, después realizando su integración para ver el efecto de la red completa y por último la antena completa con los elementos radiantes también diseñados en [2].

5.1 DIVISOR DE PRIMER NIVEL

En el caso del divisor de primer nivel, a partir de ahora divisor en T, de la segunda red parte del diseño del mismo divisor. La peculiaridad de este divisor es que la distancia entre las salidas del mismo es de $1.2\lambda_0$, por lo que es más compacto que la antena 1. En la Figura 5- 2 Divisor se pueden apreciar los resultados de adaptación, reparto de potencia y fase.

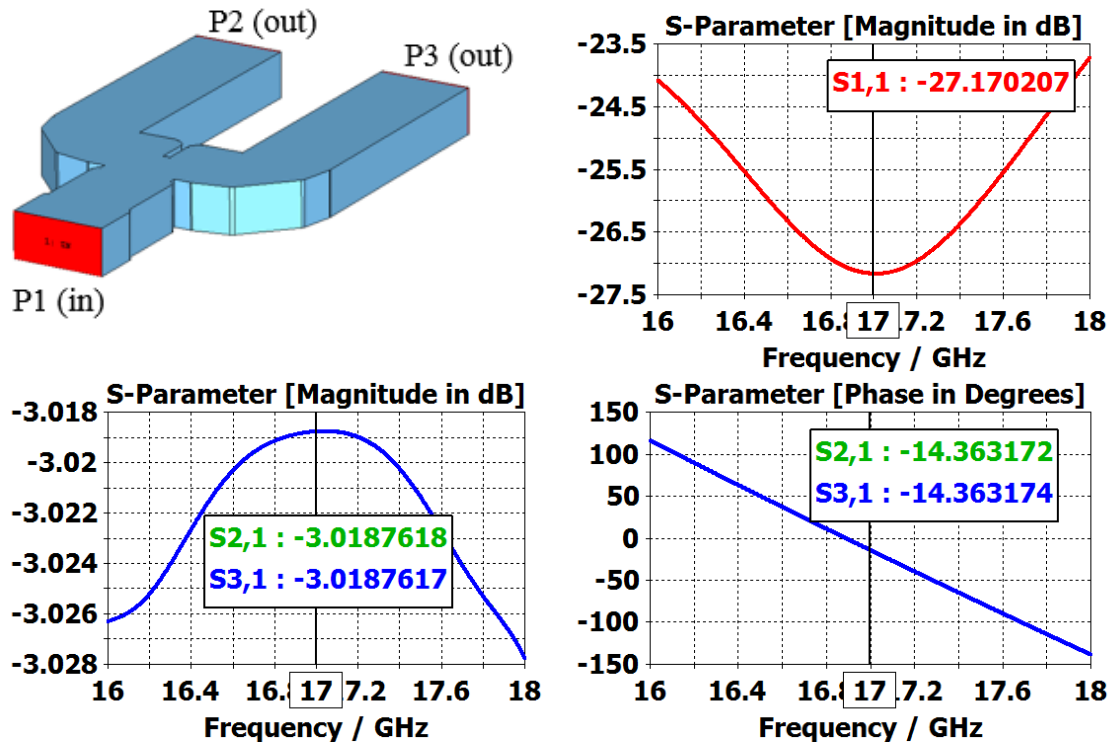


Figura 5- 2 Divisor de primero nivel de la red 2

El primer intento es replicar el valor de los desfases conseguidos en el divisor de primer nivel de la primera antena diseñada. Sin embargo, debido a la diferencia entre las estructuras no se consiguen valores aceptables para los desfases deseados, aunque se consiguen nuevos desfases que sí están adaptados en banda y con una repartición de potencia similar. Para conseguir valores de fase altos es necesario aumentar la longitud de los brazos del divisor ya que, cuanto más se alejan de la entrada alimentada, mayor desfase producen. Se llevó a cabo un proceso de diseño y optimización de la posición de los tornillos para conseguir los desfases relativos de 35°, 55°, 85° y 130°. Los nuevos desfases conseguidos y los pares de tornillos empleados, así como su posición en la estructura, se pueden apreciar a continuación:

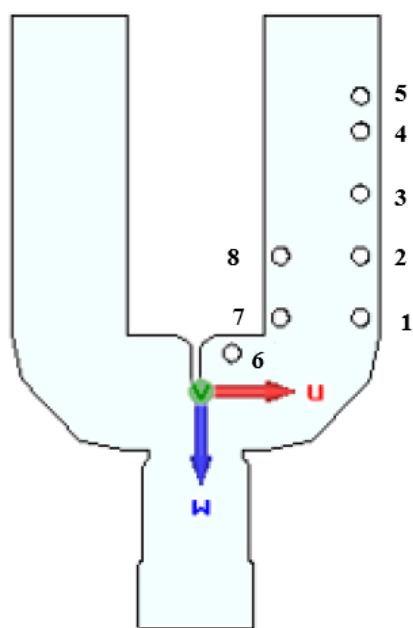


Figura 5- 3 Divisor de primer nivel con los tornillos posicionados

Tabla 5- 1 Posiciones de los tornillos de la estructura de divisor de primer nivel de la red 2

Tornillo	Posición u (mm)	Posición w (mm)
1	18	-8.15
2	18	-15.15
3	18	-22.15
4	18	-29.15
6	3.5	-4.15
5	18	-33.15
7	9	-8.15
8	9	-15.15

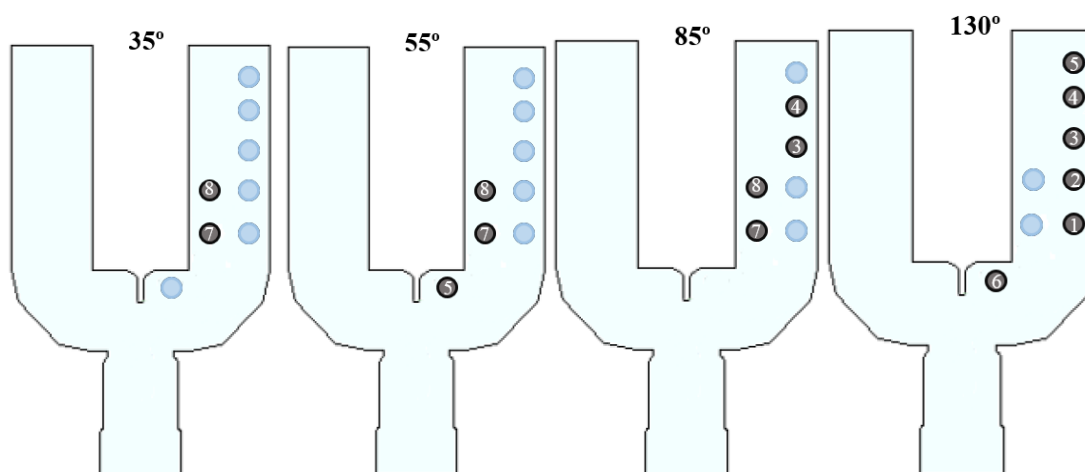


Figura 5- 4 Desfases conseguidos y pares de tornillos empleados en el divisor en de primer nivel en la red 2 diseñada

En las siguientes imágenes se pueden ver los valores conseguidos tanto en reparto de potencia como desfase entre las salidas del divisor en T para cada una de las configuraciones indicadas.

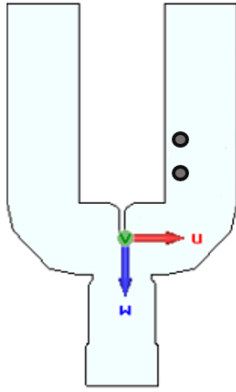


Figura 5- 5 Esquema para 35° del divisor de primer nivel de la red 2

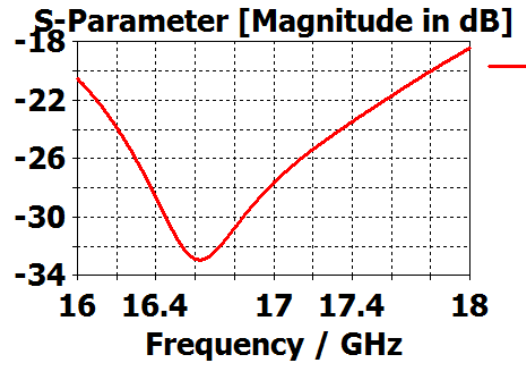


Figura 5- 6 Adaptación (S11) para 35° del divisor de primer nivel de la red 2

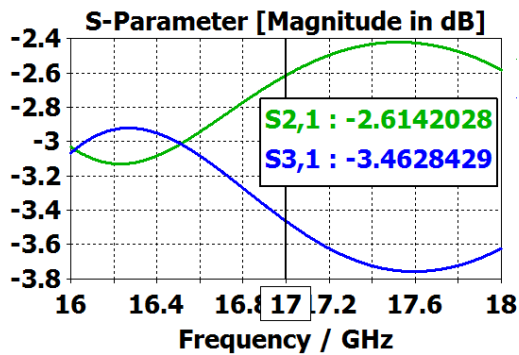


Figura 5- 7 Reparto de potencia para 35° del divisor de primer nivel de la red 2

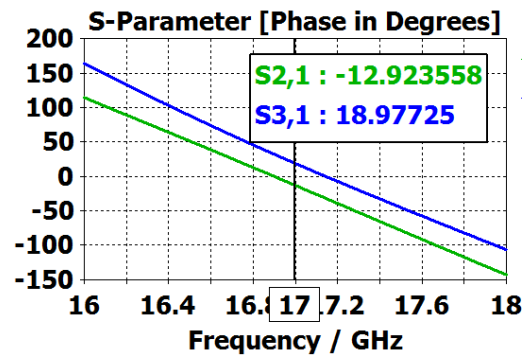


Figura 5- 8 Diferencia de fase para 35° del divisor de primer nivel de la red 2

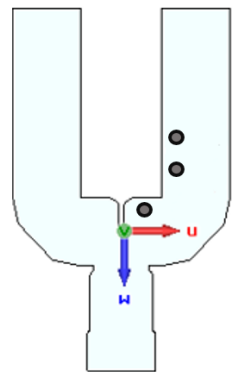


Figura 5- 9 Esquema para 55° del divisor de primer nivel de la red 2

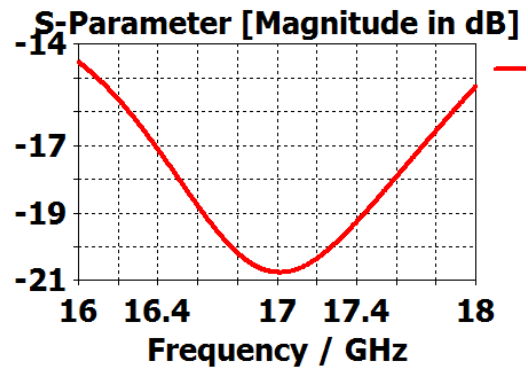


Figura 5- 10 Adaptación (S11) para 55° del divisor de primer nivel de la red 2

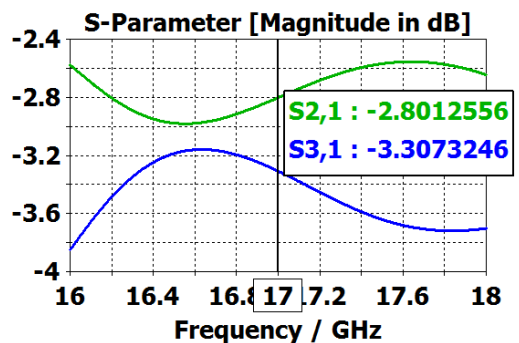


Figura 5- 11 Reparto de potencia para 55° del divisor de primer nivel de la red 2

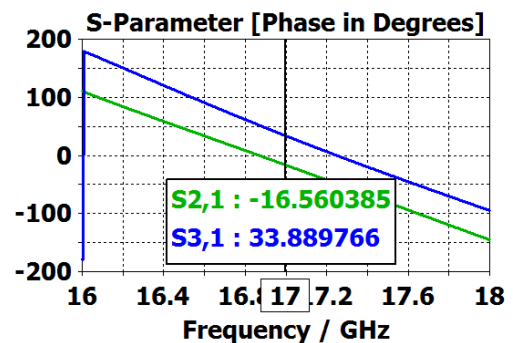


Figura 5- 12 Diferencia de fase para 55° del divisor de primer nivel de la red 2

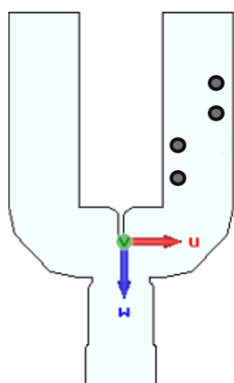


Figura 5- 13 Esquema para 85° del divisor de primer nivel de la red 2

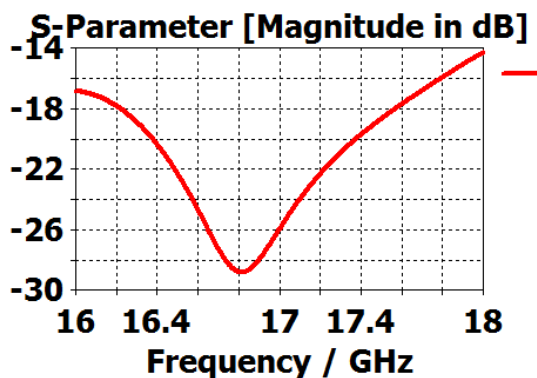


Figura 5- 14 Adaptación (S11) para 85° del divisor de primer nivel de la red 2

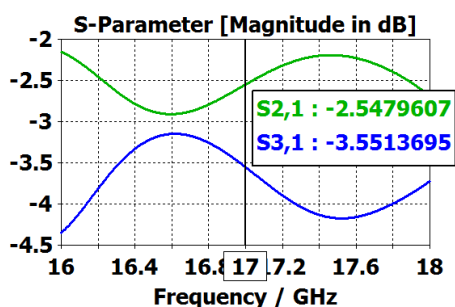


Figura 5- 15 Reparto de potencia para 85° del divisor de primer nivel de la red 2

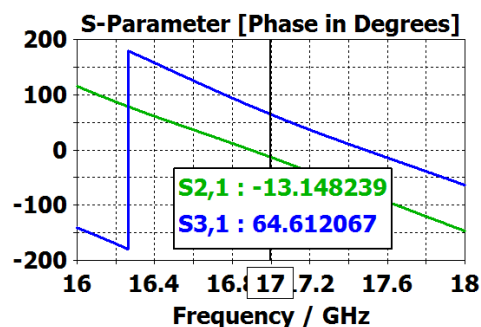


Figura 5- 16 Diferencia de fase para 85° del divisor de primer nivel de la red 2

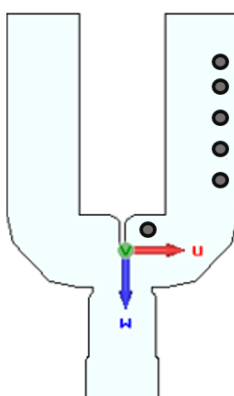


Figura 5- 17 Esquema para 130° del divisor de primer nivel de la red 2

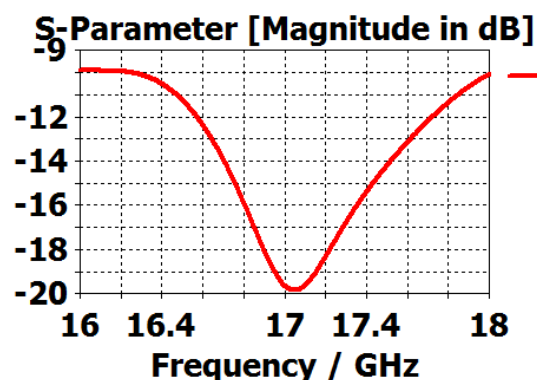


Figura 5- 18 Adaptación (S11) para 130° del divisor de primer nivel de la red 2

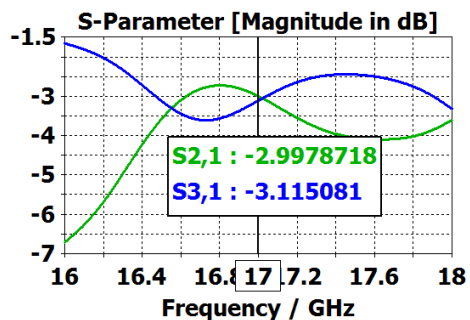


Figura 5- 19 Reparto de potencia para 130° del divisor de primer nivel de la red 2

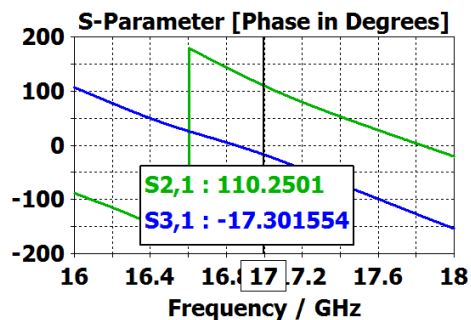


Figura 5- 20 Diferencia de fase para 130° del divisor de primer nivel de la red 2

5.2 DISEÑO DEL DIVISOR DE SEGUNDO NIVEL

En el caso del divisor de segundo nivel, a partir de ahora divisor en Y, de la segunda red parte del diseño del mismo divisor presentado en [2]. En este caso la distancia de las salidas se encuentra a $0.8\lambda_0$, y como es un divisor muy compacto las posiciones de los tornillos deben ser reconfiguradas completamente. A continuación, se pueden apreciar los resultados de adaptación, reparto de potencia y fase.

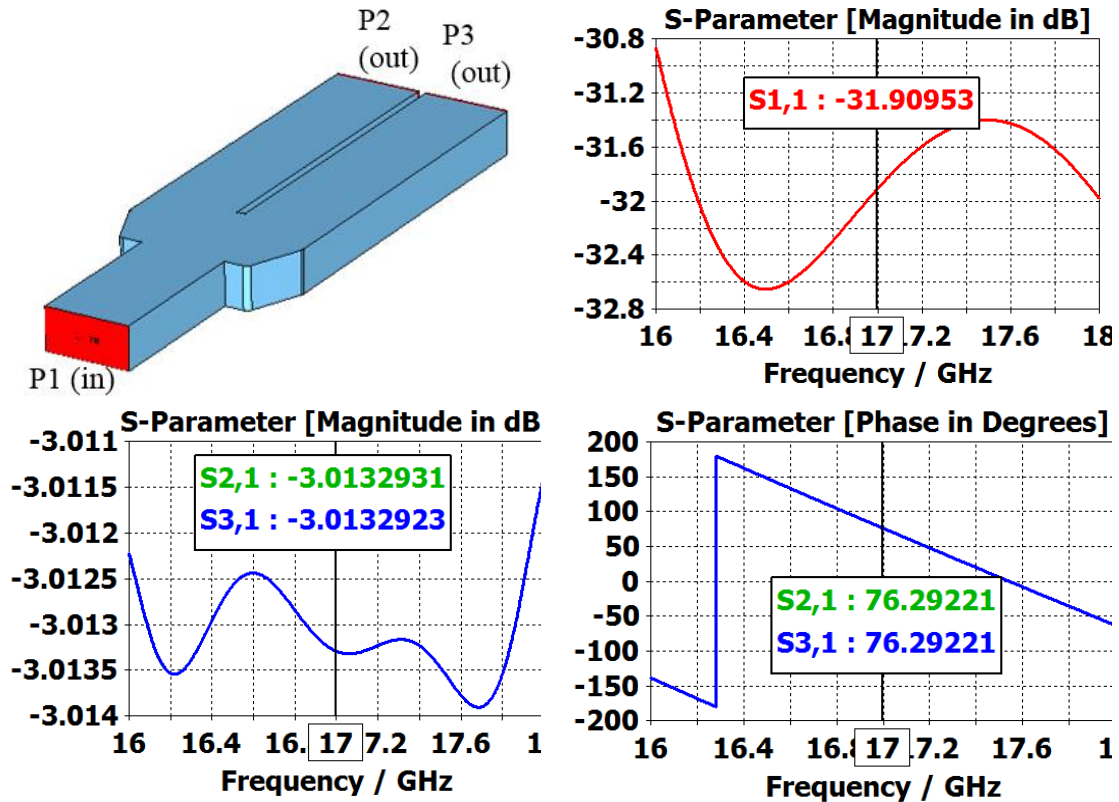


Figura 5- 21 Divisor de segundo nivel de la red 2

El primer intento es replicar el valor de los desfases conseguidos en el divisor de segundo nivel de la primera antenna diseñada. Sin embargo, tal y como se comentó con el divisor de primer nivel y como se ha dicho al inicio de este capítulo, el divisor es muy compacto. Debido a eso es necesario recalcular la posición de los tornillos intentando conseguir los desfases deseados inicialmente. Tras realizar un estudio de posición de tornillos dentro de la estructura, no fue posible conseguir los desfases deseados, aunque se consiguieron otros igualmente válidos. A continuación, se pueden apreciar los tornillos posicionados y los desfases conseguidos con los pares de tornillos utilizados:

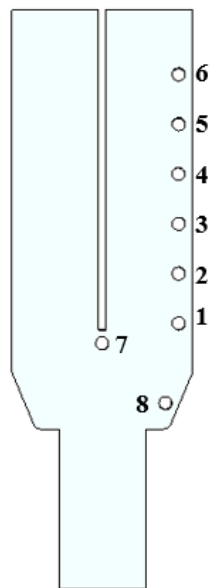


Figura 5- 22 Divisor de segundo nivel con los tornillos posicionados

Tabla 5- 2 Posiciones de los tornillos de la estructura de divisor en Y nivel de la red 2 diseñada

Tornillo	Posición u (mm)	Posición w (mm)
1	11.5	-1
2	11.5	-8.5
3	11.5	-16
4	11.5	-23.5
5	11.5	-31
6	11.5	-38.5
7	0	2
8	9.5	11

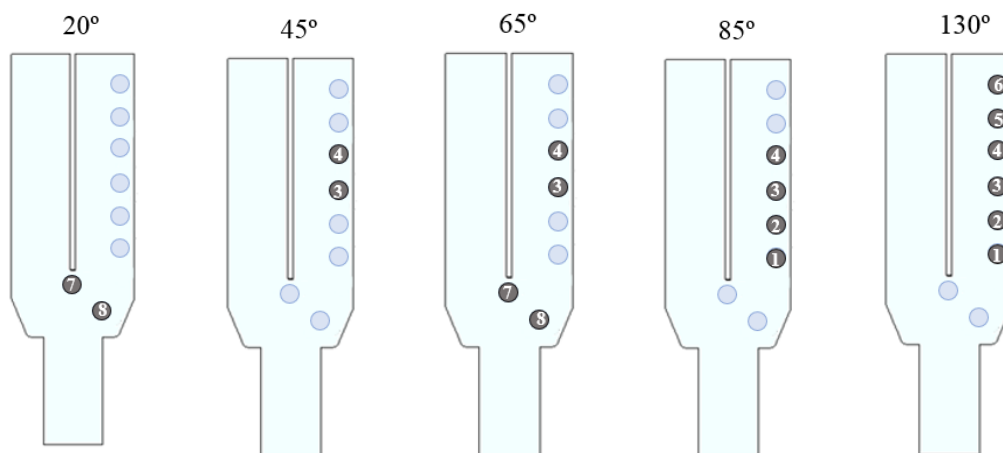


Figura 5- 23 Desfases conseguidos y pares de tornillos empleados en el divisor en Y en la red 2 diseñada

En las siguientes imágenes se pueden ver los valores conseguidos tanto en reparto de potencia como desfase entre las salidas del divisor en T para cada una de las configuraciones indicadas.



Figura 5- 24 Posición de los tornillos para desfase de 20° del divisor en Y de la red 2

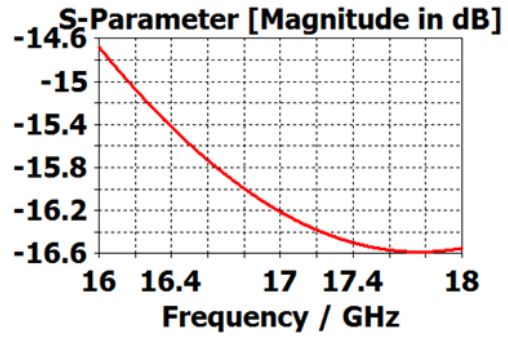


Figura 5- 25 Adaptación (S11) para 20° del divisor de segundo nivel de la red 2

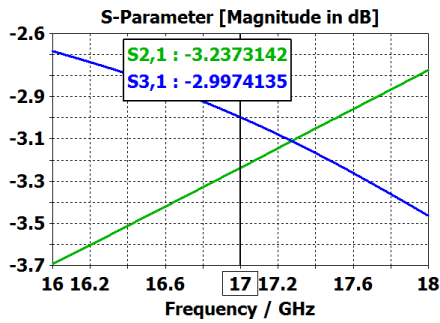


Figura 5- 26 Reparto de potencia para 20° del divisor en Y de la red 2

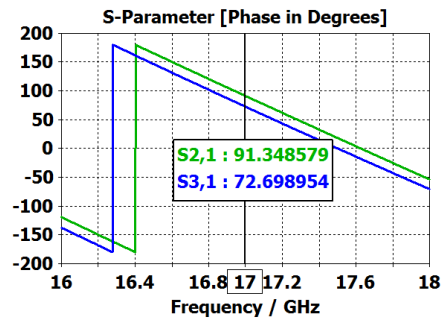


Figura 5- 27 Diferencia de fase para 20° del divisor en Y de la red 2



Figura 5- 28 Posición de los tornillos para desfase de 45° del divisor en Y de la red 2

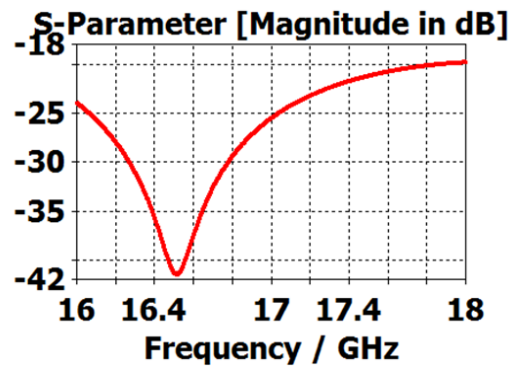


Figura 5- 29 Adaptación (S11) para 45° del divisor de segundo nivel de la red 2

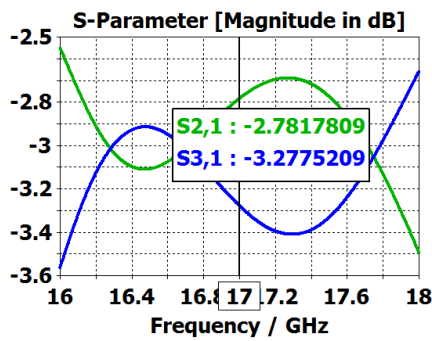


Figura 5- 30 Reparto de potencia para 45° del divisor en Y de la red 2

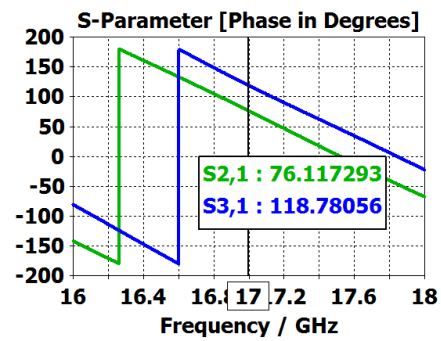


Figura 5- 31 Diferencia de fase para 45° del divisor en Y de la red 2



Figura 5- 32 Posición de los tornillos para desfase de 65° del divisor en Y de la red 2

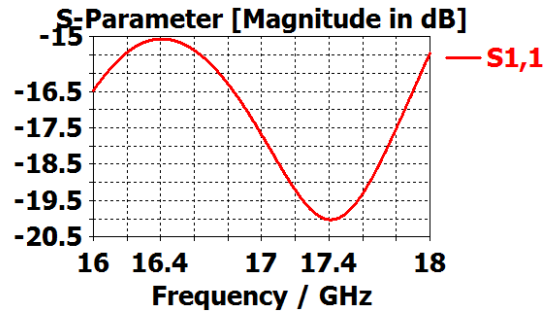


Figura 5- 33 Adaptación (S11) para 65° del divisor de segundo nivel de la red 2

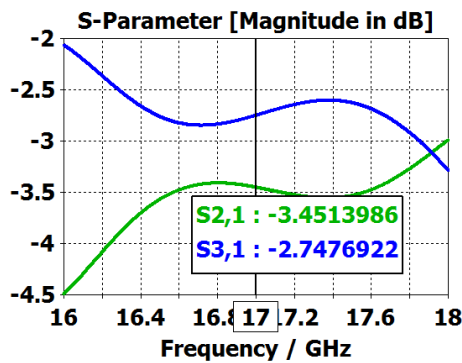


Figura 5- 34 Reparto de potencia para 65° del divisor en Y de la red 2

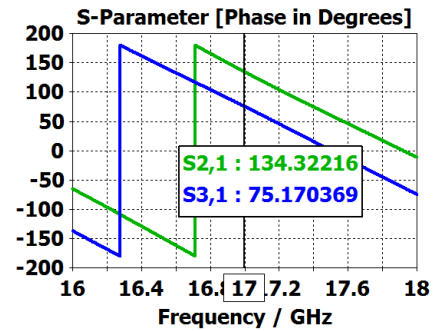


Figura 5- 35 Diferencia de fase para 65° del divisor en Y de la red 2



Figura 5- 36 Posición de los tornillos para desfase de 85° del divisor en Y de la red 2

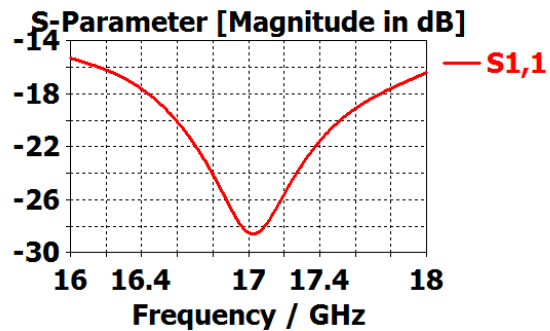


Figura 5- 37 Adaptación (S11) para 85° del divisor de segundo nivel de la red 2

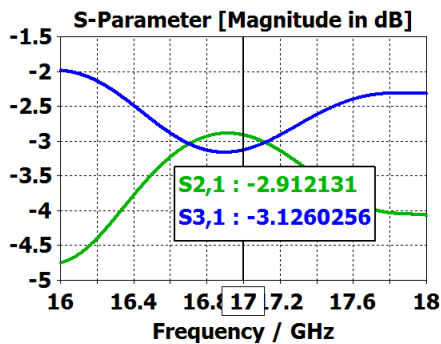


Figura 5- 38 Reparto de potencia para 85° del divisor en Y de la red 2

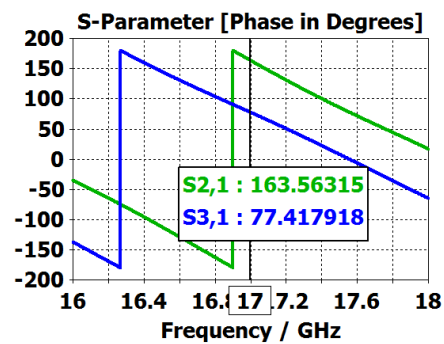


Figura 5- 39 Diferencia de fase para 85° del divisor en Y de la red 2



Figura 5- 40 Posición de los tornillos para desfase de 130° del divisor en Y de la red 2

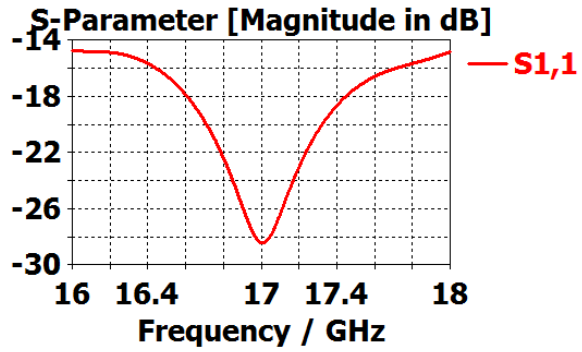


Figura 5- 41 Adaptación (S11) para 130° del divisor de segundo nivel de la red 2

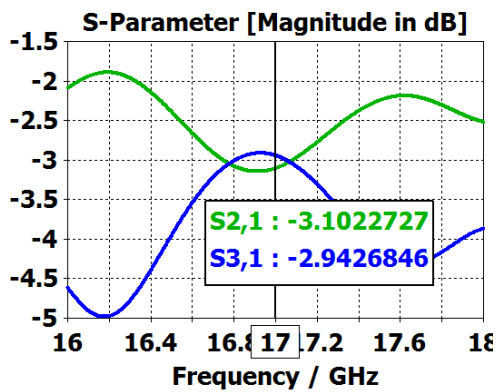


Figura 5- 42 Reparto de potencia para 130° del divisor en Y de la red 2

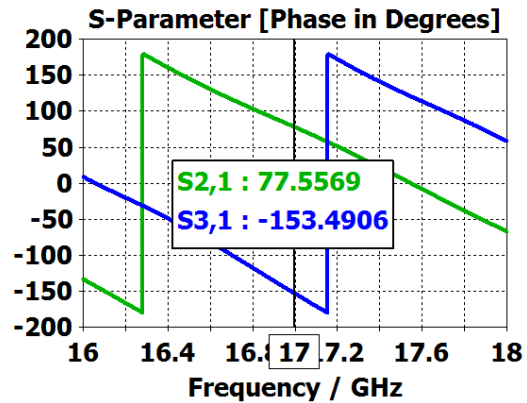


Figura 5- 43 Diferencia de fase para 130° del divisor en Y de la red 2

5.3 DIVISOR COMPLETO

Una vez realizado el estudio individual de cada divisor y sus configuraciones correspondientes, se procede a implementar el divisor completo de una entrada y cuatro salidas. Se conecta a cada una de las salidas del divisor de primer nivel un divisor de segundo nivel. A continuación, se puede ver el resultado en adaptación, reparto de potencia y fase en cada puerta de salida:

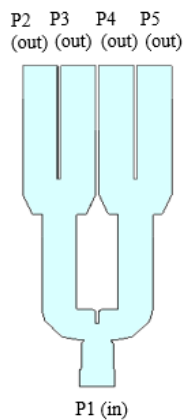


Figura 5- 44 Estructura del divisor completo de la red 2

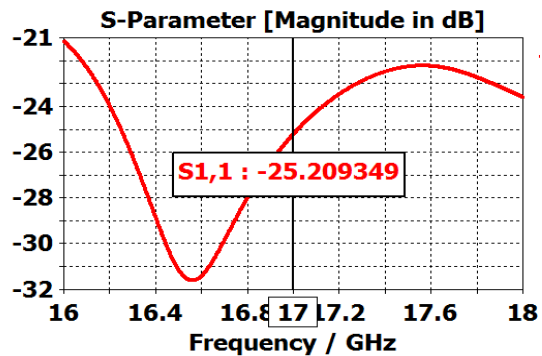


Figura 5- 45 Adaptación de la estructura del divisor completo de la red 2

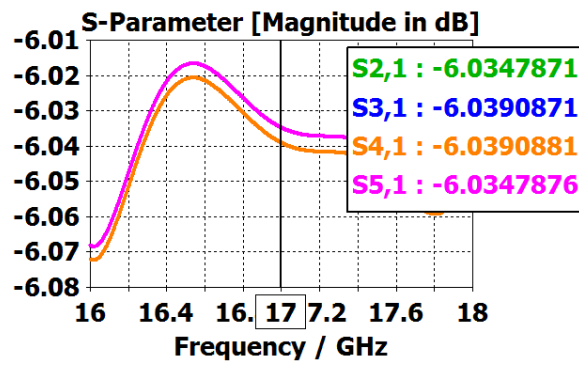


Figura 5- 46 Reparto de potencia de la estructura del divisor completo de la red 2

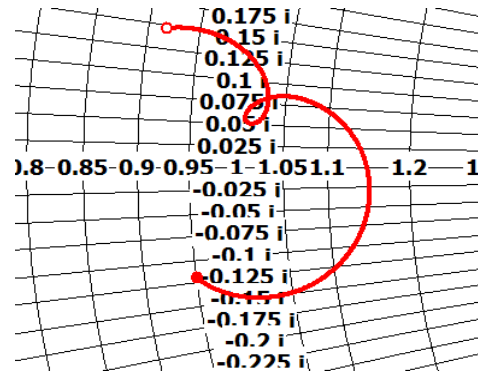


Figura 5- 47 Adaptación en carta de Smith de la estructura del divisor completo de la red 2

Las configuraciones de desfases progresivos y quasi-progresivos se pueden apreciar en las siguientes figuras. En este caso, debido a los valores conseguidos de fases, se consiguen menor número de desfases progresivos.

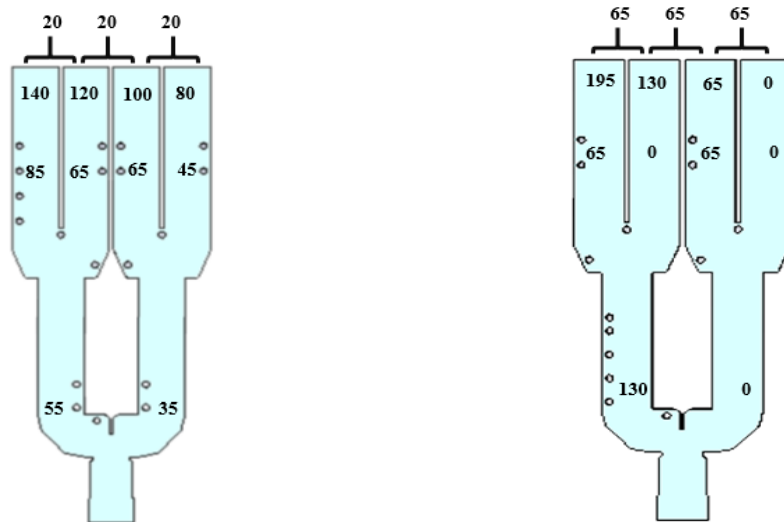
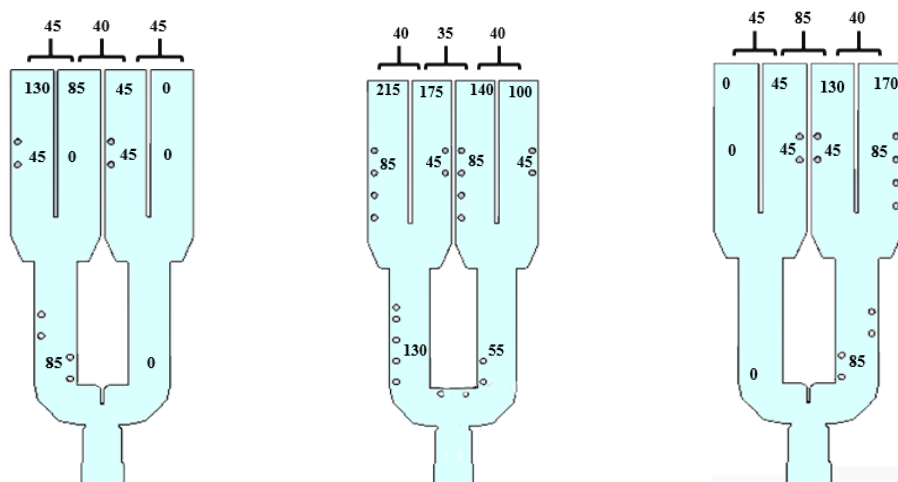


Figura 5- 48 Redes finales con las configuraciones de desfases progresivos de la red 2



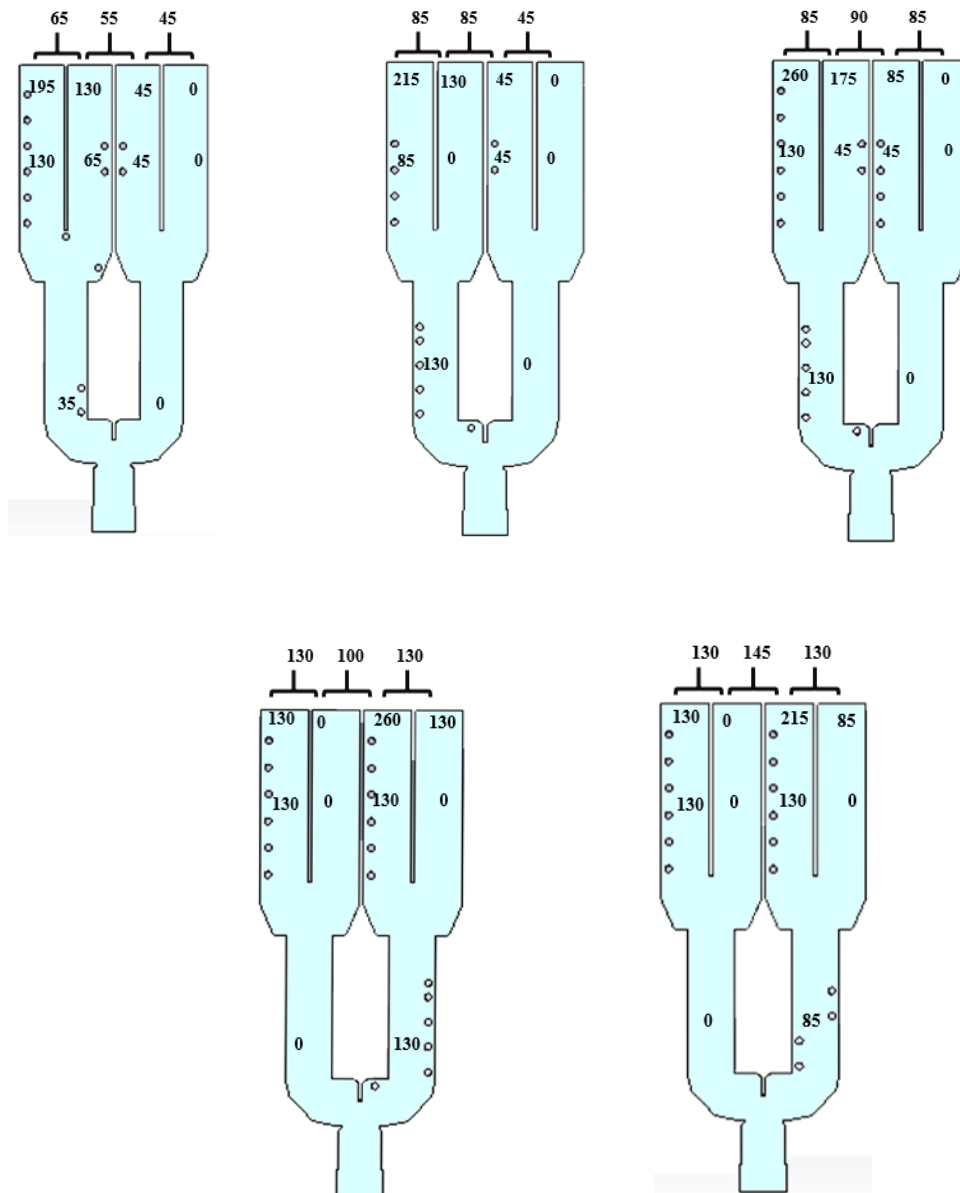


Figura 5- 49 Redes finales con las configuraciones de desfases quasi-progresivos de la red 2

Estudiados los desfases conseguidos a la salida de la estructura completa, se procede a un reajuste de la red tal y como se realizó con la red 1 en el capítulo 4. Igualmente, se hace uso del programa ADS para realizar un estudio del modelo circuital y caracterizar la transición como una línea de transmisión de 50Ω con la longitud eléctrica necesaria para optimizar las adaptaciones de todas las configuraciones.

Tras realizar pruebas de distintos valores para la longitud eléctrica de las transiciones se considera que con un valor aproximado de -300° se optimiza la respuesta en adaptación en la banda.

Los resultados obtenidos tanto de adaptación como de repartición de potencia y fases en cada puerto de salida para cada una de las configuraciones expuestas anteriormente son los siguientes:

Configuración 20-20-20

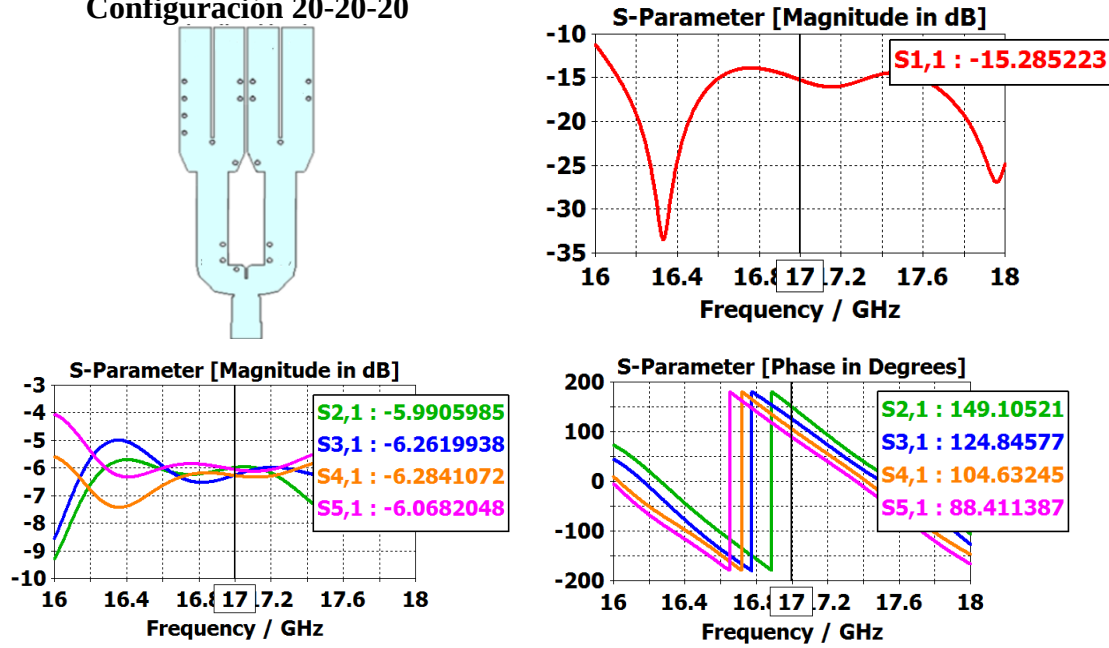


Figura 5- 50 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 20-20-20

Configuración 65-65-65

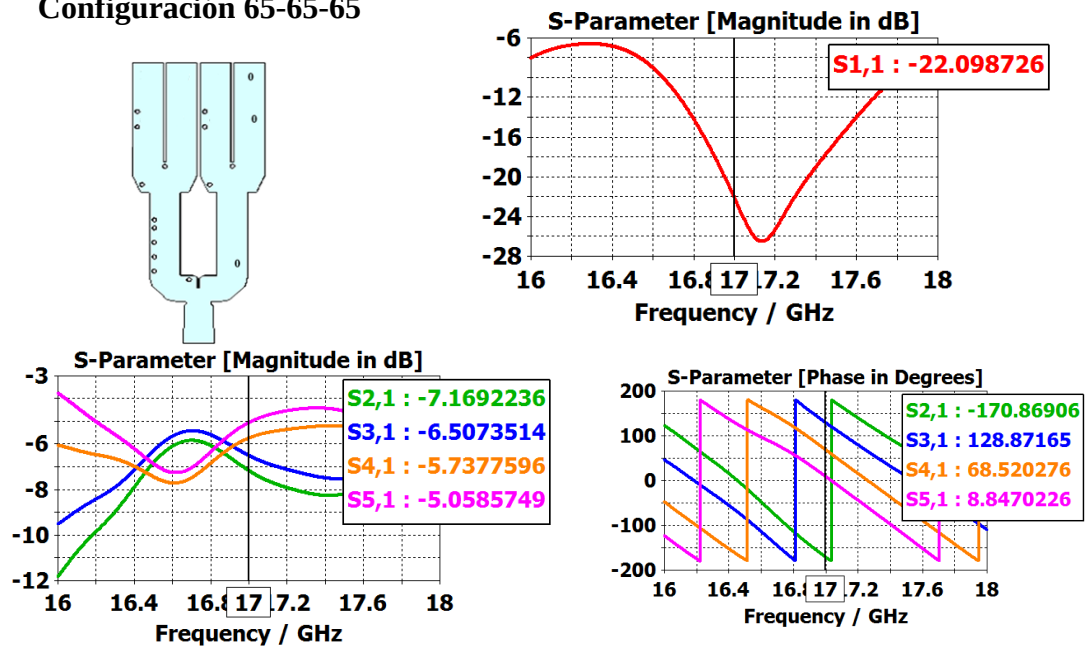


Figura 5- 51 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 65-65-65

Configuración 40-35-40

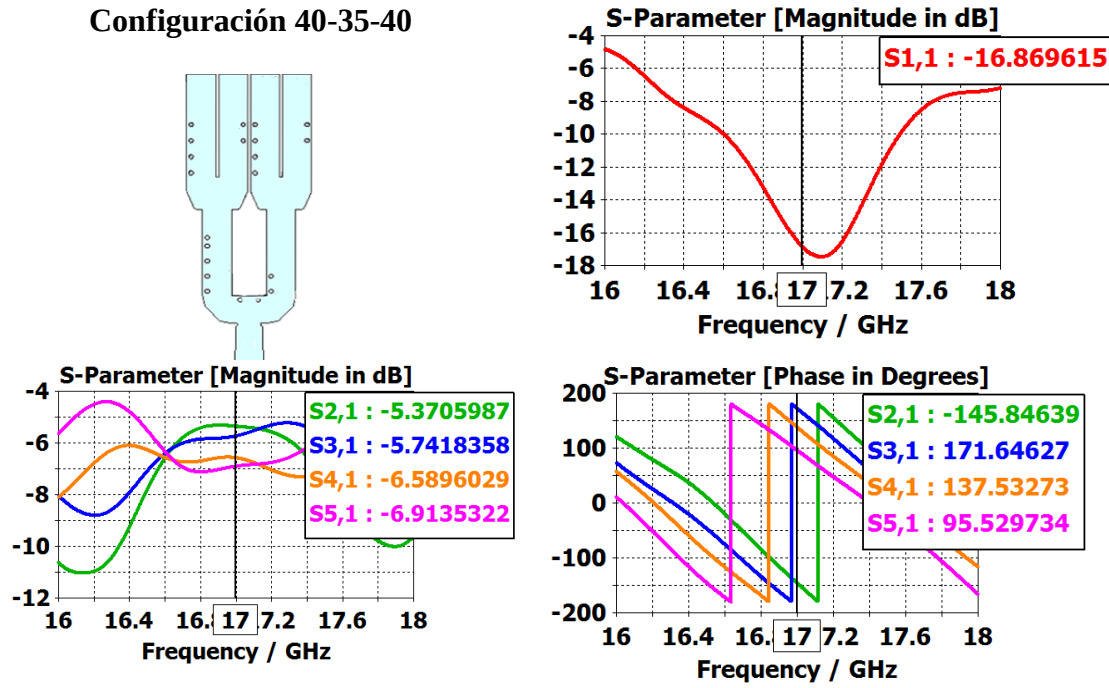


Figura 5- 52 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 40-35-40

Configuración 40-45-40

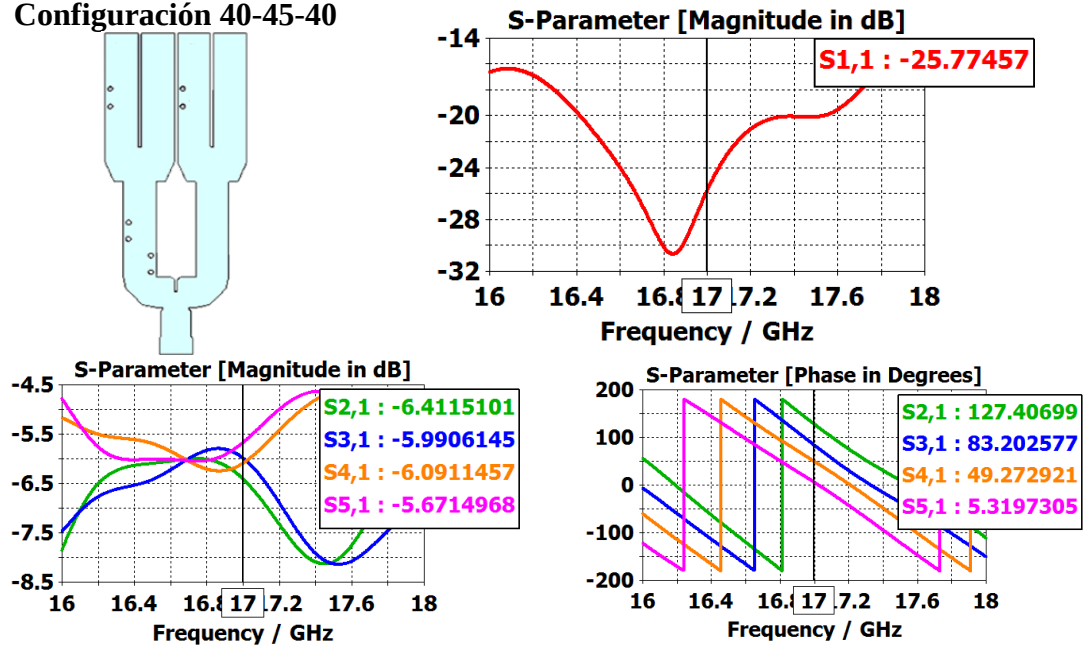


Figura 5- 53 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 45-40-45

Configuración 45-85-40

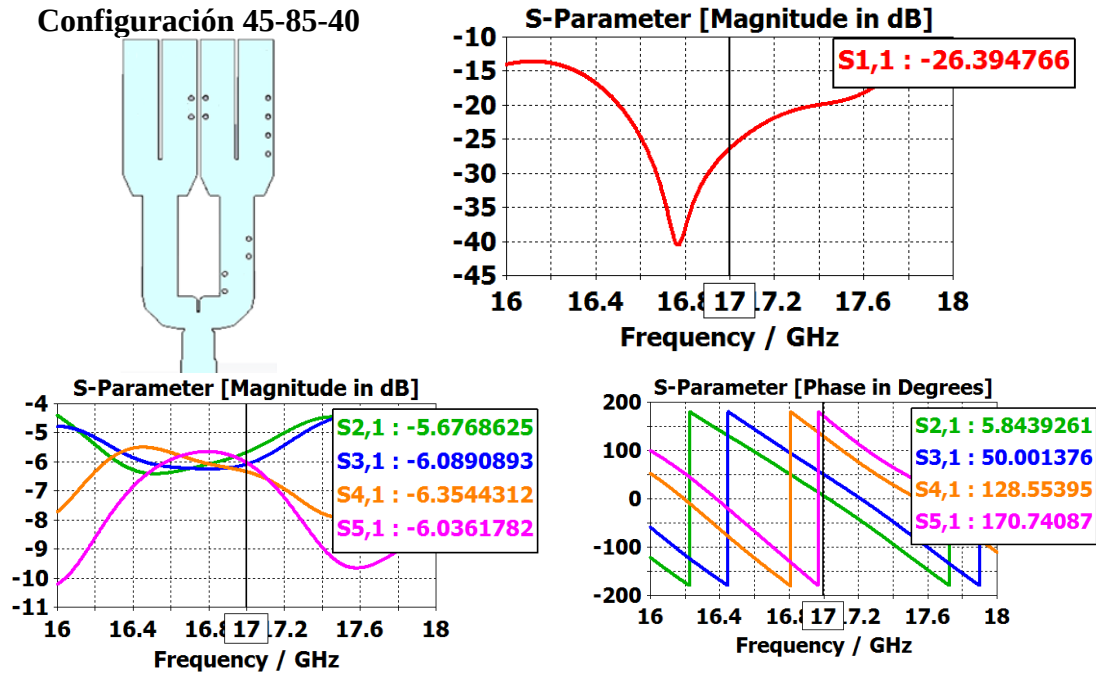


Figura 5- 54 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 45-85-40

Configuración 65-55-45

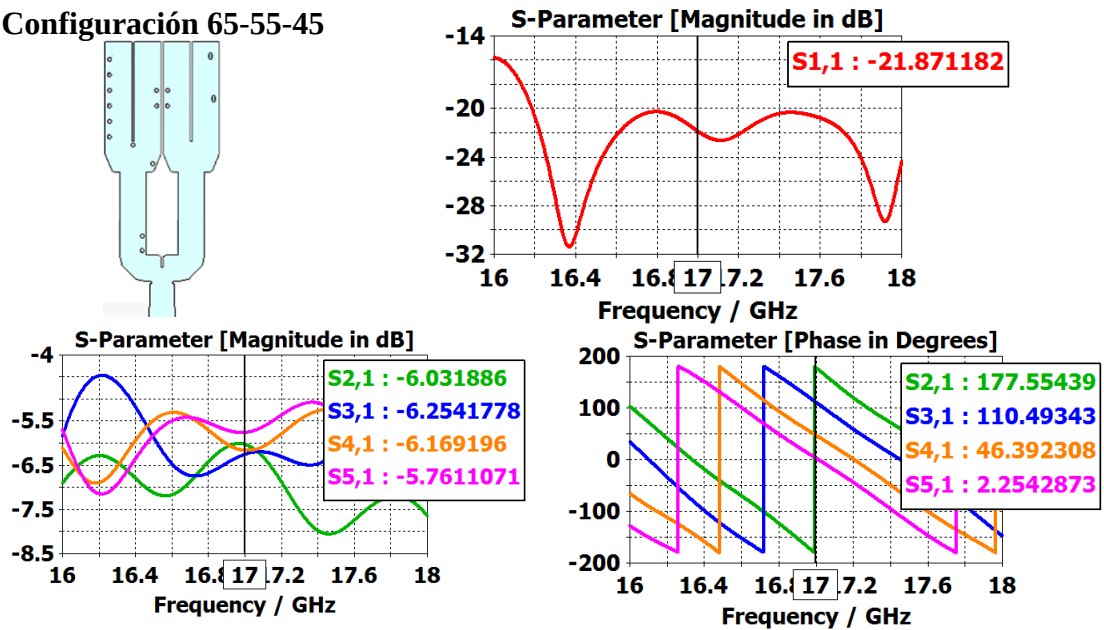


Figura 5- 55 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 65-55-45

Configuración 85-85-45

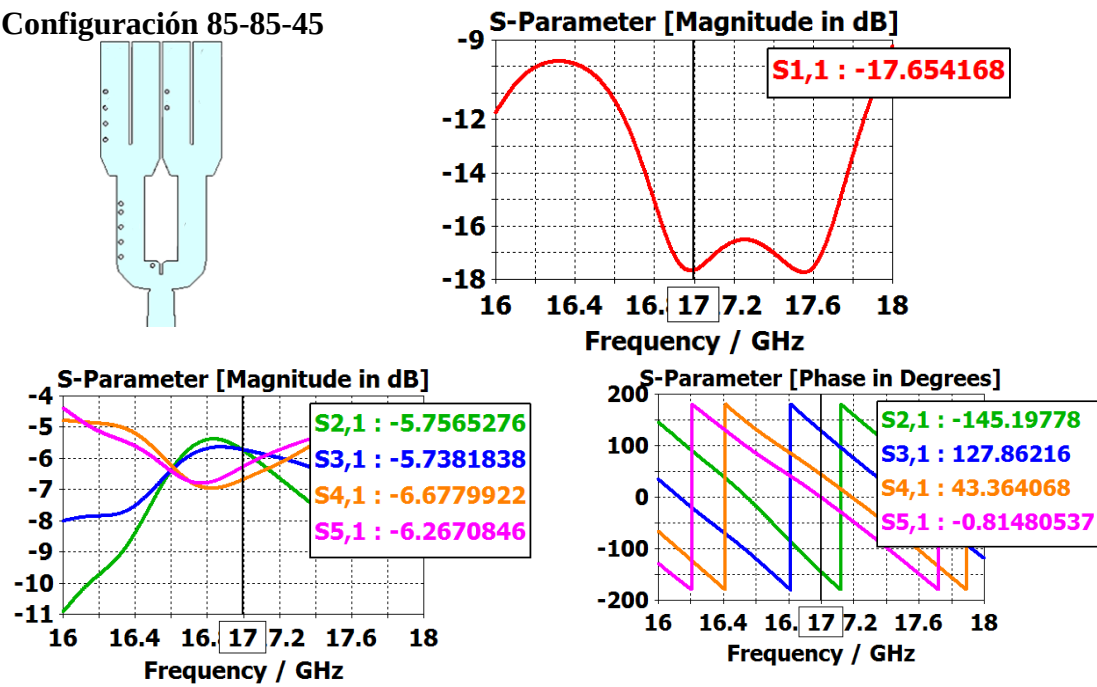


Figura 5- 56 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 85-85-45

Configuración 85-90-85

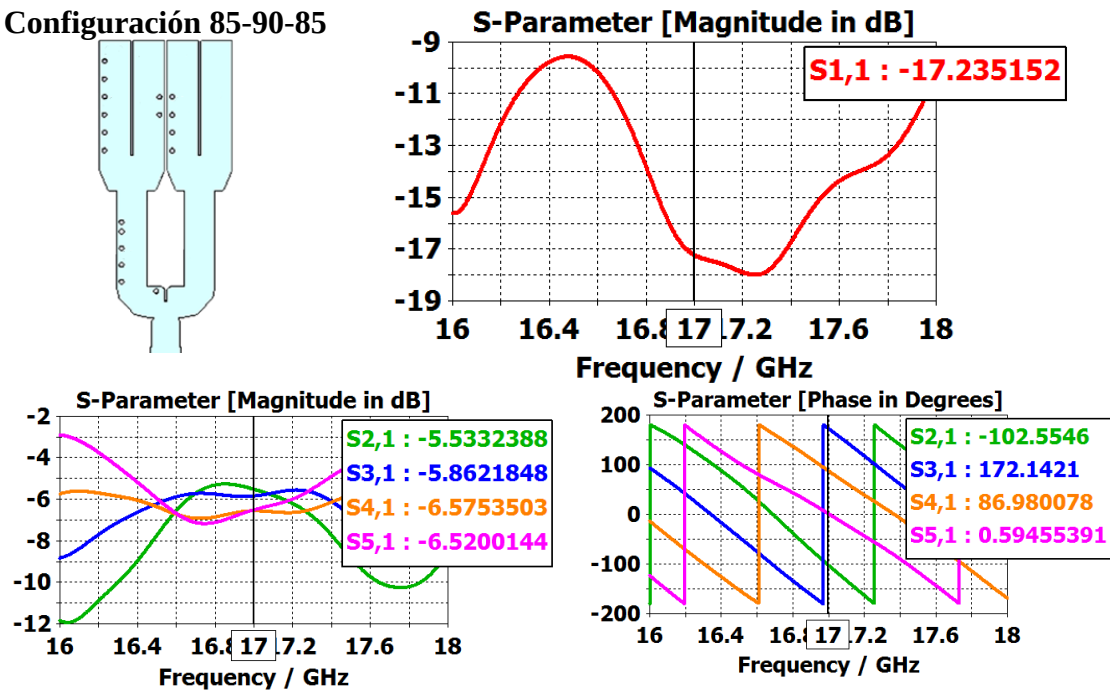


Figura 5- 57 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 85-90-85

Configuración 130-100-130

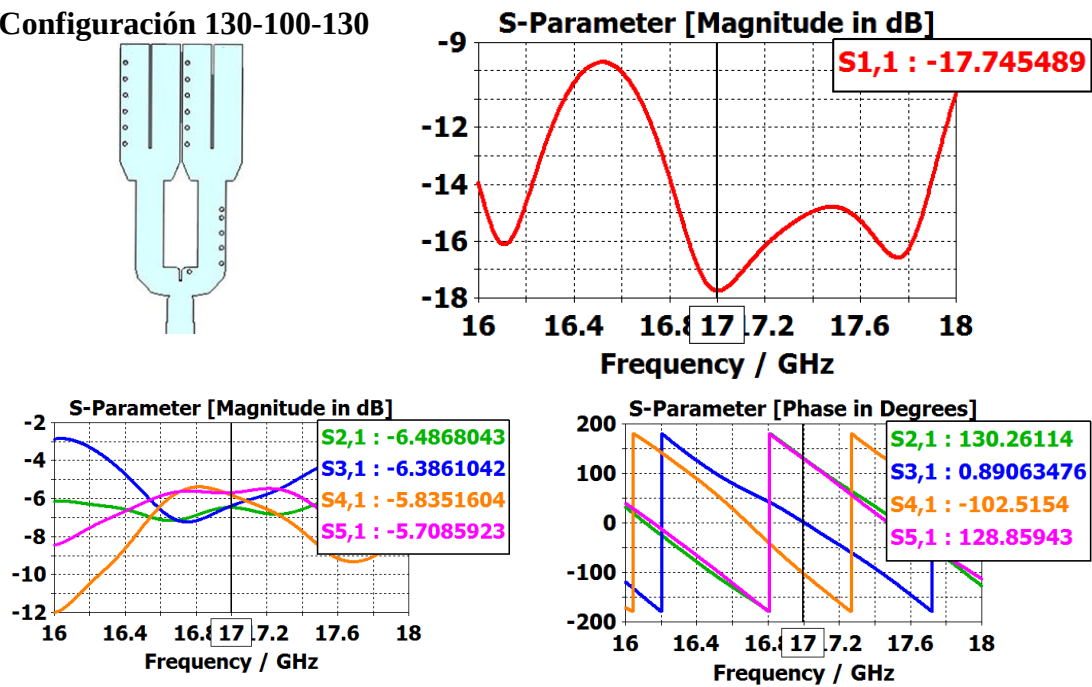


Figura 5- 58 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 130-100-130

Configuración 130-145-130

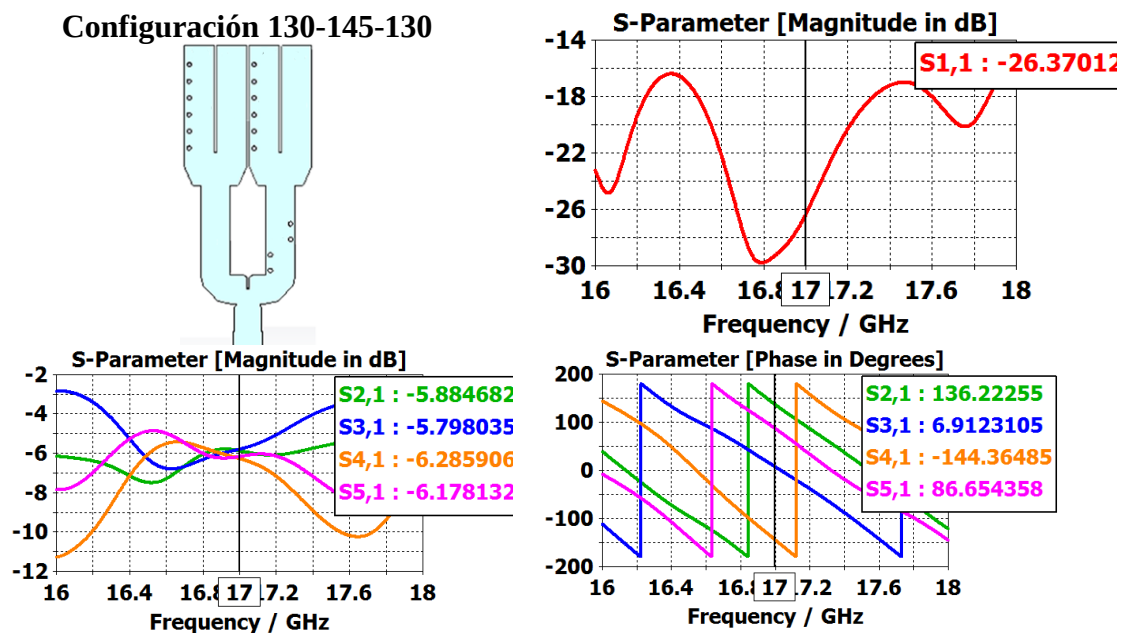


Figura 5- 59 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 130-145-130

Se consideran valores aceptables aquellos que están, igual que en el diseño de la red 1, por debajo de -15dB de adaptación. En la siguiente tabla se recogen valores de ancho de banda, reparto de potencia y desfases conseguidos siguiendo el criterio indicado para las configuraciones estudiadas. El reparto de potencia esperado es, igual que para la red 1, de -6dB a cada una de las puertas de salida, y el desfase conseguido es el desfase obtenido entre puertas contiguas.

Igual que en la red 1, se observan diferencias en las fases conseguidas respecto a la calculada teóricamente. Esta diferencia es más acusada en la última configuración, donde el desfase entre los elementos centrales varía de 145 a 208. Para el resto de configuraciones, sí se mantiene dentro de un rango de error máximo de 11 grados (elemento central de la configuración 40-45-40): El reparto de potencia en todos los casos es cercano a 6dB, aunque en algunas configuraciones este reparto de potencia es menos equitativo, ya sea porque la banda de adaptación es menor o por la inestabilidad de las fases conseguidas con la introducción de los tornillos de ajuste.

Tabla 4- 6 Resumen de resultados de la red 2

Configuración	Ancho de banda (GHz)	Reparto de potencia				Desfase conseguido
		S ₂₁ (dB)	S ₃₁ (dB)	S ₄₁ (dB)	S ₅₁ (dB)	
20-20-20	16.2-18	6	6.2	6.3	6.1	24.2-20.2-16.2
65-65-65	16.8-17.4	7.2	6.5	5.74	5.1	60.3-59.7-60.3
40-35-40	16.8-17.1	5.4	5.7	6.59	6.9	34.1-42-42
40-45-40	16.2-17.7	6.4	6	6.1	5.7	44.2-34-43.7
45-85-40	16-17.7	5.7	6.1	6.35	6	44.2-78.5-42.2
65-55-45	16.1-18	6.	6.2	6.2	5.8	67.1-64.1-44.1
85-85-45	16.8-17.7	5.8	5.7	6.7	6.3	84.5-44.2-86.2
85-90-85	16.8-17.5	5.5	5.7	6.6	6.5	85.1-86.4-85.3
130-100-130	16.9-17.8	6.5	6.4	5.8	5.7	129-103-130
130-145-130	16-17.8	5.9	5.8	6.3	6.2	129-208-129

5.4 ESTUDIO DE MODOS SUPERIORES

Tras caracterizar la red corporativa completa tanto en adaptación como en reparto de potencia y fase, se realizó un estudio de modos superiores para comprobar si la introducción de elementos dentro de la cavidad de la guía afectaba de alguna manera. Se ponen como ejemplo dos casos extremos: cuando no hay tornillos en la guía vs cuando hay muchos tornillos en la guía. Estas son las configuraciones 0-0-0 y 130-145-130.

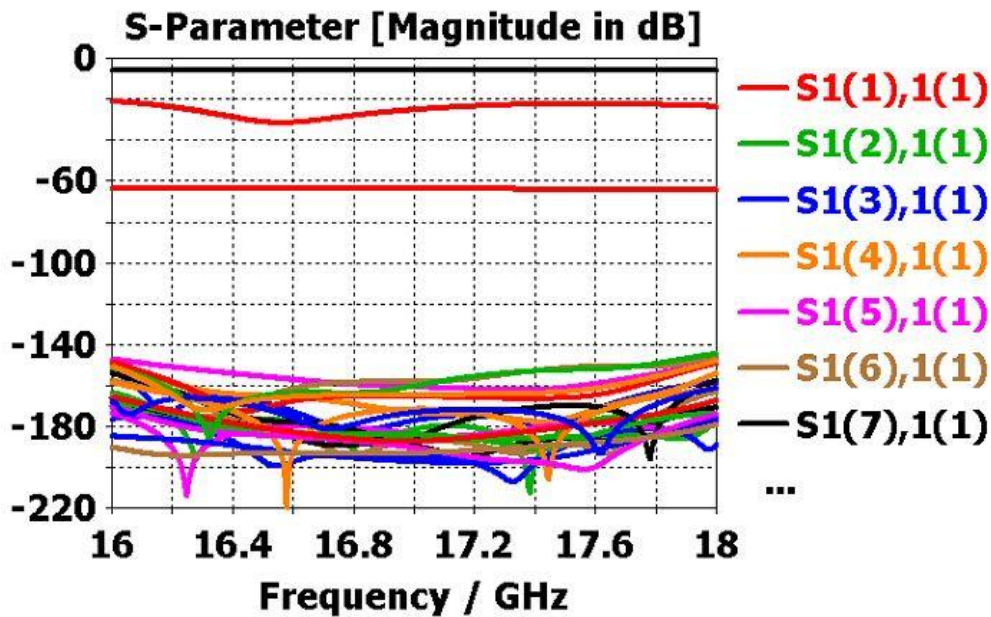


Figura 5- 60 Modos superiores de la red 2 en la configuración 0-0-0

En el caso de la configuración nominal o la de no desfase entre elementos, se puede observar que no hay modos superiores por encima de -60dB, por lo que la guía se comporta de la forma esperada.

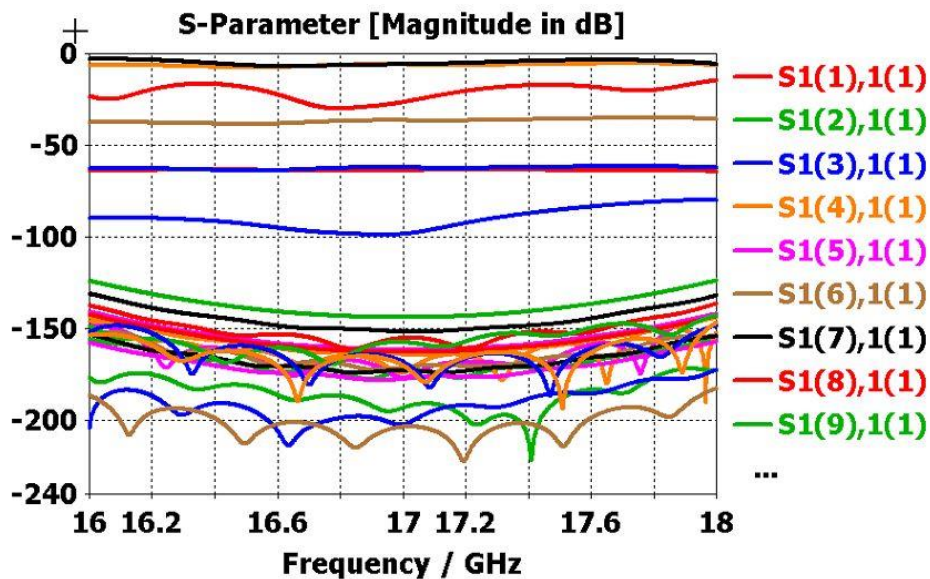


Figura 5- 61 Modos superiores de la red 2 en la configuración 130-145-130

Para la configuración de 130-145-130, se observa que el modo más próximo a los valores de adaptación del modo fundamental es el TE_{20} , que se encuentra a -35dB. Como es un valor muy por debajo de lo conseguido en la adaptación del modo fundamental también se considera que la guía funciona correctamente. Se puede consultar el Anexo J para ver el resultado de las demás configuraciones.

5.5 ELEMENTO RADIANTE: PARCHE+RANURA APILADA

Tal y como se comentó anteriormente, el elemento radiante utilizado fue diseñado por [2]. Este diseño consta de una ranura situada a la salida del divisor, junto con un parche circular para mejorar la directividad.

Debido a que cada elemento cuenta con su propio puerto de entrada, se pudo estudiar el acoplo mutuo presente entre elementos, siendo este la cantidad de señal que se envía de forma generalmente indeseada de un elemento a otro. El estudio que se realizó fue en referencia a la cantidad de señal acoplada entre un elemento y sus vecinos más próximos.

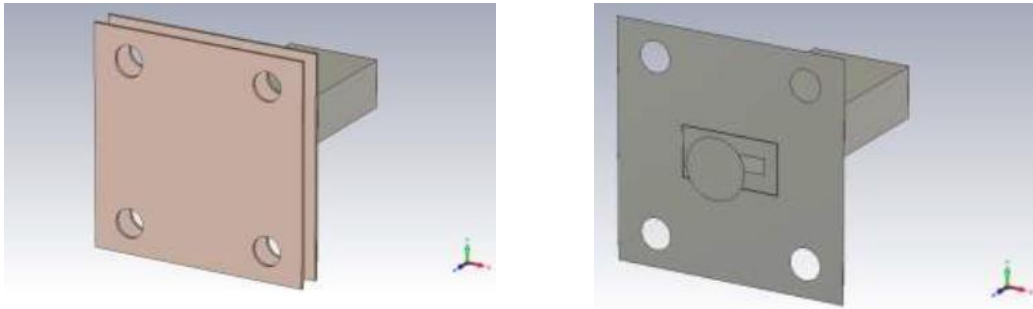


Figura 5- 62 Elemento radiante unitario, con sustratos (izquierda) y sin sustratos (derecha), extraído de [2].

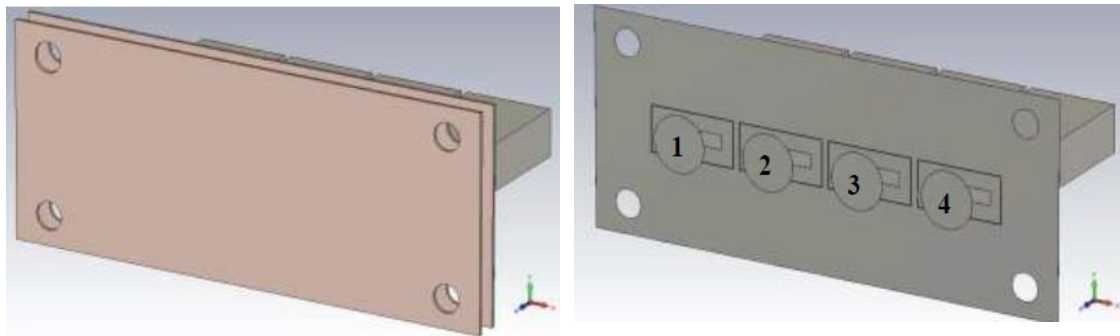


Figura 5- 63 Array de elementos radiantes, con sustratos (izquierda) y sin sustratos (derecha), extraídos de [2]

Tras comprobar los resultados, siendo el nivel de acoplamiento mutuo entre los elementos siempre menor a -25dB, lo que indica que apenas se transfiere señal entre ellos, se observó que existía buen aislamiento entre los elementos cercanos, se estudió el parámetro de reflexión pasiva y reflexión activa.

El parámetro de reflexión pasiva es aquel en el que se produce una reflexión a la entrada de cada uno de los elementos radiantes del array siempre que el resto de elementos, aunque estén presentes, no están alimentados. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la simple presencia de estos elementos modifica la impedancia del elemento.

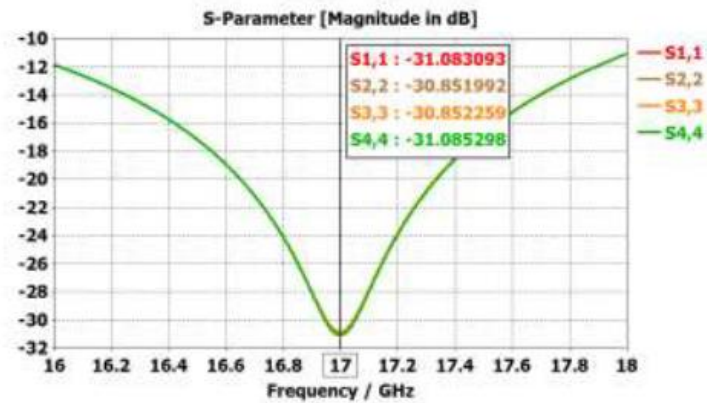


Figura 5- 64 Parámetro de reflexión pasiva del array, extraído de [2]

Por otra parte, el parámetro de reflexión activa es aquel que da información sobre la reflexión de cada uno de los elementos radiantes cuando están siendo excitados por sus puertos. Este parámetro de adaptación activa viene definido por la expresión (2.10).

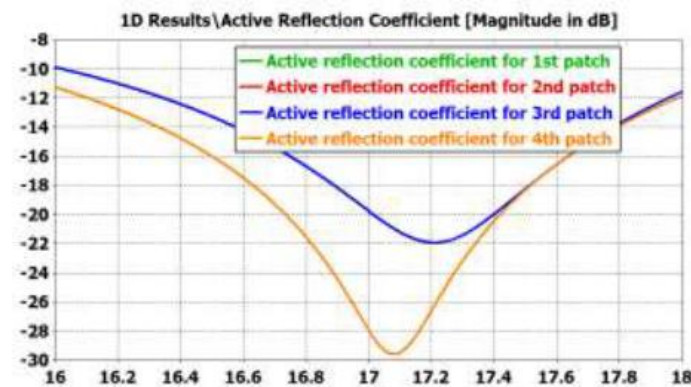


Figura 5- 65 Parámetro de reflexión activa del array, extraído de [2]

Se comprueba que la reflexión activa de los elementos centrales se desplaza ligeramente en banda, ya que sufren un mayor nivel de acoplo mutuo debido a su posición en el array, mientras que los elementos extremos no sufren un cambio apreciable. Aun así, la respuesta activa de cada uno de los elementos radiantes se puede considerar apta para su utilización en un array. Hay que recordar que las reflexiones activas han sido calculadas utilizando una alimentación uniforme en módulo y fase. Por lo tanto, es de esperar que la reflexión global de la antena se verá modificada en función de los niveles de desfase aportados por los tornillos de ajuste de la red.

Finalmente, se realizó una comprobación del diagrama de radiación estimado antes de implementarlo en la red. Para ello, se utilizó un puerto de excitación para cada elemento, produciendo el efecto de alimentación uniforme.

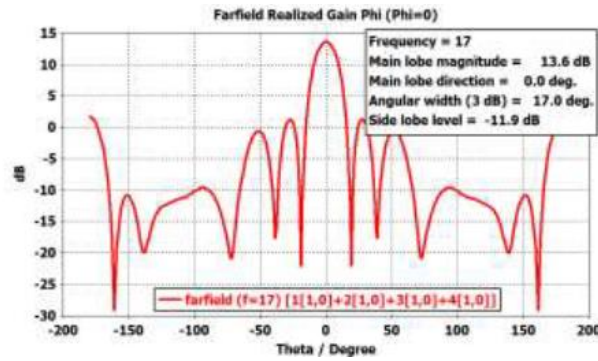


Figura 5- 66 Diagrama de radiación estimado, extraído de [2]

En el diagrama de radiación se puede observar que es de apuntamiento broadside o 0° , con un nivel de lóbulos secundarios de aproximadamente -15dB. Esto implica que la mayor cantidad de energía se concentra en el lóbulo principal, mientras que en el resto de lóbulos apenas se encuentra señal.

5.6 ANTENA FINAL

Con la red ya caracterizada y con las configuraciones de tornillos estudiadas en simulación a nivel de red, y la selección de los elementos radiantes, se procede a la implementación de la antena completa. La estructura simulada de la antena completa se puede apreciar en la **Error! Reference source not found.**, la Figura 5- 68 Detalle de las ranuras de los elementos radiantes y la Figura 5- 69.

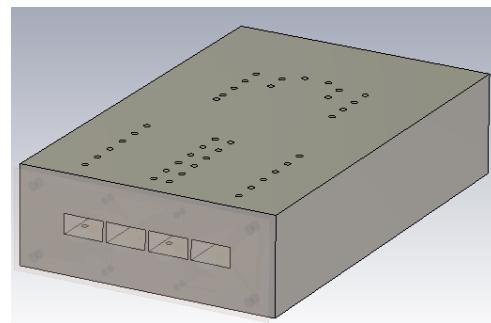
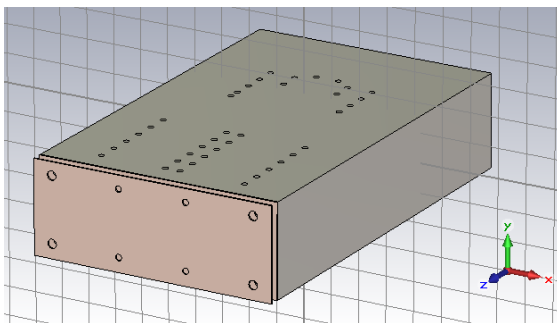


Figura 5- 67 Antena 2 completa (izquierda) y red 2 en guía de onda (derecha)

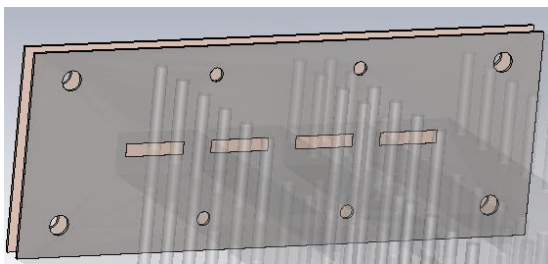


Figura 5- 68 Detalle de las ranuras de los elementos radiantes

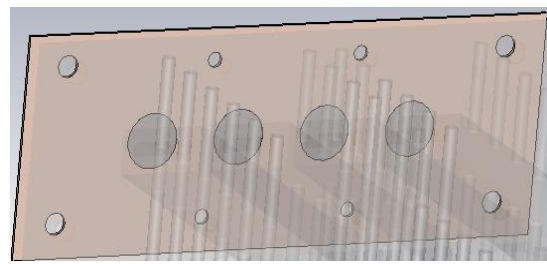


Figura 5- 69 Detalle de los parches apilados de los elementos radiantes

En este caso, la distancia entre elementos es de $0.8\lambda_0$, por lo que el efecto de *grating lobe* no aparece en la mayoría de configuraciones. Sin embargo, en aquellas donde se produce un desfase alto (configuraciones 130-100-130 y 130-145-130), debido a que el desfase entre elementos es muy grande. Por ello, al tener una distancia mayor a $0.5\lambda_0$, cuando se desajusta mucho implica que el lóbulo réplica vaya apareciendo poco a poco. Los

resultados gráficos de la antena completa en simulación se omiten de este capítulo, ya que se procederá a realizar una comparación entre simulación y medida de la antena construida en el capítulo 6.

En la Tabla 5- 3 se recogen los valores de apuntamiento conseguidos para cada una de las configuraciones estudiadas, así como un apuntamiento teórico o ideal esperado calculado mediante la fórmula del factor de array, usando una alimentación uniforme y el desfase deseado entre las puertas de salida. Como se puede apreciar, algunos apuntamientos son bastante cercanos entre sí, por lo que se ha optado por escoger aquel que presenta un mejor nivel de lóbulos secundarios, menor *grating lobe* y mejor adaptación en la banda. También se puede ver que los apuntamientos simulados para cada configuración son muy similares a los obtenidos de forma teórica.

Finalmente, las configuraciones útiles son las que aparecen remarcadas, donde sí se han conseguido los valores de desapuntamiento teóricos, a diferencia con la antena 1.

Tabla 5- 3 Comparativa de resultados de apuntamiento ideal vs real de la red 2

Configuración	Apuntamiento ideal (°)	Apuntamiento real simulado (°)
0-0-0	0	0
20-20-20	4	5
45-40-45	9	8
40-35-40	8	8
65-65-65	13	12
45-85-40	12	12.7
65-55-45	11	12
85-85-45	11	14
85-90-85	15	17
130-100-130	24	24
130-145-130	28	28

6. CONSTRUCCIÓN Y MEDIDA

En este capítulo se abarca la construcción y medida de la antena 2, ya que los resultados obtenidos en simulación de apuntamiento de array son muy cercanos a los calculados de forma teórica (ver 5.6). Se tomarán medidas experimentales de la respuesta de los parámetros S de la antena final utilizando un analizador de redes (Anexo G), así como los diagramas de radiación de la cámara anecoica de la EPS-UAM.

6.1 PROTOTIPO DE LA RED

El prototipo construido se puede ver en Figura 6- 1. Está dividido en la parte superior, la tapa, y la parte inferior o base. Los tornillos de sujeción son de métrica M3, es decir, tornillos roscados con diámetro 3mm. Los de fase, o de ajuste, son de métrica M2, también roscados y con diámetro M2.

En la tapa se ha realizado un rebajado para aliviar el peso de la estructura completa. Para sujetar los elementos radiantes diseñados en [2] se hacen uso de tornillos de nylon de métrica M3 y de métrica M2.

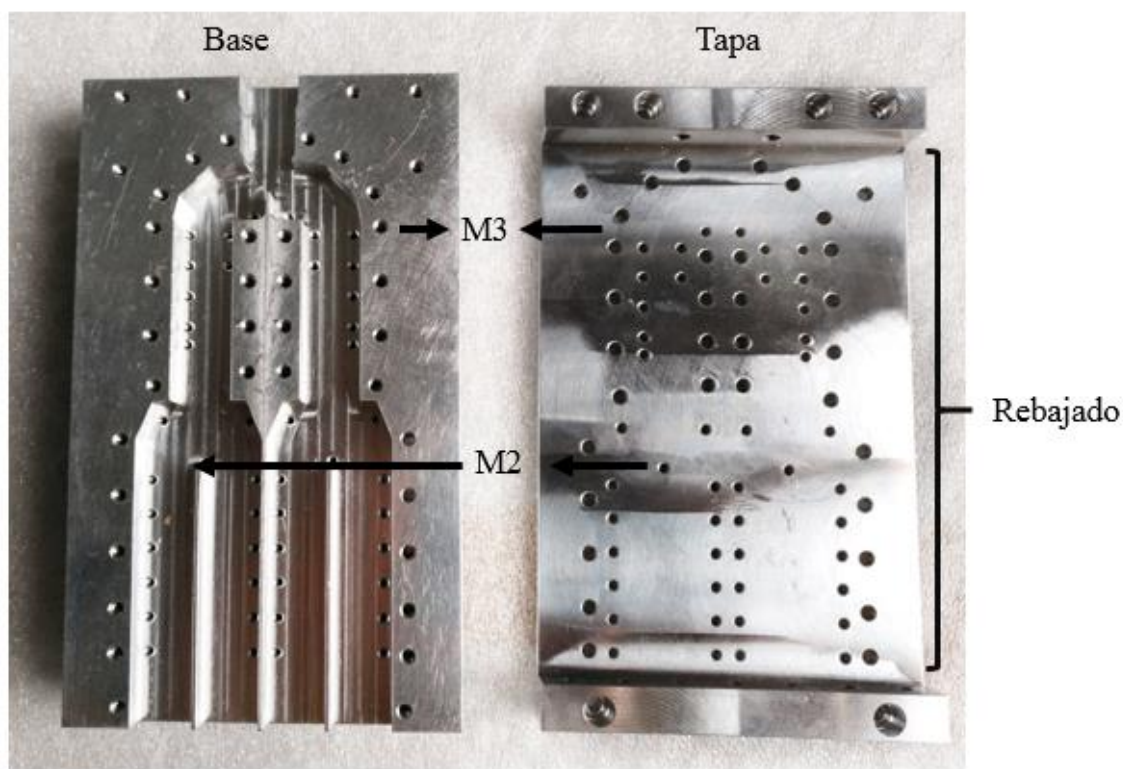


Figura 6- 1 Prototipo 1: red

En la entrada de la estructura se ha hecho el flange para la guía WR51, y a las salidas se han situado los tornillos de sujeción para situar tanto los elementos radiantes como el módulo de medidas de los conectores para medir la reflexión (ambos diseñados en [2]). Los planos del prototipo se encuentran en el Anexo C.

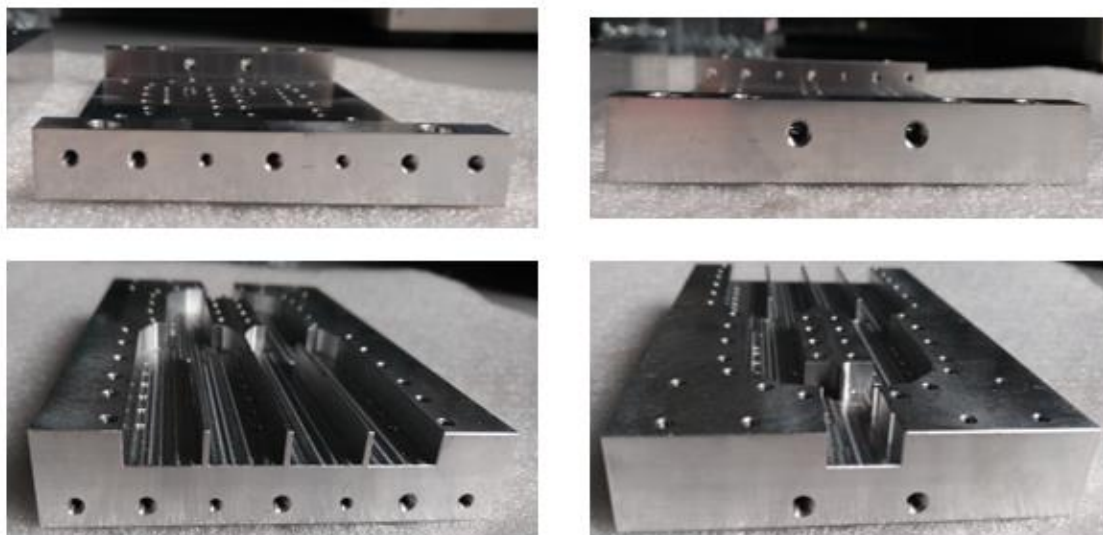


Figura 6- 2 A la izquierda, salida del divisor. A la derecha, entrada del divisor con flange WR51



Figura 6- 3 Elementos radiantes: parches, foam y ranuras, extraído de [2]

6.2 MEDIDA DE LA ANTENA

En este apartado se desarrolla la medida de la adaptación de la antena, haciendo uso del analizador de redes, y luego la medida de la antena dentro de la cámara anecoica para cada una de las configuraciones.

6.2.1 MEDIDA EN ADAPTACIÓN

Para medir la adaptación de la antena se sitúa una plancha de absorbente a cierta distancia delante de la antena. Se guarda la adaptación en formato .s1p. En este caso solo existe una medida para cada configuración.



Figura 6- 4 Medida de la antena 2 en adaptación

Observando las gráficas comparativas de reflexión tanto en simulación como en medida, se puede comprobar que el prototipo sí tiene la tendencia de la curva de adaptación conseguida en simulación, aunque se aprecian más resonancias o ruido en la medida. Esto puede ser debido a que no se situó de forma correcta el absorbente delante de la antena o a que los elementos radiantes no se colocaron de forma óptima, ya que son muy susceptibles de sufrir un doblamiento propiciado por los tornillos, o a que la sujeción podría no haber sido suficiente.

6.2.2 MEDIDA EN RADIACIÓN

Una vez medida la red se procede a medir la antena en la cámara anecoica. Para eso, se diseña una estructura de sujeción donde se sitúen tornillos para unir el prototipo a la base de la cámara. La antena debe estar apuntando a 0° , ya que es su configuración por defecto. Con el software de medida de la cámara se realiza un barrido de diagrama de radiación en distintas frecuencias (de 15-19GHz). En el Anexo D se pueden observar las gráficas donde se comparan todos los diagramas conseguidos para cada frecuencia en medida vs el diagrama simulado.

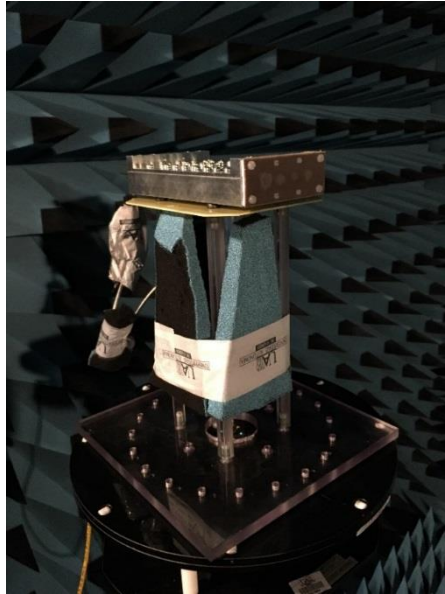


Figura 6- 5 Medida en radiación de la antena 2

Tras analizar estos resultados, se comprueba que los diagramas que más se asemejan al simulado son los de 16.5GHz y 17GHz, por lo que se decide realizar una comparación más precisa de ambos diagramas medidos.

6.2.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se muestran los resultados experimentales obtenidos tanto en simulación como de medida (adaptación y radiación para una de las frecuencias seleccionadas). Las observaciones extraídas para una de las configuraciones seleccionadas se encuentran después de las gráficas obtenidas mostradas a continuación.

Configuración 0-0-0

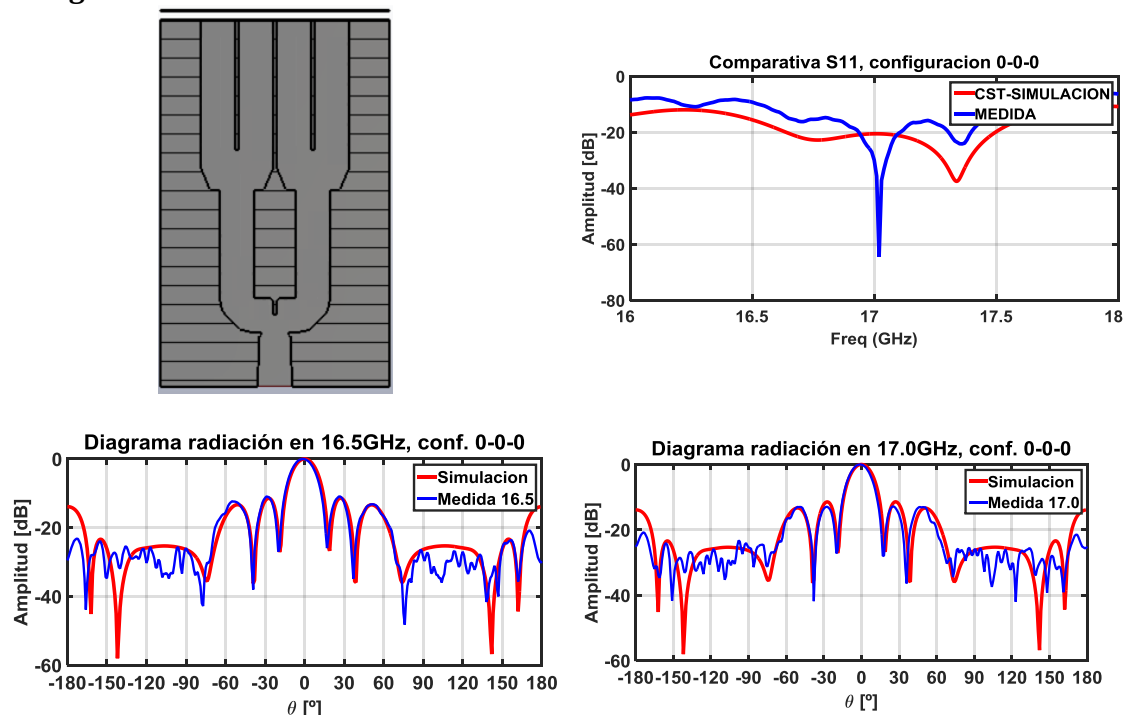


Figura 6- 6 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 0-0-0

Configuración 20-20-20

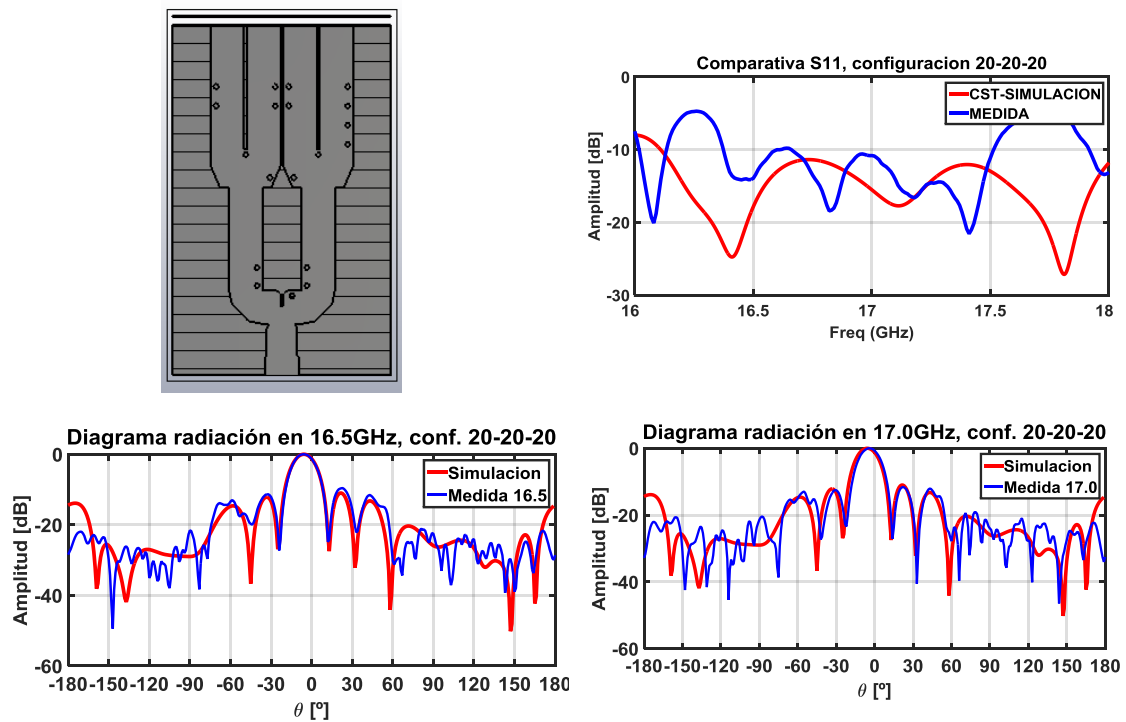


Figura 6- 7 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 20-20-20

Configuración 45-40-45

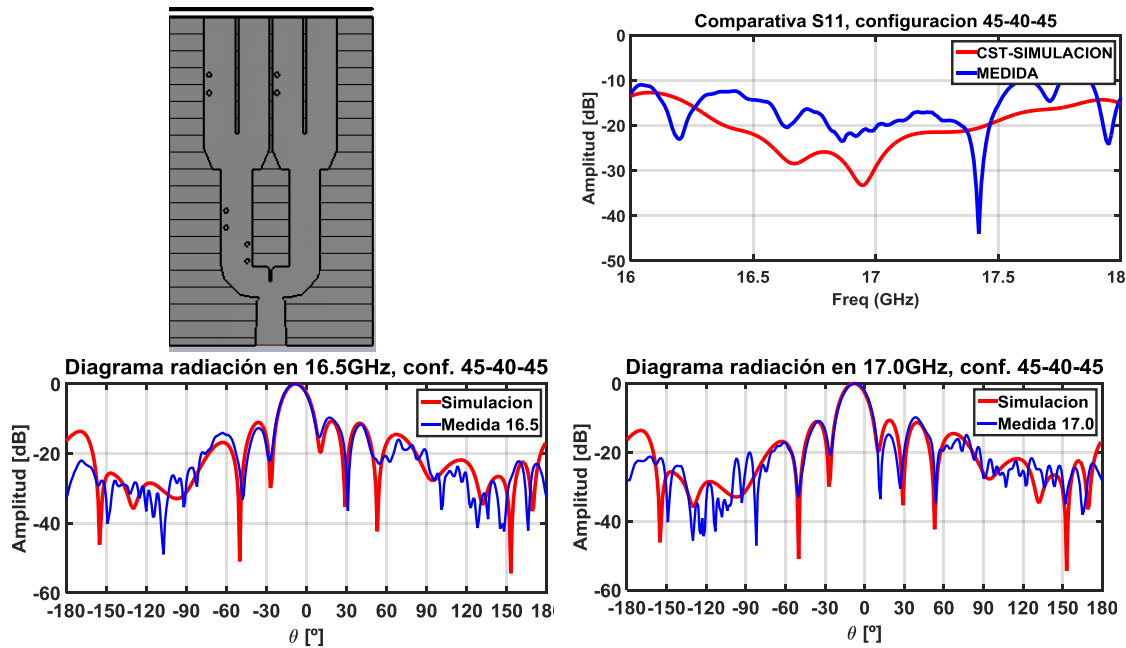


Figura 6- 8 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 45-40-45

Configuración 65-55-45

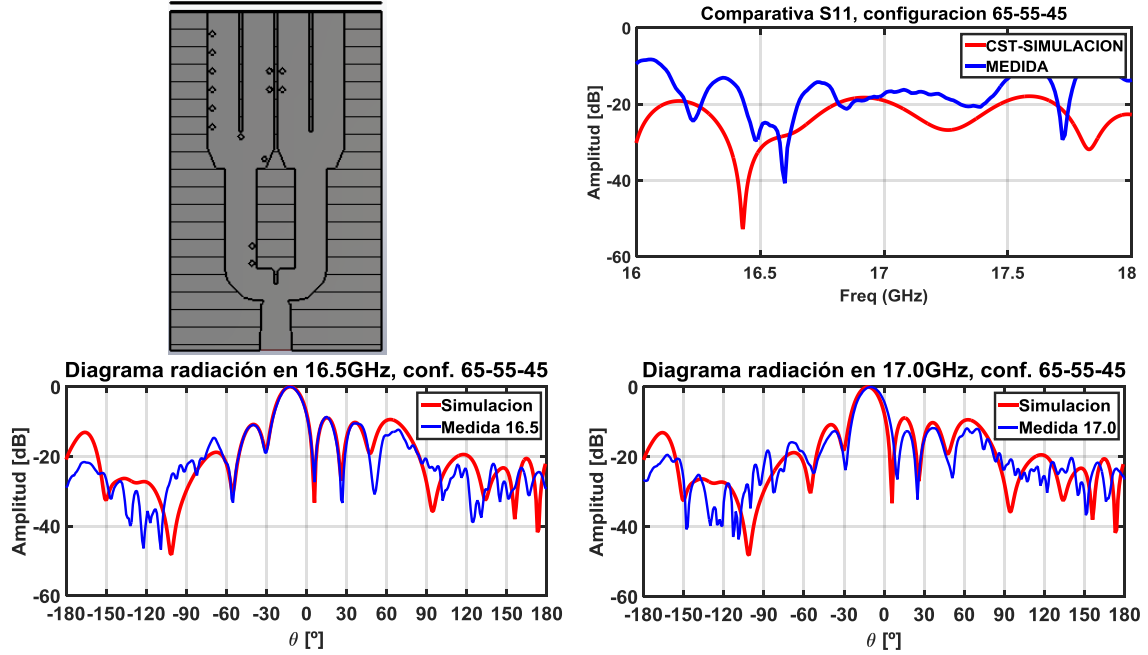


Figura 6- 9 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 65-55-45

Configuración 85-85-45

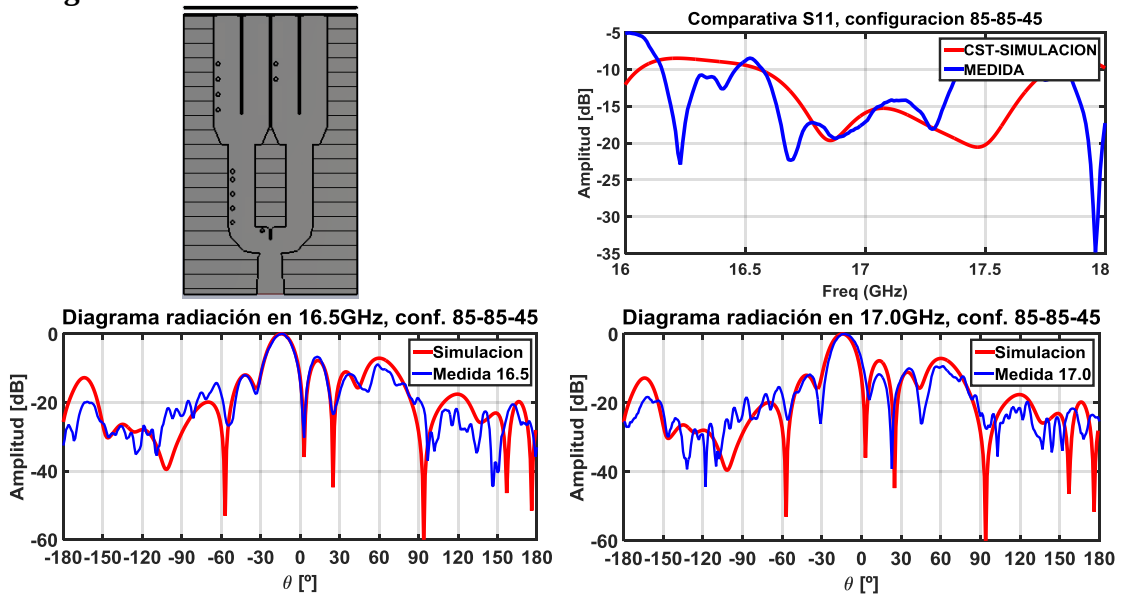


Figura 6- 10 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 85-85-45

Configuración 85-90-85

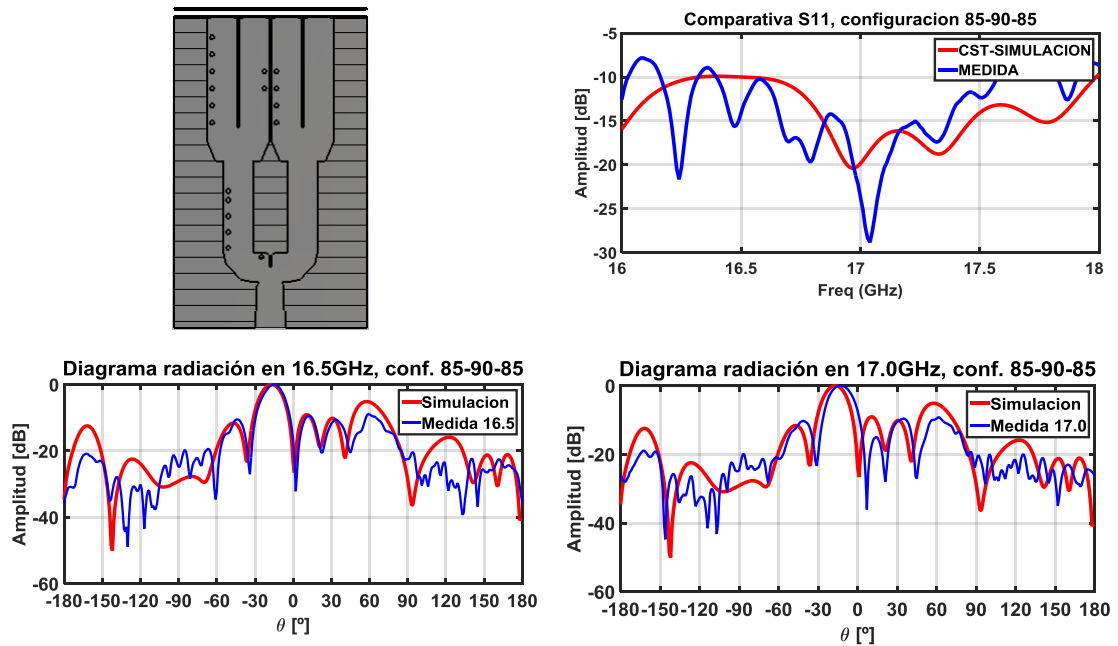


Figura 6- 11 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 85-90-85

Configuración 130-100-130

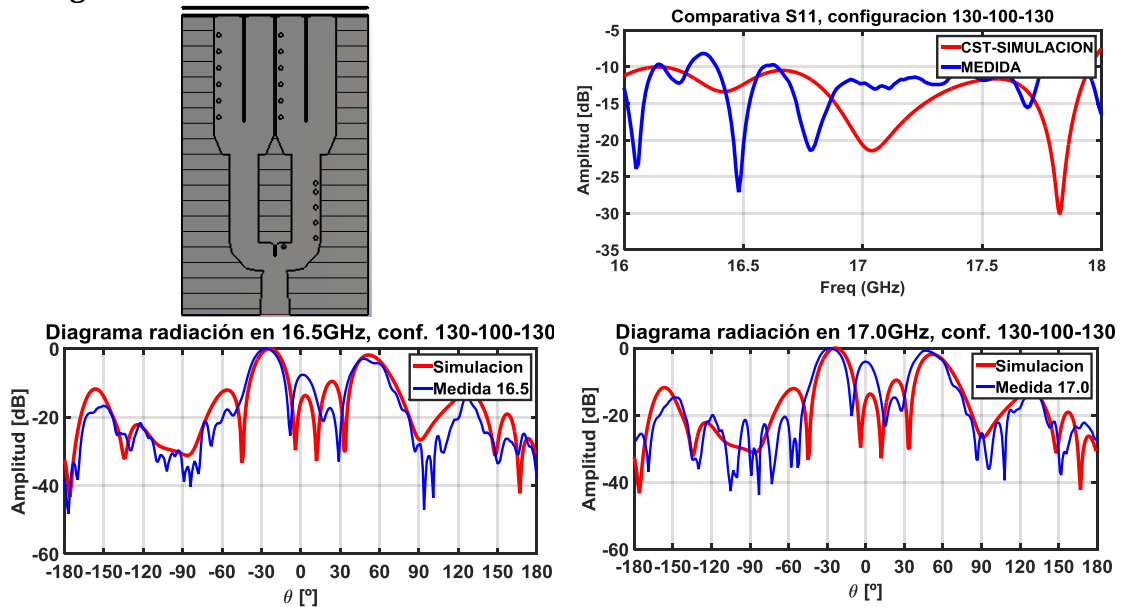


Figura 6- 12 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 130-100-130

Configuración 130-145-130

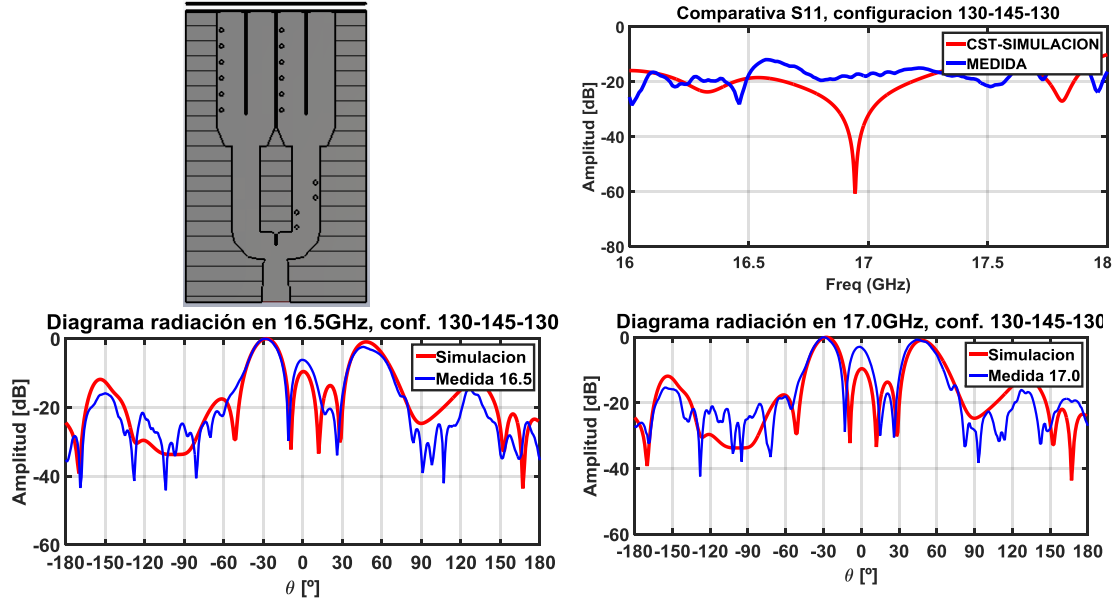


Figura 6- 13 Comparativa simulación vs medida de adaptación y radiación para la configuración 130-145-130

Sorprendentemente, la antena construida responde de una forma más similar a la simulada a una frecuencia de 16.5GHz en vez de a la frecuencia central de diseño. Esta diferencia puede ser debida al uso de los tornillos, que produzcan un desplazamiento en banda o a que la red no fue debidamente caracterizada en simulación, ya que no se llegó a simular el tornillo físico dentro de la estructura, sino su hueco.

Otro posible motivo puede ser derivado de pequeños errores de fabricación, ya sea de los elementos radiantes, de la red en guía de onda o del posicionamiento de los tornillos dentro de la misma.

Según se va aumentando el desfase, se aprecia mejor que el diagrama de radiación a 16.5GHz se asemeja más al simulado, e incluso cuando hay mayor número de tornillos introducidos (desfases más altos) se puede comprobar que simulación y medida a dicha frecuencia responden de igual manera. Por lo tanto, se considera que la inserción de los tornillos de ajuste produce un pequeño desplazamiento en banda de la respuesta esperada, siendo el caso más acuciante cuando se inserta un mayor número de tornillos en la estructura. Entonces se sufre un desplazamiento máximo desde los 17 GHz a los 16.5 GHz. Aun con todo ello y a pesar de que futuros diseños con esta tecnología deberán diseñarse con mayor precisión y control, se considera que los resultados son muy satisfactorios y que el objetivo de este TFM, el desapuntamiento del diagrama de radiación mediante tornillos de ajuste, ha sido perfectamente conseguido.

Se realizó igualmente un estudio de directividad, ganancia y eficiencia en ambas frecuencias centrales (17GHz y 16.5GHz).

Si se observan las gráficas comparativas, en ambos casos, tanto ganancia como directividad simuladas son prácticamente idénticas entre sí. Esto demuestra que el uso íntegro de la tecnología en guía de onda rellena de aire permite obtener una estructura radiante con muy pocas pérdidas (debidas, principalmente, al aluminio utilizado para fabricar la estructura). Esto también se traduce en la elevada eficiencia de radiación obtenida (calculada como la relación entre la ganancia simulada y la directividad simulada) que supera el 95% para todas las configuraciones. Así, esto también demuestra que los tornillos de ajuste propuestos en este trabajo suponen un mecanismo que reconfigurabilidad para la antena que proporciona un nivel de pérdidas prácticamente

nulo. Si se mira la ganancia medida, en el caso de 17GHz se produce una variación de aproximadamente 2dB y no se mantiene la forma de los valores obtenidos en simulación. Observando la ganancia medida se puede apreciar que mantiene la forma aunque cae aproximadamente 1dB.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la eficiencia. Si se estudia la eficiencia en la frecuencia central de 16.5GHz se mantiene para las configuraciones entre el 80% y el 95%, mientras que a 17GHz esta eficiencia decae, obteniéndose valores de la misma en torno al 70%.

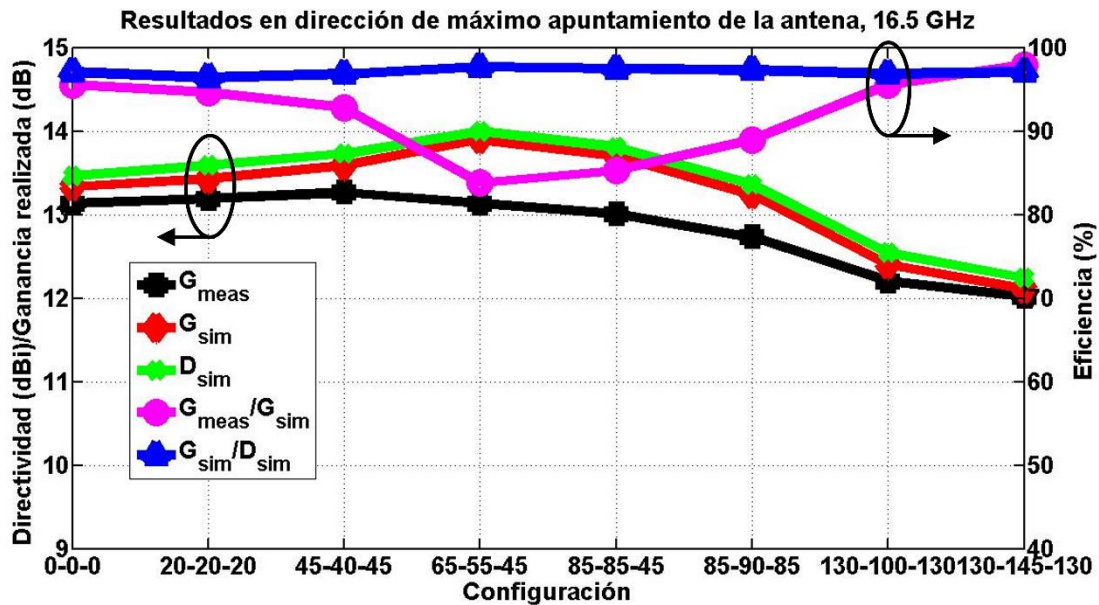


Figura 6- 14 Resultados en dirección de máximo apuntamiento de la antenna para 16.5GHz

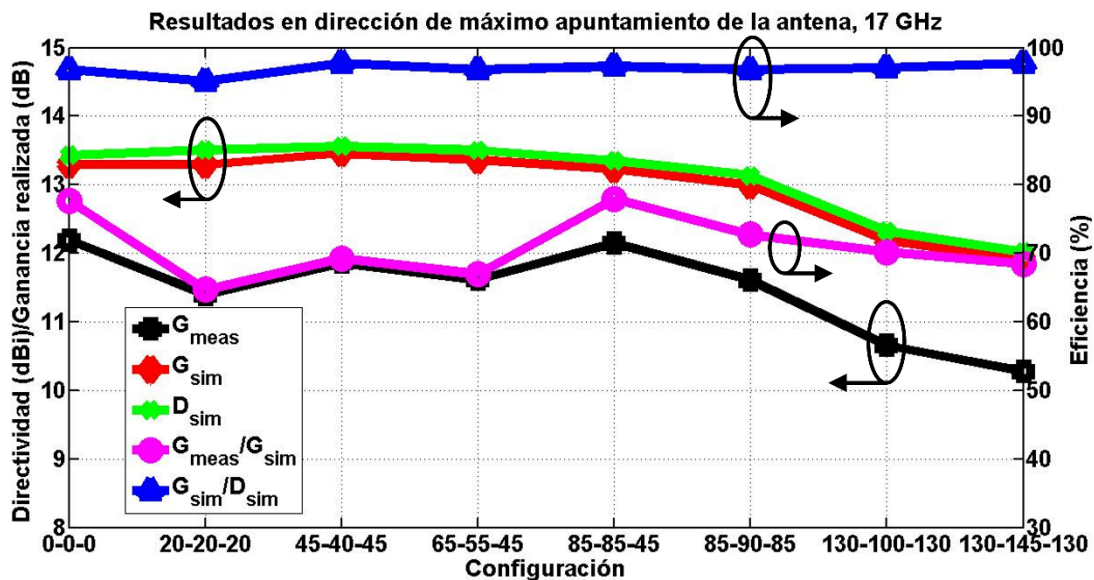


Figura 6- 15 Resultados en dirección de máximo apuntamiento de la antenna para 17 GHz

Con el fin de intentar caracterizar la antenna final y predecir su comportamiento, se realizó el cálculo de factor de array con los parámetros de reflexión medidos en cada puerto con el analizador de redes (ver Anexo E), se aprecia que el diagrama teórico, aunque trata de mantener el comportamiento no mantiene el apuntamiento, e incluso se degrada a desfases

altos de tal manera que no se puede considerar que la antena radie. Esto es debido, tal y como se explicó en el apartado anterior, a que dicha medida no es totalmente fiable por la calibración.

Pese al desplazamiento en banda obtenido en medida, se han conseguido realizar varios apuntamientos que están adaptados y con un reparto de potencia igualitario o muy similar entre las salidas de la red.

Hay que tener en cuenta que los desapuntamientos obtenidos van en dos direcciones, esto es, cambiando el apuntamiento de theta negativos a theta positivos, por lo que se obtienen desapuntamientos entre -28° y 28° .

En la Figura 6- 16 se puede observar el apuntamiento positivo y negativo de la misma configuración, en este caso la de 85-90-85, donde el apuntamiento conseguido tiene un valor nominal de 15° .

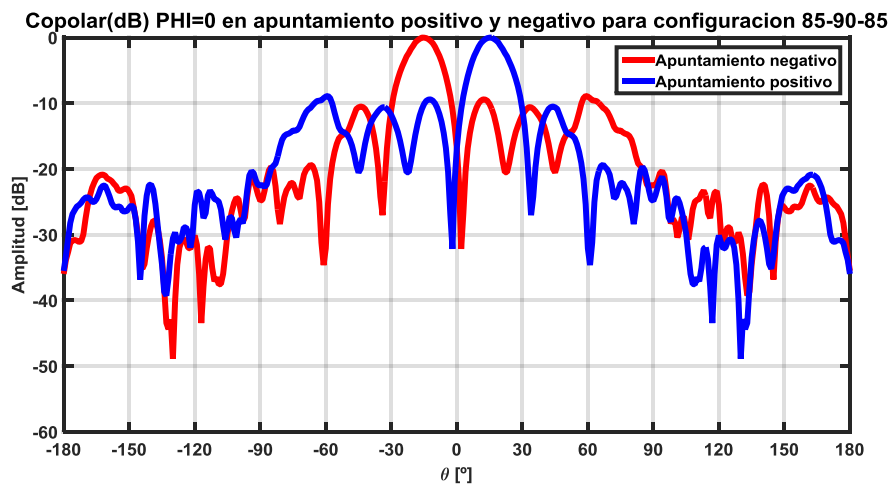


Figura 6- 16 Ejemplo de apuntamiento positivo y negativo para una configuración

Por último, en la Figura 6- 17 se muestran los valores de todos los apuntamientos, tanto positivos como negativos, para las configuraciones, donde cada una corresponde a un color que presenta su par de apuntamientos (positivo y negativo).

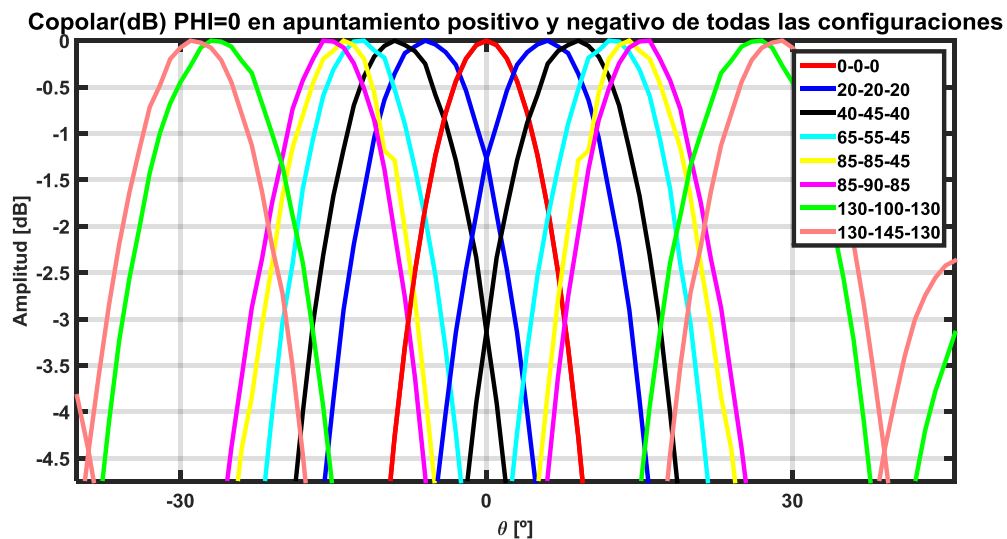


Figura 6- 17 Apuntamientos positivos y negativos de todas las configuraciones

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7.1 CONCLUSIONES

En este Trabajo de Fin de Máster se ha realizado un estudio de las prestaciones que supone la utilización de elementos de ajuste, en este caso tornillos, en una red de alimentación basada en guía de onda, realizando mínimas modificaciones de la misma (longitud de los brazos).

En este proyecto se han realizado dos diseños, uno basado en una red de alimentación donde se consiguió acercar los elementos hasta $3\lambda_0$, y otro en el cual las salidas de la red están a $0.8\lambda_0$. Se ha ido desarrollando el proceso completo de diseño, desde la caracterización de la red con la búsqueda de desfases mediante la introducción de tornillos en los divisores 1-2, la integración de los divisores de 1-2 para formar un divisor de una entrada y cuatro salidas, la búsqueda de la optimización en la respuesta en adaptación del divisor completo mediante una transición y la integración de la antena completa.

En el caso de la primera red, se diseñó como elemento radiante una bocina piramidal óptima, que consiguió solucionar el problema de los *grating lobes*, pero que, debido a la distancia aún existente entre los elementos, no respondía con los apuntamientos deseados.

En el caso de la segunda red, se realizó un estudio completo buscando los desfases conseguidos en el primer diseño. Debido a la diferencia de la geometría no fue posible conseguir dichos desfases, aunque se encontraron otros igualmente satisfactorios. Tras estudiar en simulación la antena completa con los elementos radiantes diseñados en [2], se procedió a la construcción y medida del prototipo.

Se realizó una comparativa entre simulaciones y medidas, tanto a nivel de red como a nivel de radiación. Esta comparativa dio lugar a un interesante descubrimiento: el hecho de introducir tornillos produce, presuntamente, un desplazamiento en banda de 500MHz, centrando la frecuencia de funcionamiento a 16.5GHz en vez de a 17GHz, que es a la que estaba diseñada la red. Pese a este desplazamiento en banda, se ha conseguido diseñar una antena reconfigurable mediante tornillos de ajuste casi sin pérdidas (pese a la introducción de elementos externos dentro de la estructura) que proporciona desapuntamientos entre -28° y 28° en el plano de visión de la antena mediante el uso de 8 configuraciones diferentes, manteniendo una eficiencia entre el 85% y el 95% en un ancho de banda general entre 16.5 y 17.5 GHz.

7.2 TRABAJO FUTURO

Como línea inicial de trabajo futuro se propone estudiar el desplazamiento en frecuencia del prototipo medido respecto a la frecuencia de diseño. Es necesario acotar este efecto y saber si se produce por la introducción de tornillos de forma física, que puede provocar diferencias debido a que no entra de forma completamente perpendicular, o porque no se ha realizado una simulación rigurosa que se asemeje más a la realidad.

La siguiente línea de investigación sería integrar un divisor 1-8 para aumentar el rango de desapuntamiento conseguible en diagrama de radiación. Este divisor es posible construirlo haciendo uso de los divisores 1-4 de la segunda red y el divisor de segundo

nivel del primer nivel, que tiene la distancia exacta entre los brazos superiores para que se puedan situar dos divisores 1-4 del segundo prototipo.

Otra línea de investigación futura sería implementar los tornillos sobre una red de plano E como la diseñada en [2] para que los elementos radiantes estén más cerca y así eliminar completamente el efecto del *grating lobe* en las configuraciones de mayor desfase y además, aumentar el rango de desapuntamiento de la antena.

REFERENCIAS [6]

- [1] G. F. Romero, Diseño de redes de alimentación en guía de onda corporativa con tornillos de ajuste, Madrid, España, 2016.
- [2] A. T. M. Barrado, Diseño de agrupaciones de antenas alimentadas con redes corporativas en tecnología de guía de onda., Madrid, España., 2015.
- [3] R. V. Medina, Diseño de antenas de parches sobre guía rectangular y tornillos de sintonía, Madrid, España, 2015.
- [4] M. P. d. l. H. Gómez, Diseño de antenas sobre guía de onda ranurada con control de alimentación mediante tornillos de sintonía laterales, Madrid, España, 2015.
- [5] J. H. Ortega, Diseño de antenas sobre guía onda con control de alimentación mediante tornillos de sintonía, Madrid, España., 2015.
- [6] Pablo Sánchez Olivares, José Luis Masa Campos, Novel Four Cross Slot Radiator With Tuning Vias for Circularly Polarized SIW Linear Array,, Antennas and Propagation, IEEE Transactions on , vol.62, no.4, pp.2271-2275, Abril 2014.
- [7] J. L. M. C. Pablo Sánchez Olivares, Novel Four Cross Slot Radiator With Tuning Vias for Circularly Polarized SIW Linear Array, Antennas and Propagation, IEEE Transactions on , vol.62, no.4, pp.2271-2275, Abril 2014.
- [8] Eduardo García Marín, Jose Luis Masa Campos, Pablo Sánchez Olivares, $\times 2$ stacked patch array with corporate SIW feeding network, in Antennas and Propagation (EuCAP), 2015 9th European Conference on , vol., no., pp.1-4, 13-17, Abril 2015.
- [9] D. Pozar, Microwave Engineering, 4th edition. John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [10] C. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, John Wiley & Sons Inc, 1997.
- [11] E. R. Brown, RF-MEMS switches for reconfigurable integrated circuits, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, no. 11, pp. 1868-1880,, 1998.
- [12] S. Karamzadeh, V. Rafii, M. Kartal and B.S. Virdee, Modified circularly polarised beam steering array antenna by utilised broadband coupler and 4×4 butler matrix, IET Microwaves, Antennas Propag., vol. 9, no. 9, pp. 975-981, 2015.
- [13] D. García Valverde, José Luis Masa Campos, Pablo Sánchez Olivares, Bazil Taha Ahmed, Juan Córcoles, Linear Patch Array Over Substrate Integrated Waveguide for Ku-Band, Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE , vol.12, no., pp.257,260, 2013, 2013.
- [14] P. Padilla, J. M. Fernández-González, A. Muñoz-Acevedo, J. L. Padilla and M. Sierra-Castañer, lectronically tunable phase response for phased array patches, Electronics Letters, vol. 46, no. 18, pp. 1248-1249, 2010.
- [15] Lim Ka Sing, Koo Voon Chet, J. N. Djuanda and Lim Tien Sze, Analysis of slotted waveguide structure using MoM techniques, Telecommunication Technology, 2003. NCTT 2003 Proceedings. 4th National Conference on, pp. 40-44, 2003.

Anexo A. Comparativa del factor de array ideal y real para el diseño de la red 1

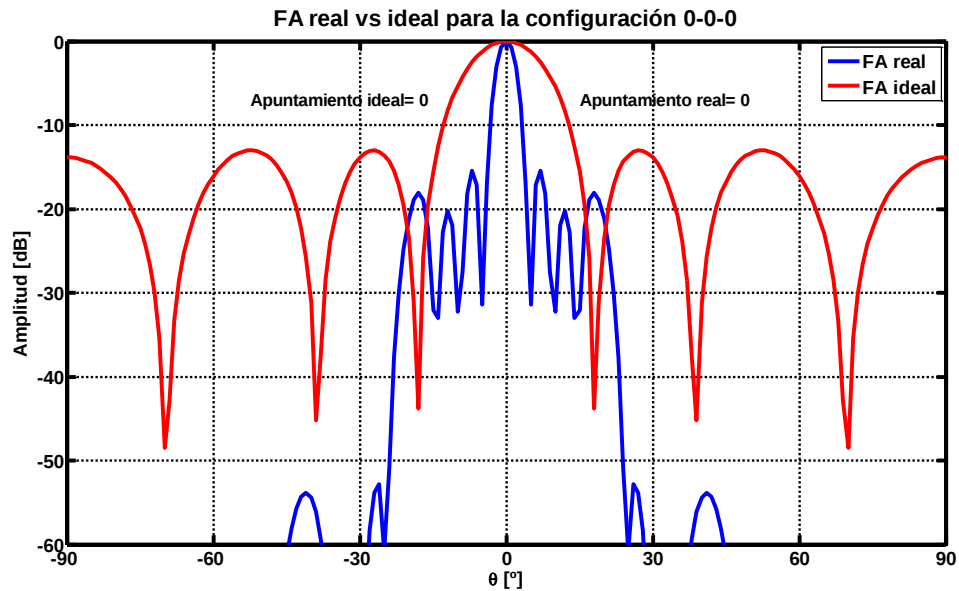


Figura A- 1Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 0-0-0

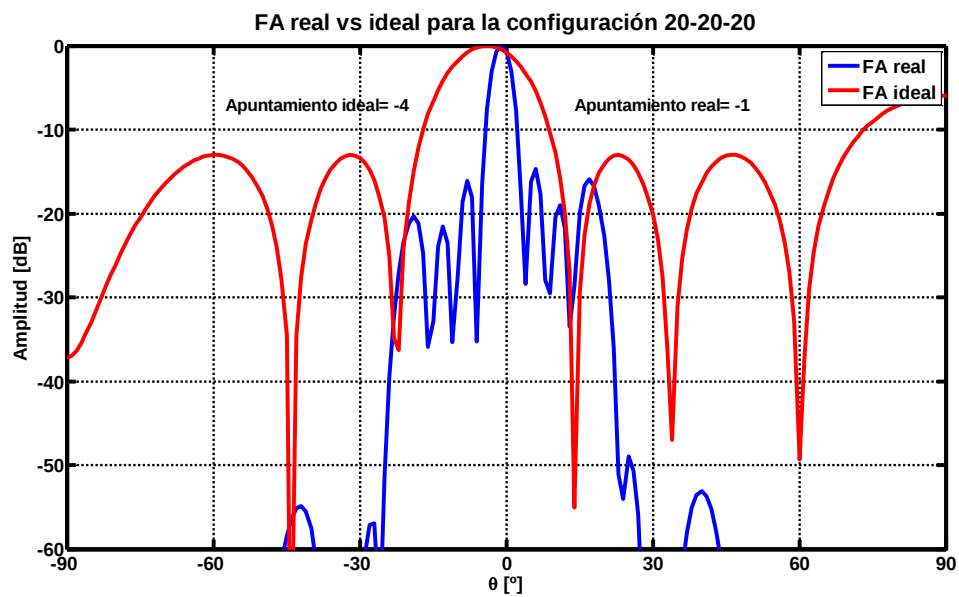


Figura A- 2Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 20-20-20

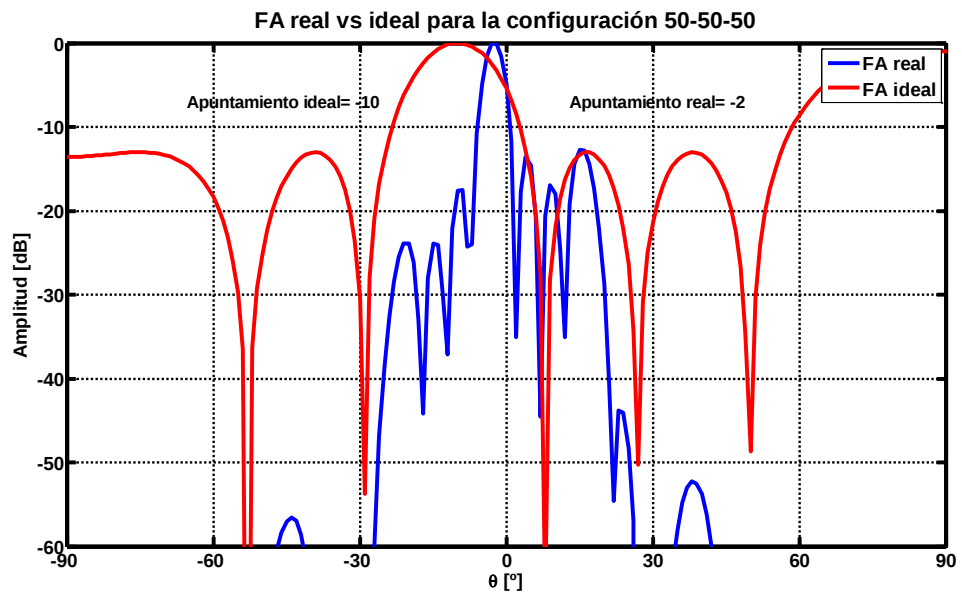


Figura A- 3Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 50-50-50

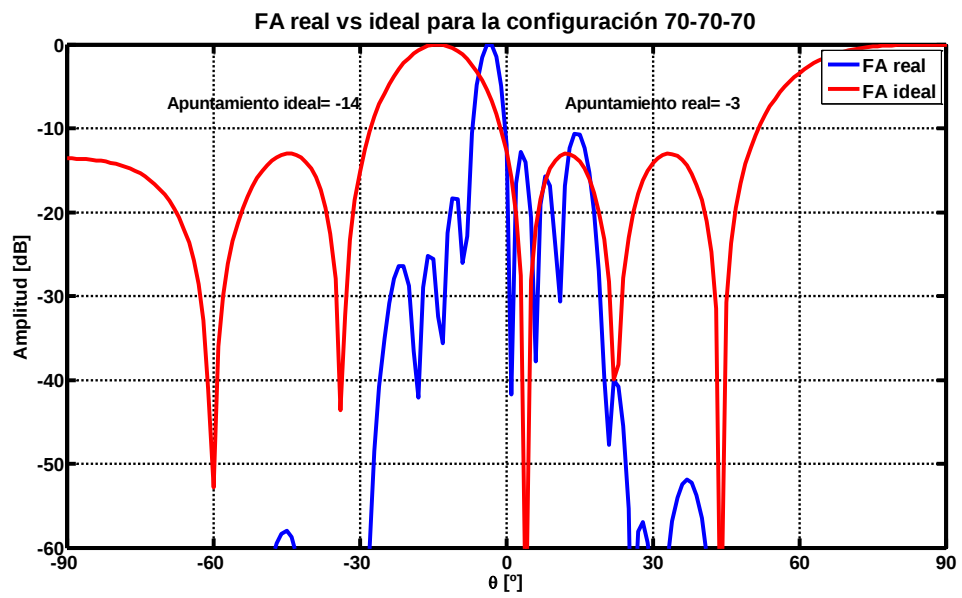


Figura A- 4Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 70-70-70

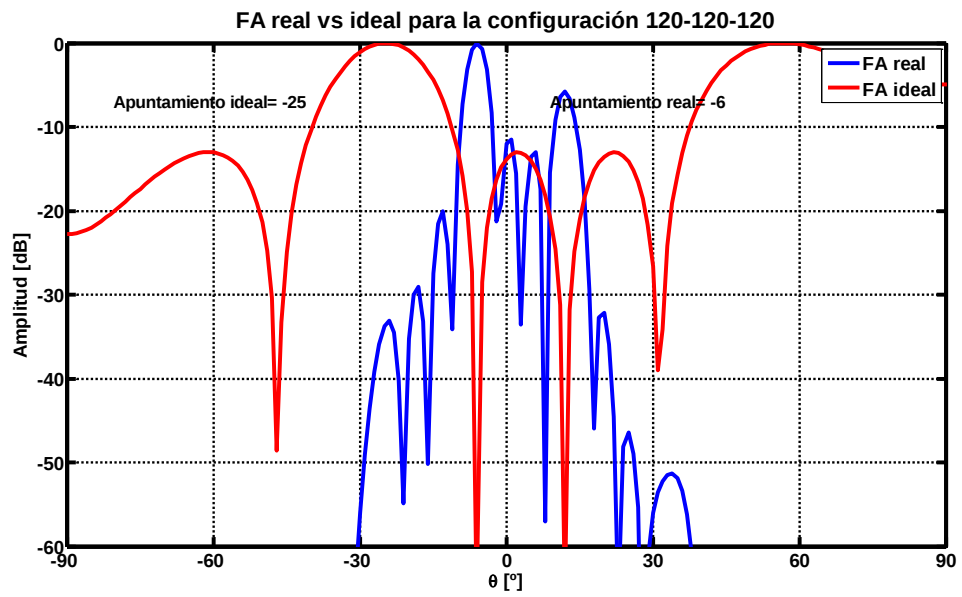


Figura A- 5Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 120-120-120

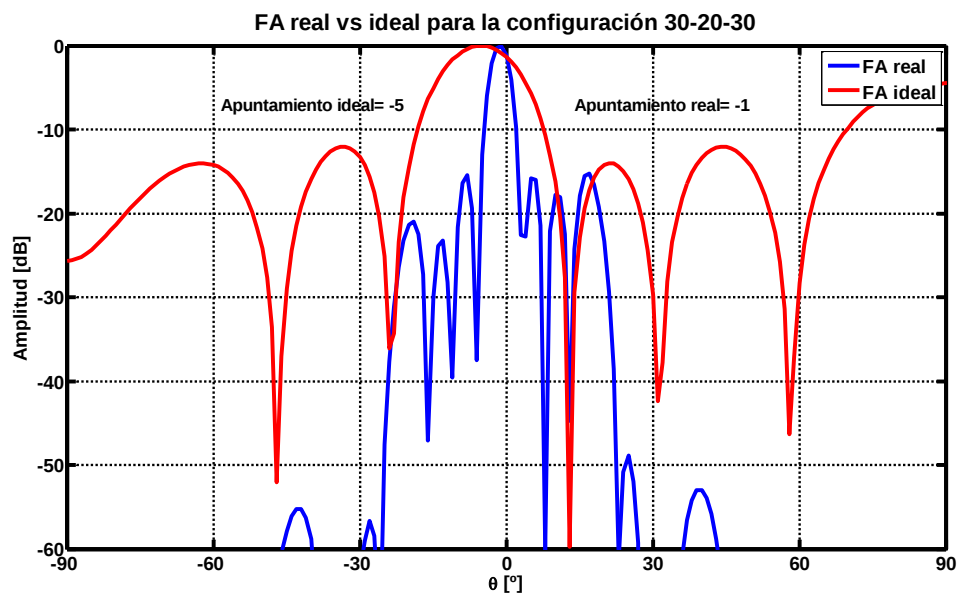


Figura A- 6Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 30-20-30

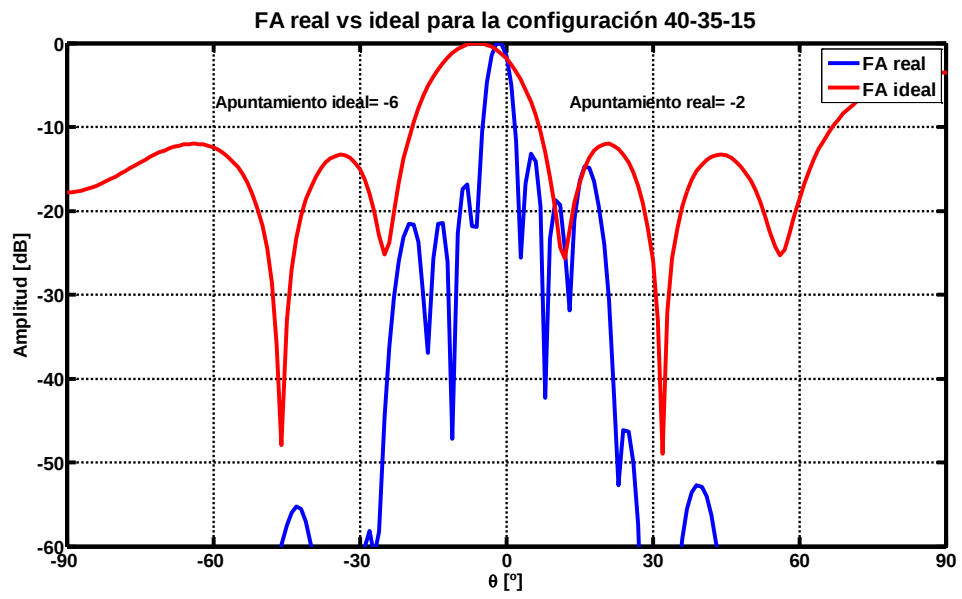


Figura A- 7 Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 40-35-15

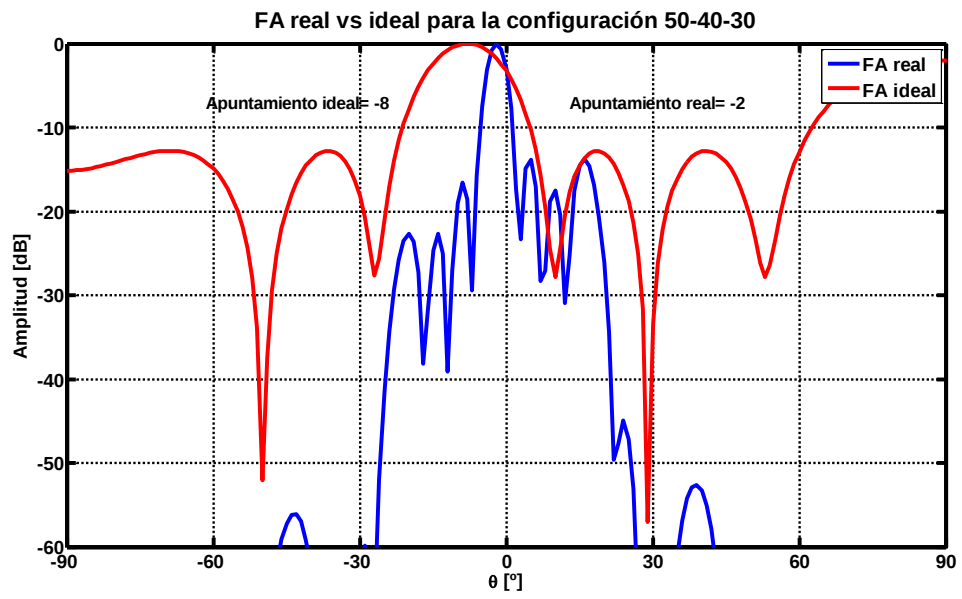


Figura A- 8 Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 50-40-30

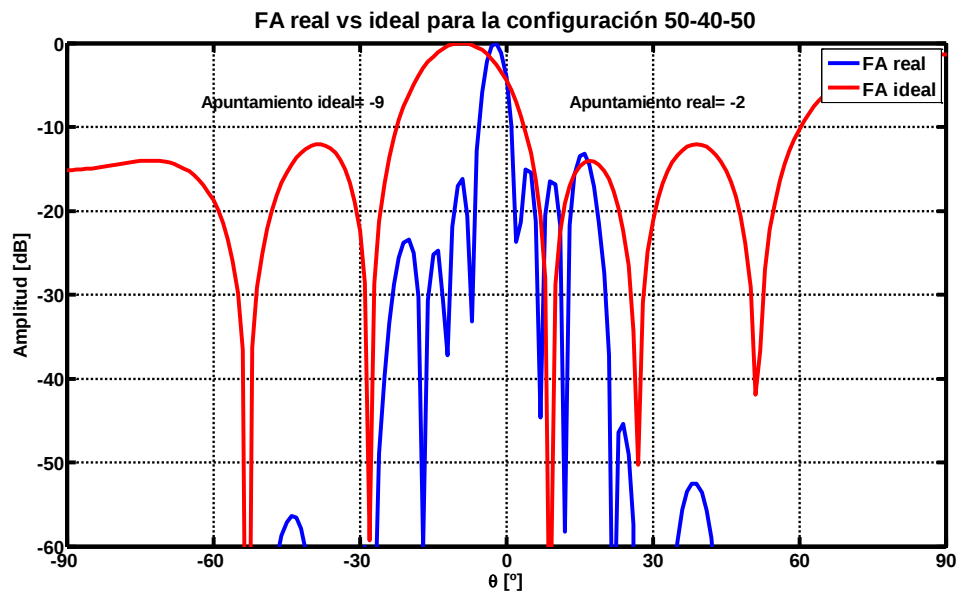


Figura A- 9Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 50-40-50

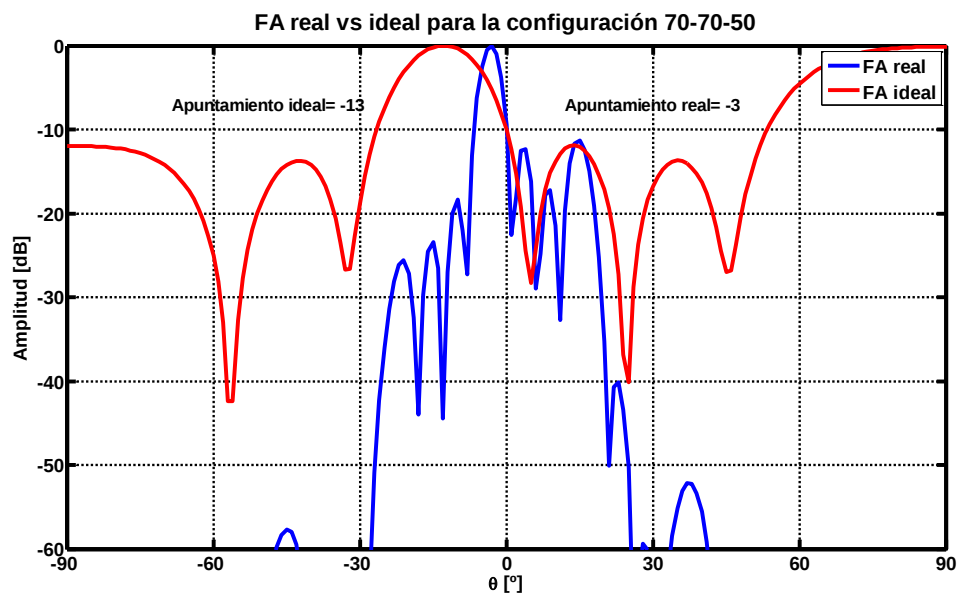


Figura A- 10Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 70-70-50

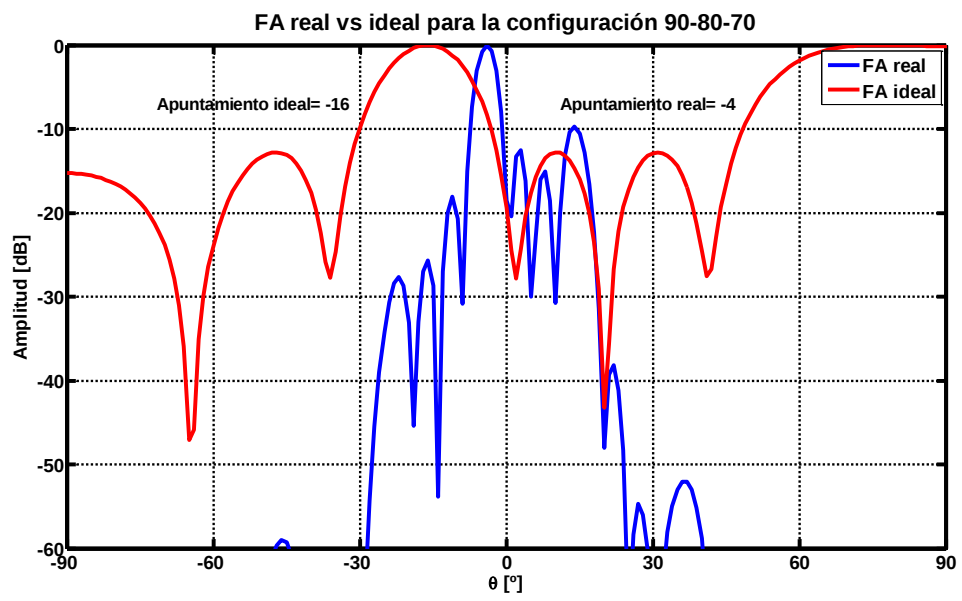


Figura A- 11Comparativa de FA real vs ideal de la red 1 para la configuración 90-80-70

Anexo B. Diagramas de radiación para el diseño de la red corporativa 2 con ranura y parche como elemento radiante

Configuración 0-0-0

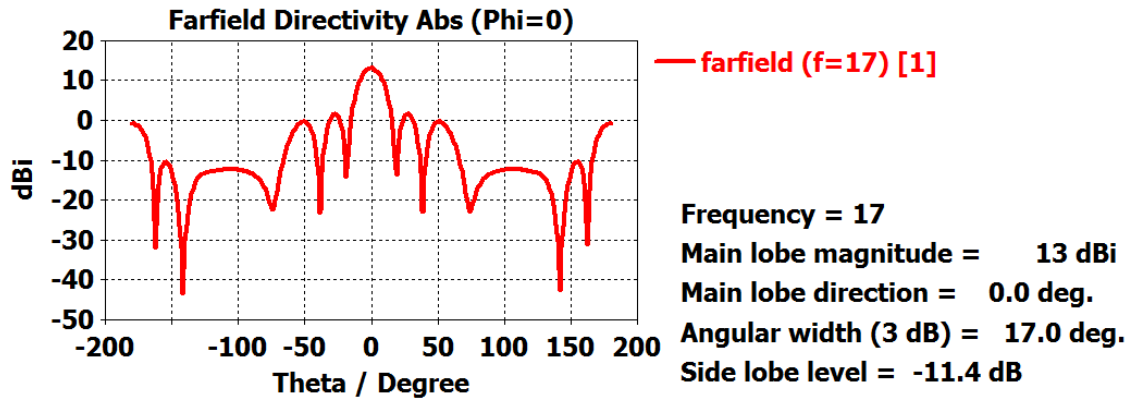


Figura B- 1 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 0-0-0

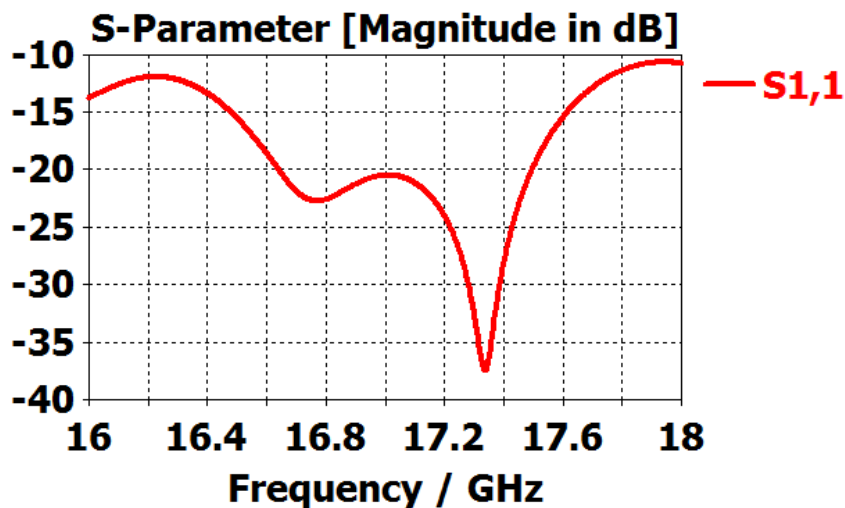


Figura B- 2 Adaptación de la antenna con la red corporativa 2 en configuración 0-0-0

Configuración 20-20-20

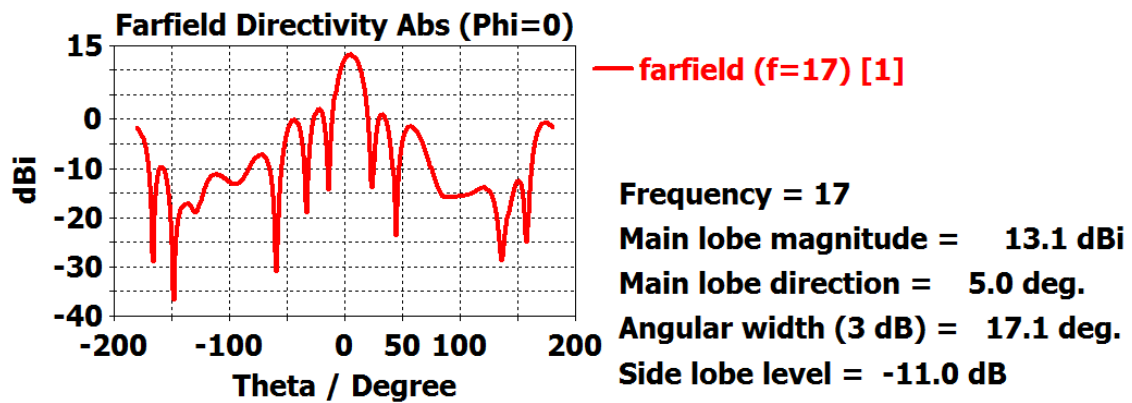


Figura B- 3Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 20-20-20

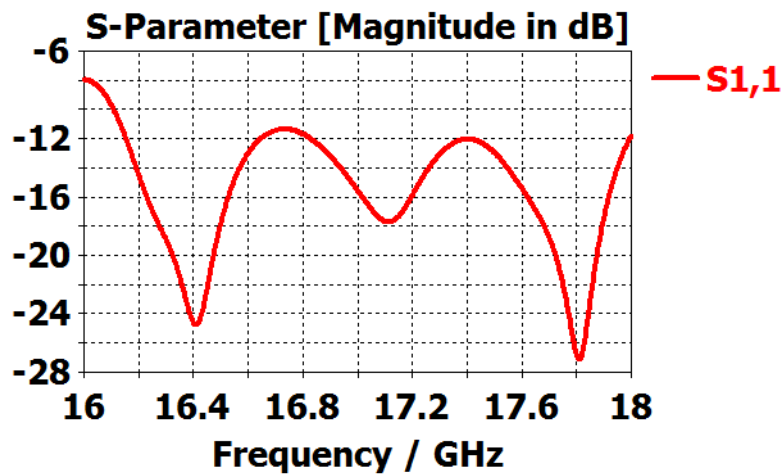


Figura B- 4Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 20-20-20

Configuración 65-65-65

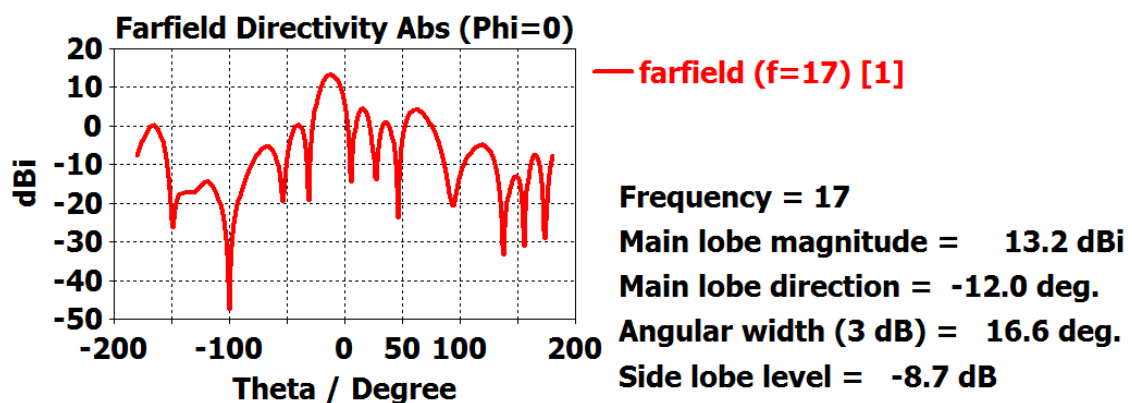


Figura B- 5Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 65-65-65

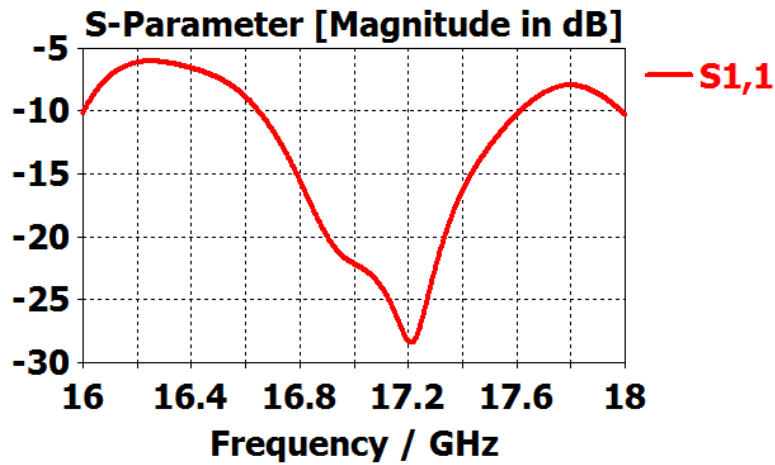


Figura B- 6 Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 65-65-65

Configuración 40-35-40

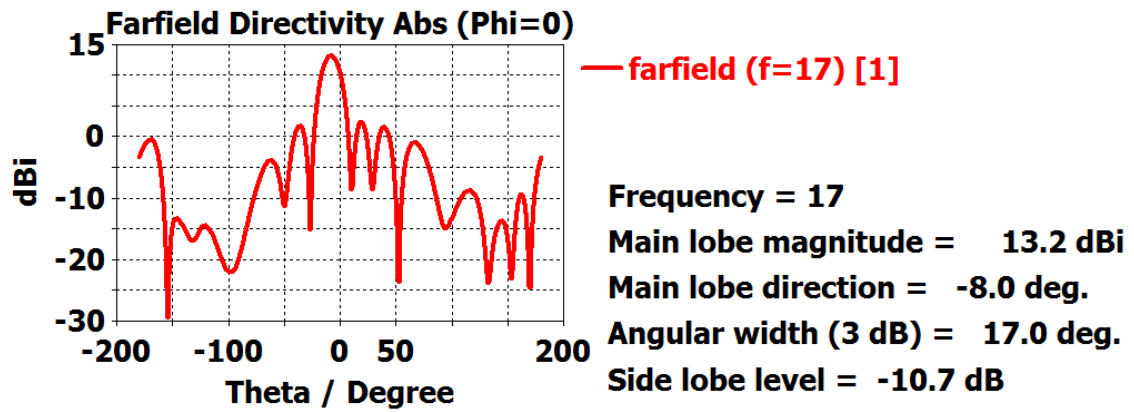


Figura B- 7 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 40-35-40

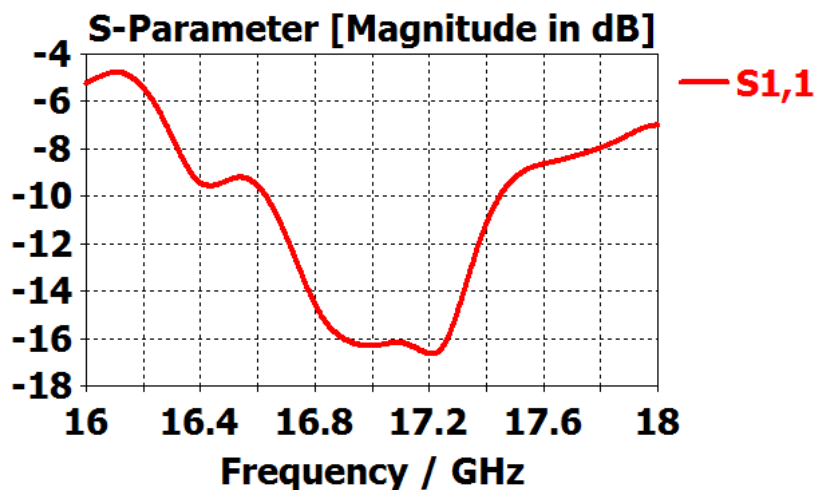


Figura B- 8 Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 40-35-40

Configuración 45-40-45

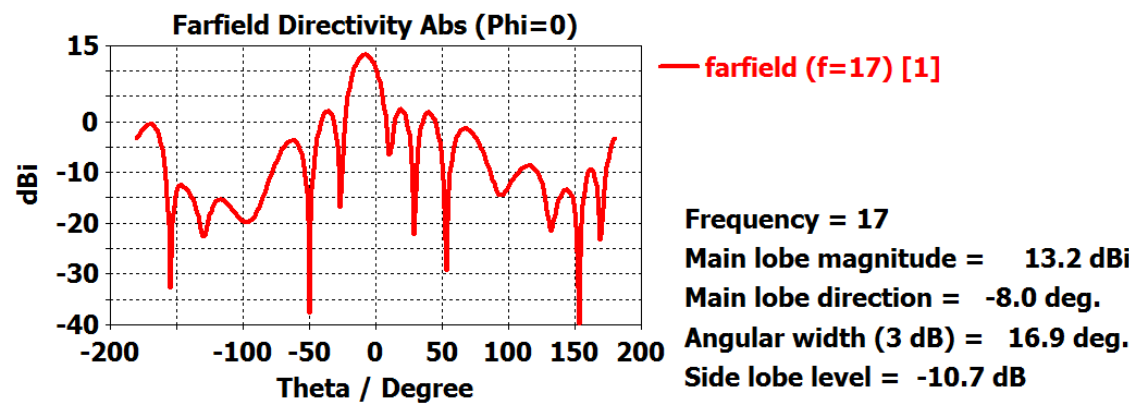


Figura B- 9Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 45-40-45

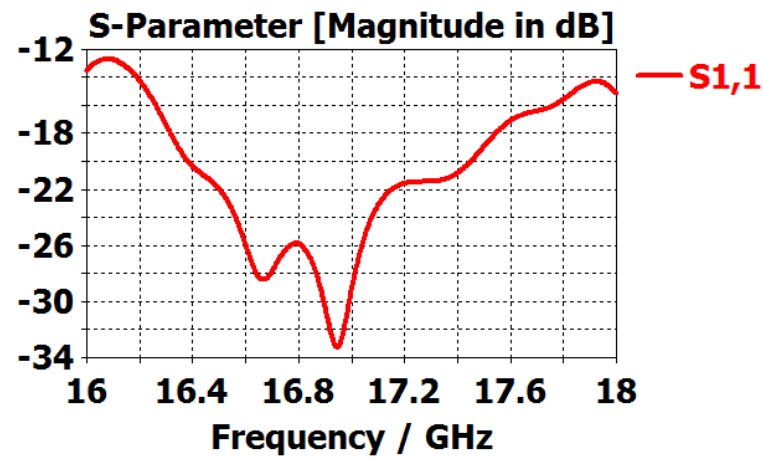


Figura B- 10Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 45-40-45

Configuración 45-85-40

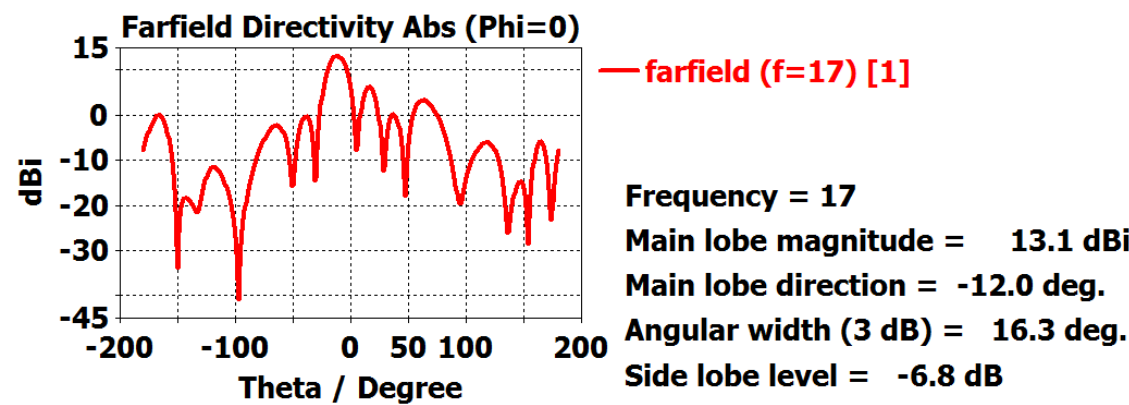


Figura B- 11Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 45-85-40

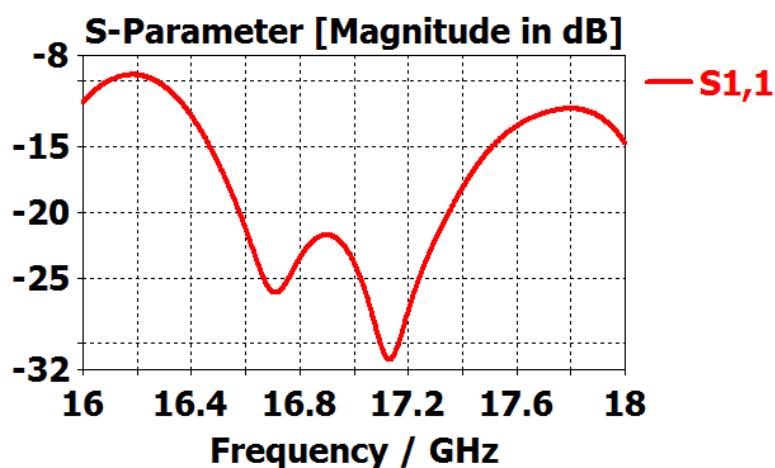


Figura B- 12 Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 45-85-40

Configuración 65-55-45

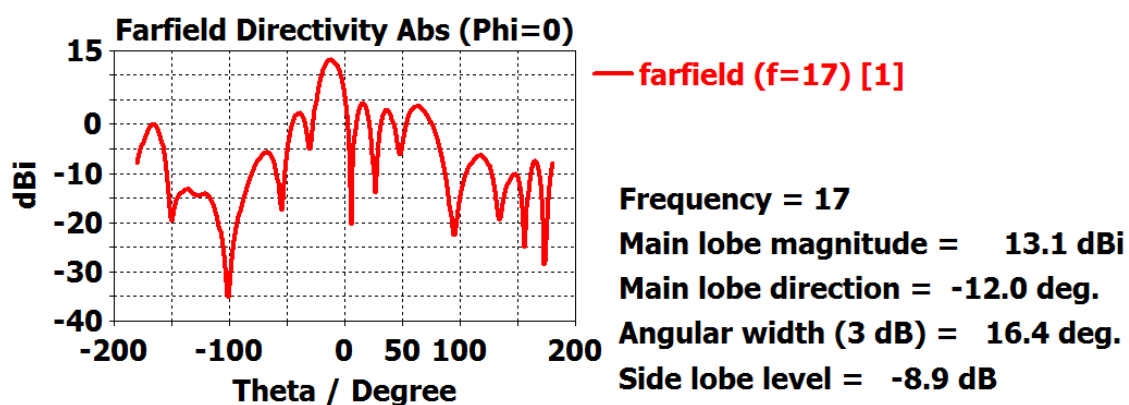


Figura B- 13 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 65-55-45

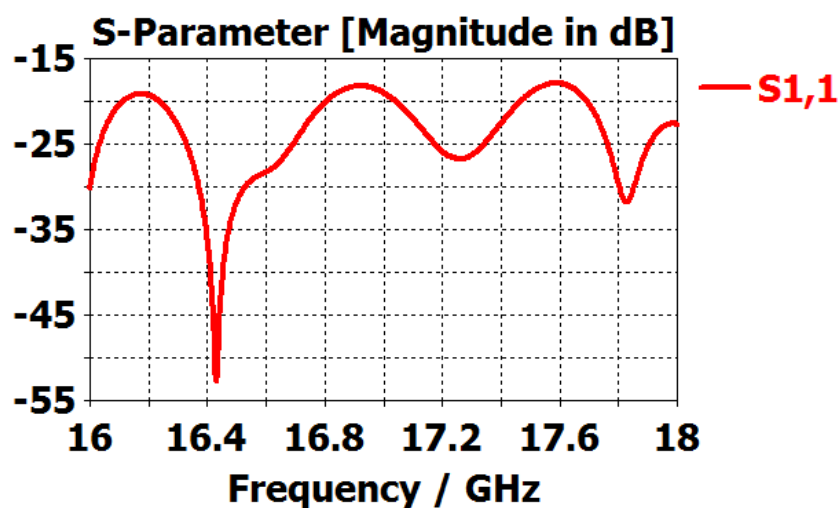


Figura B- 14 Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 65-55-45

Configuración 85-85-45

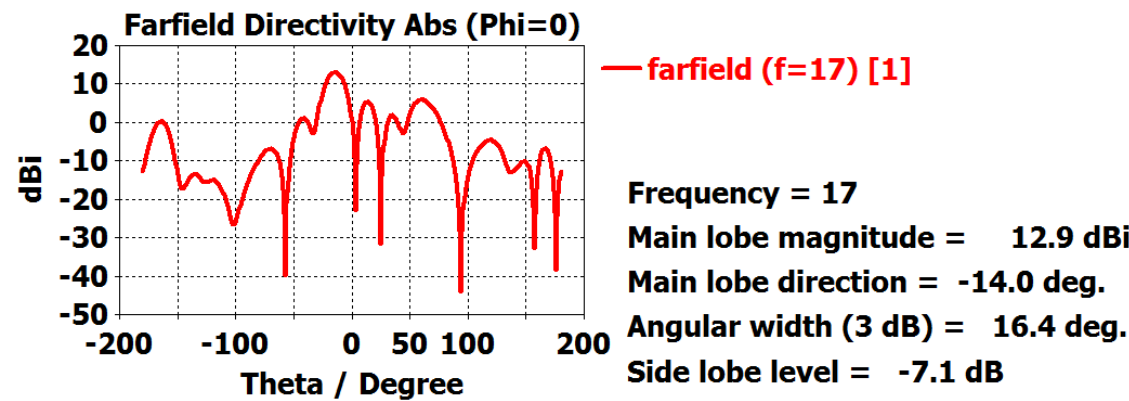


Figura B- 15 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 85-85-45

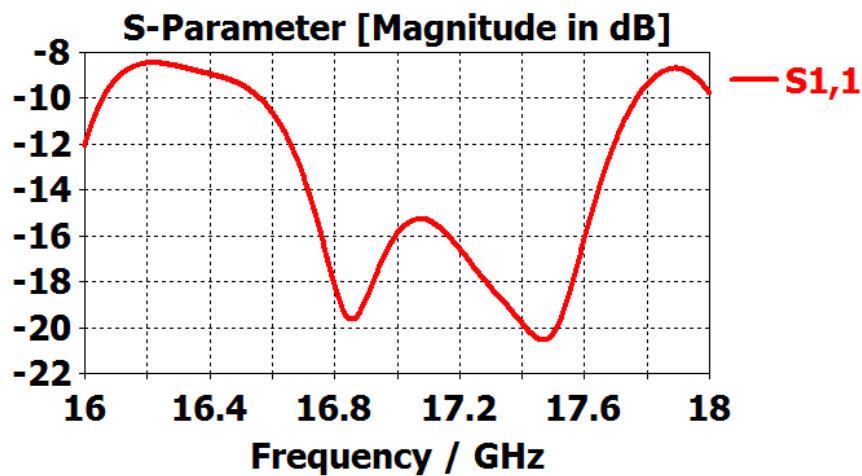


Figura B- 16 Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 85-85-45

Configuración 85-90-85

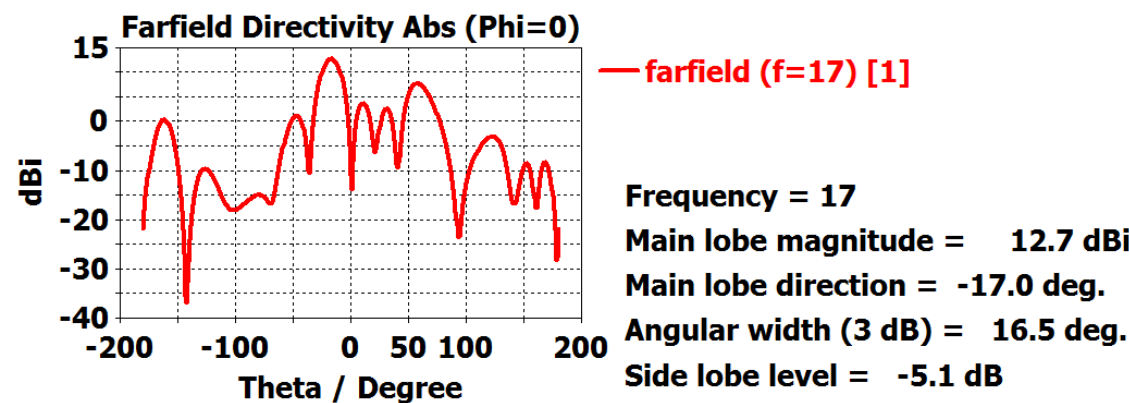


Figura B- 17 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 85-90-85

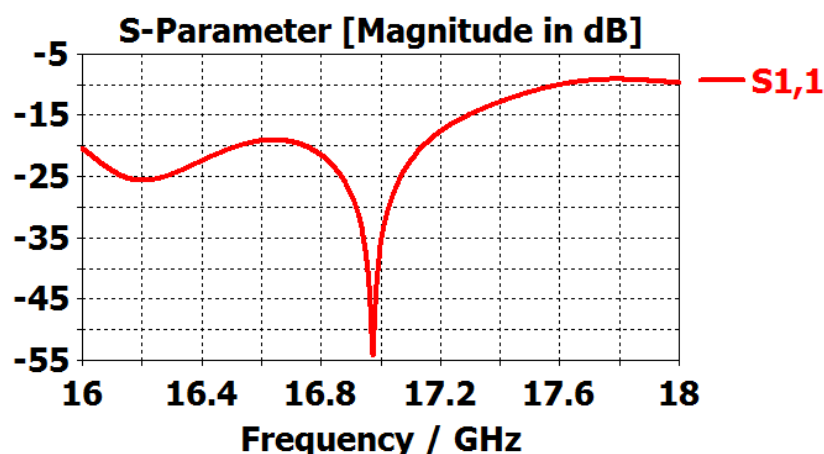


Figura B- 18 Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 85-90-85

Configuración 130-100-130

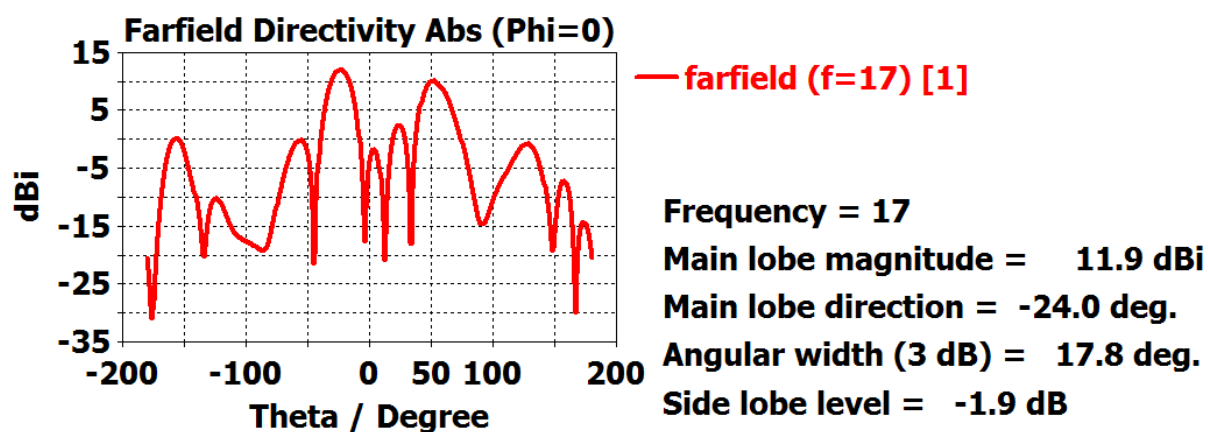


Figura B- 19 Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 130-100-130

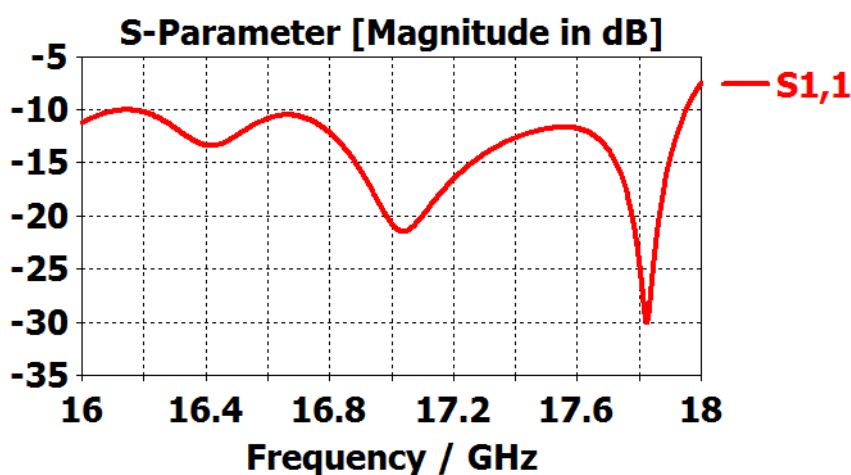


Figura B- 20 Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 130-100-130

Configuración 130-145-130

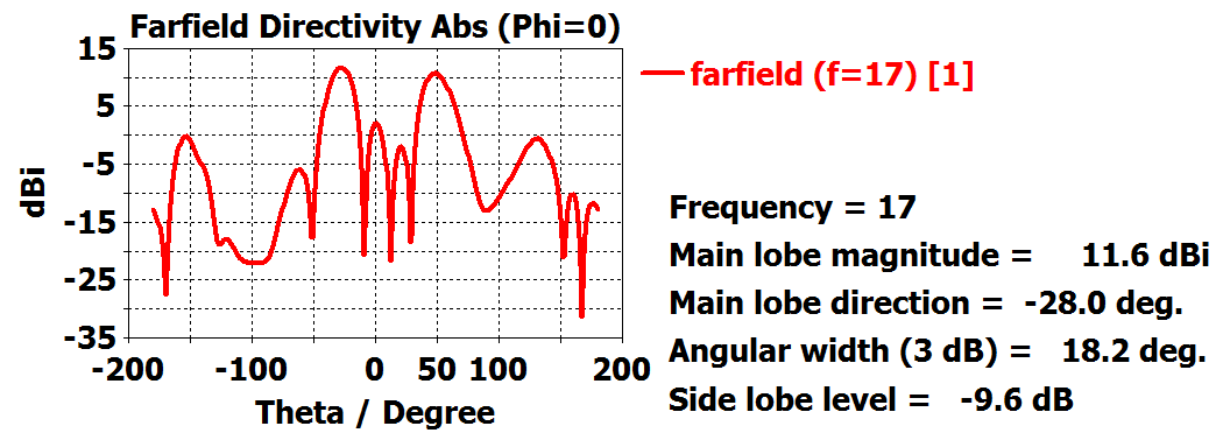


Figura B- 21Diagrama de radiación de la red corporativa 2 en configuración 130-145-130

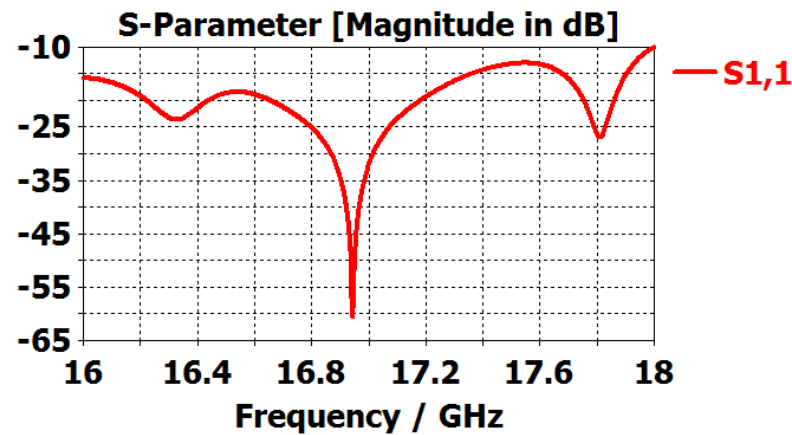


Figura B- 22Adaptación de la antena con la red corporativa 2 en configuración 130-145-130

Anexo C. Planos del prototipo construido

Prototipo dividido en base y tapa, construido en aluminio. Ensamblado mediante tornillos.

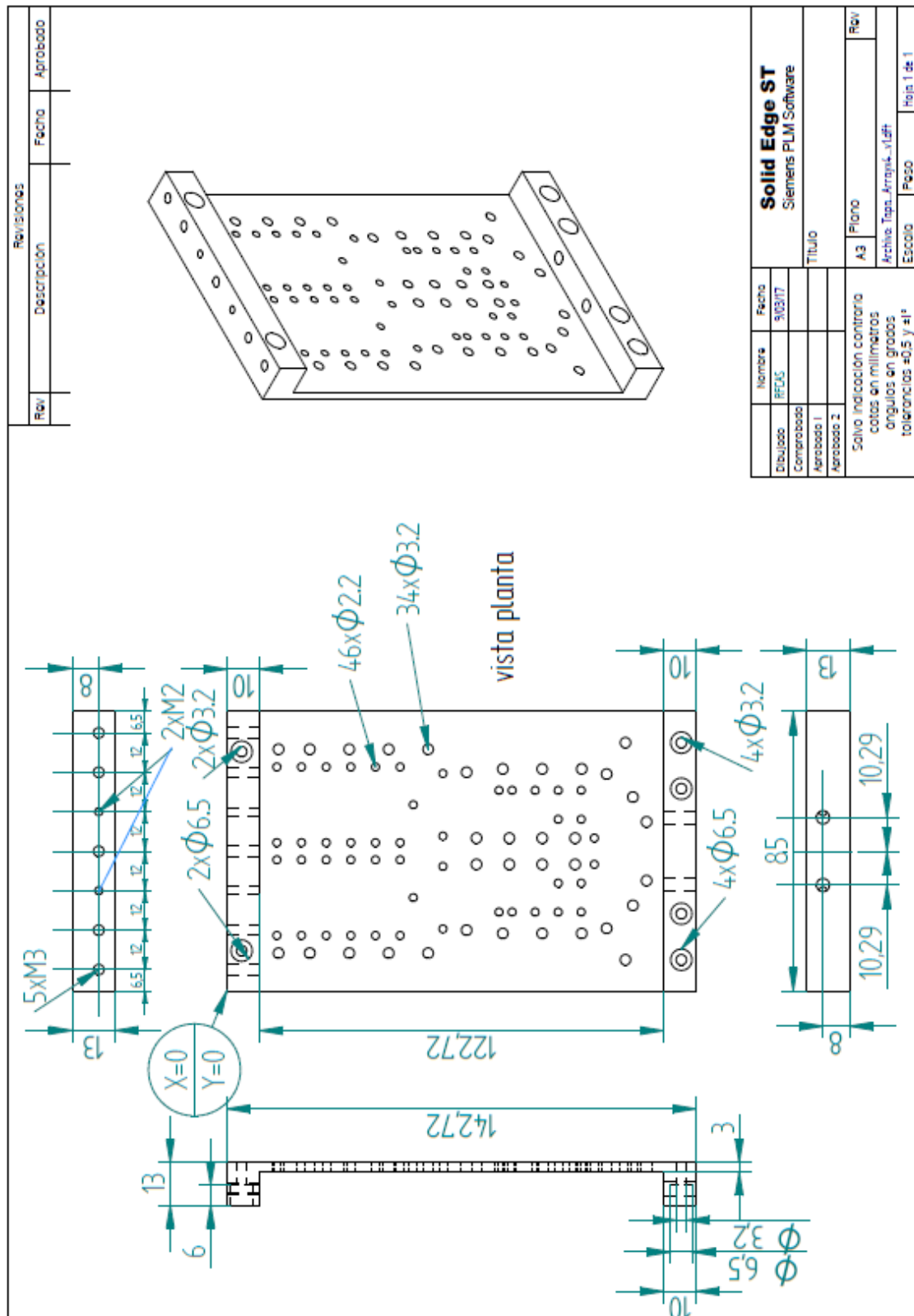
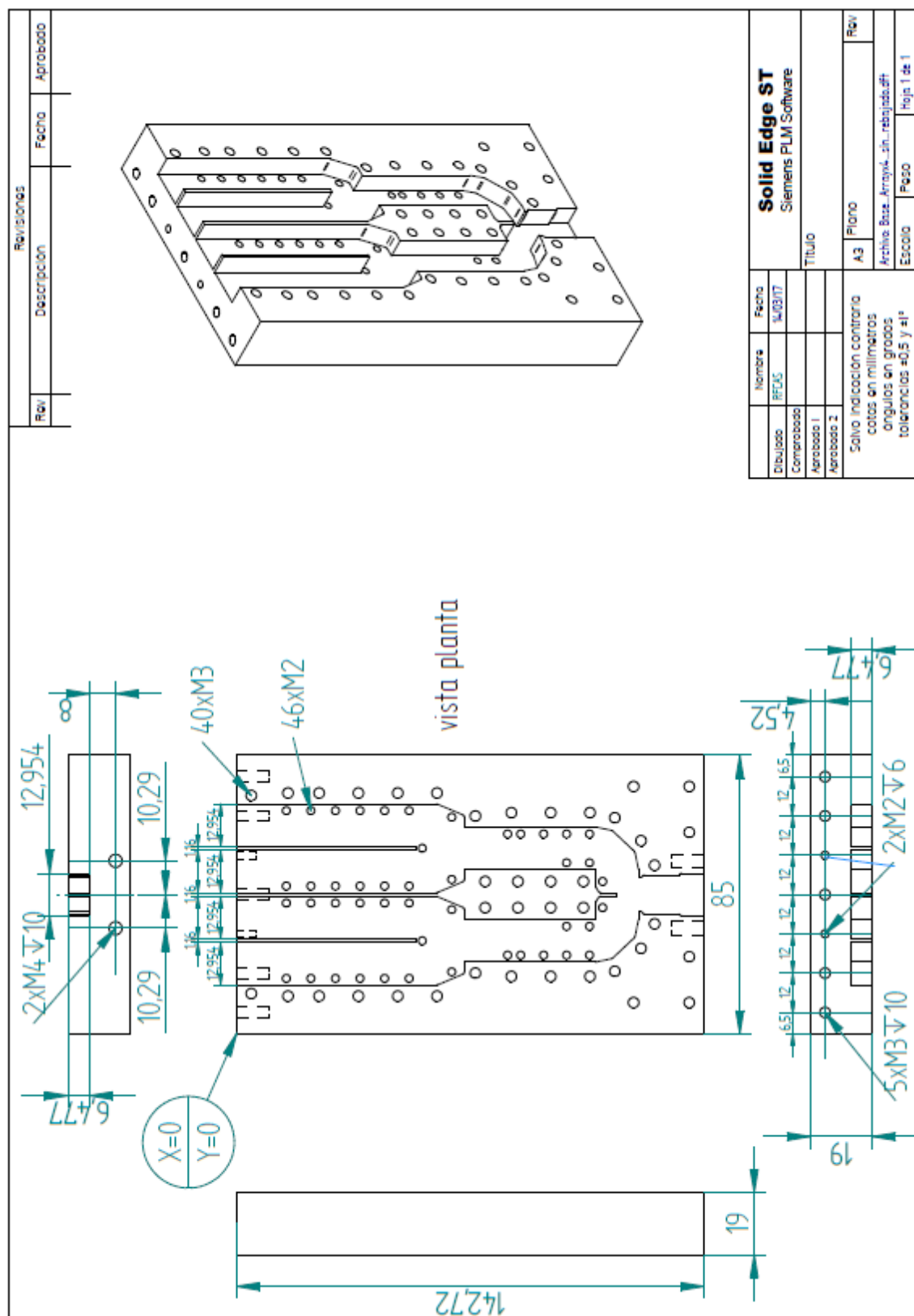


Figura C- 1Plano de la tapa del prototipo



Anexo D. Comparativa de los diagramas de radiación medidos vs simulado

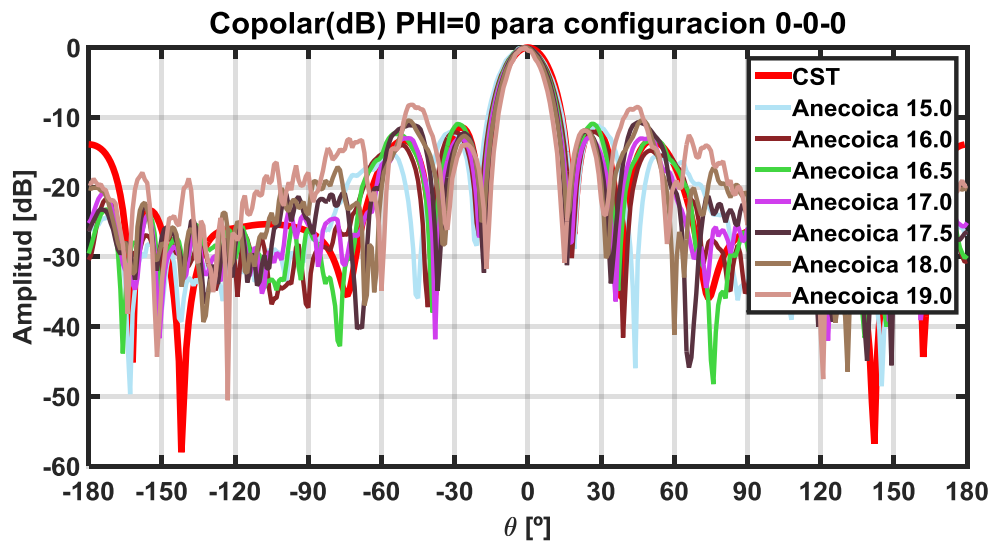


Figura D- 1Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 0-0-0

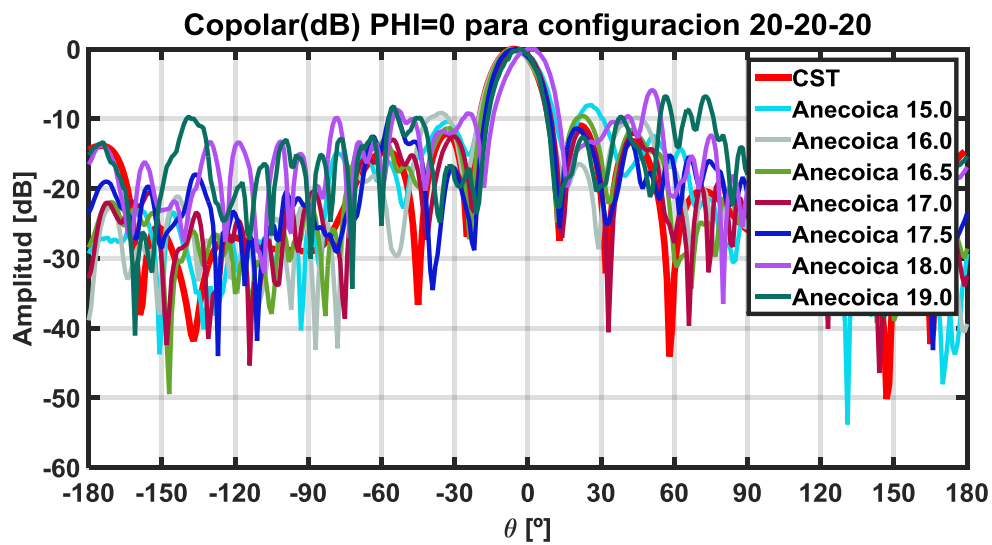


Figura D- 2Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 20-20-20

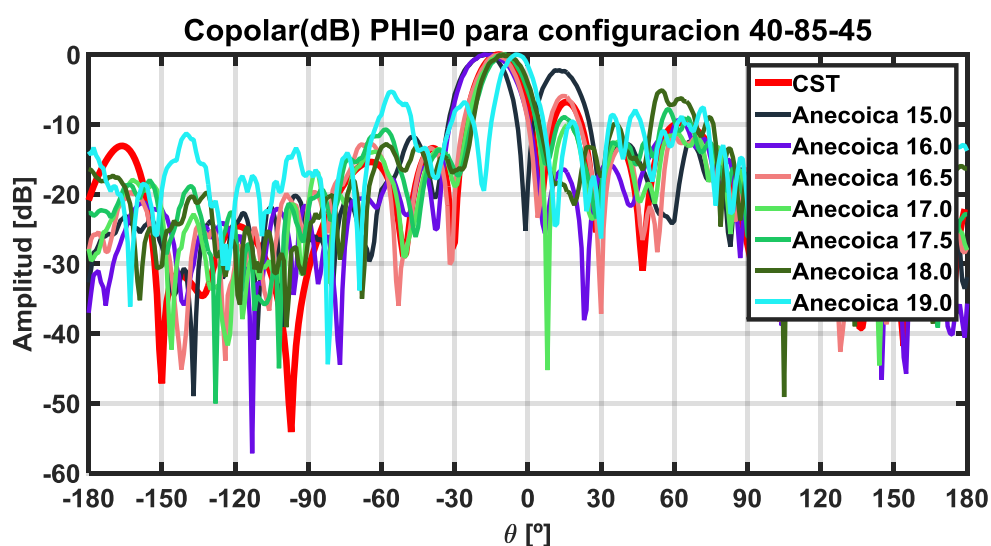


Figura D- 3 Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 40-85-45

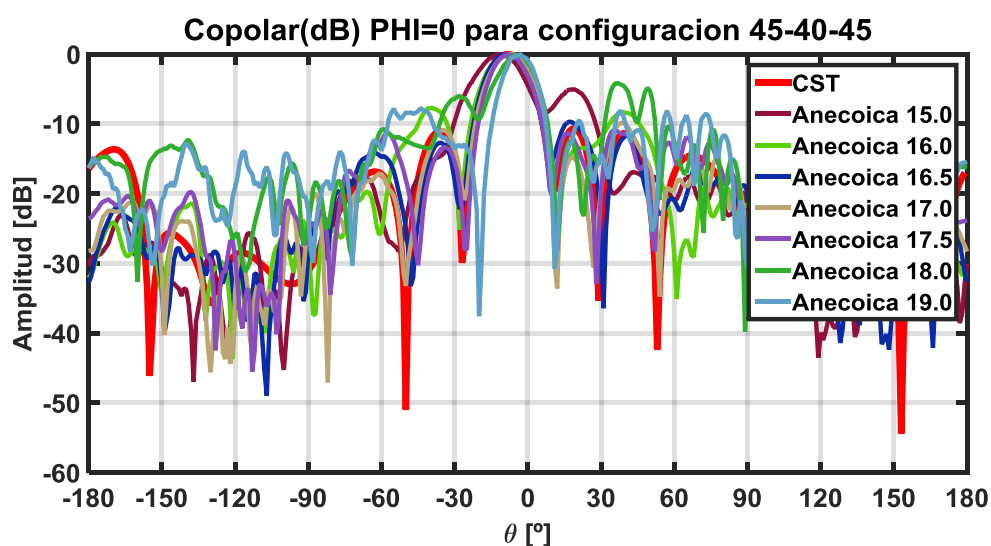


Figura D- 4 Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 45-40-45

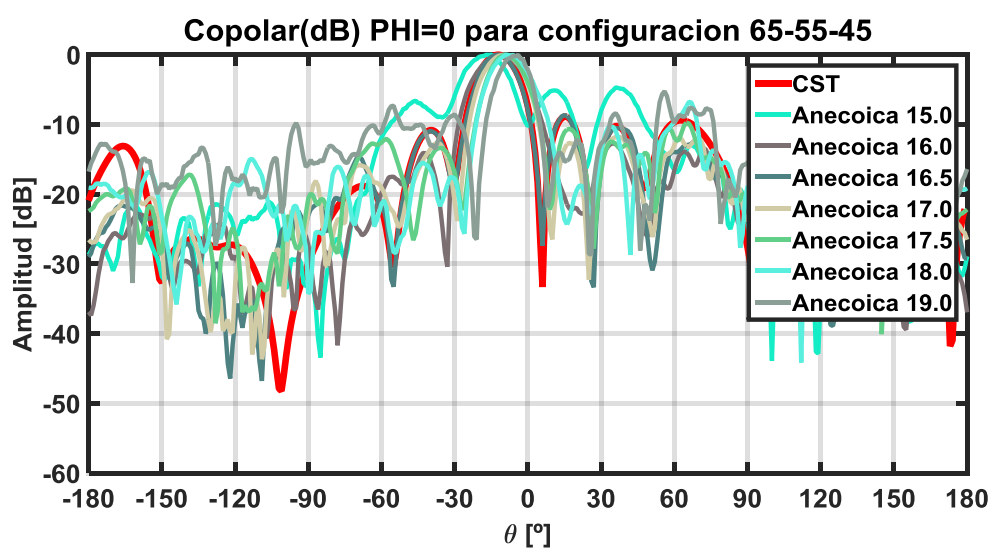


Figura D- 5 Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 65-55-45

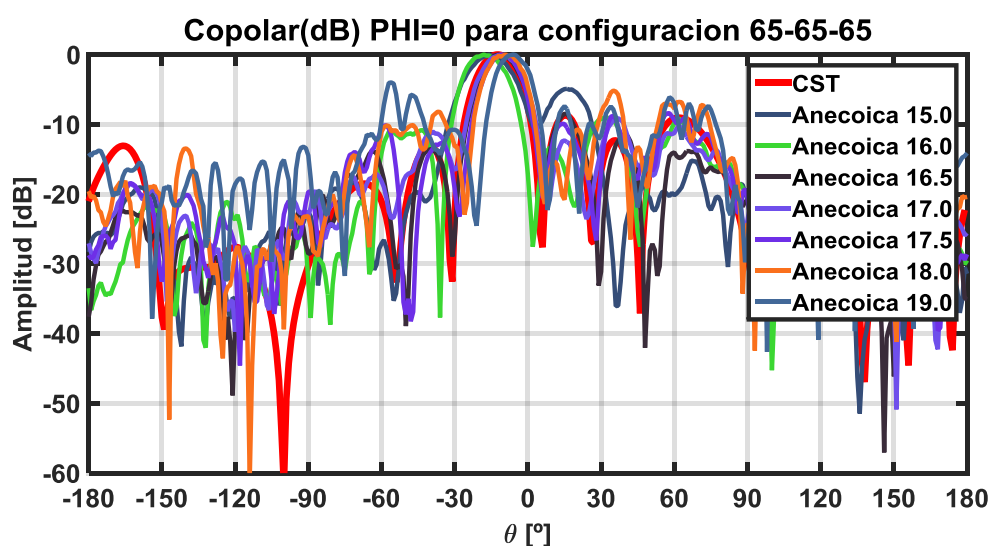


Figura D- 6 Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 65-65-65

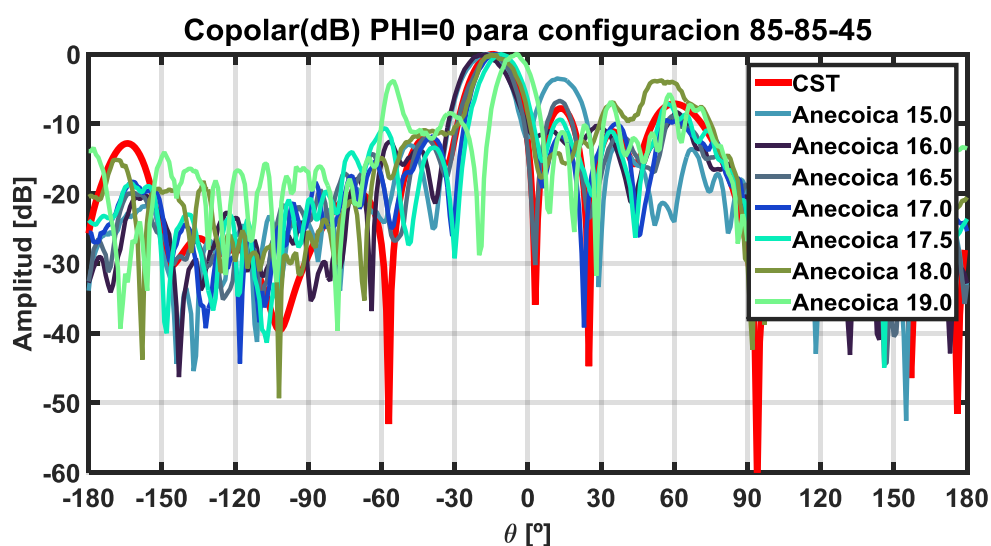


Figura D- 7 Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 85-85-45

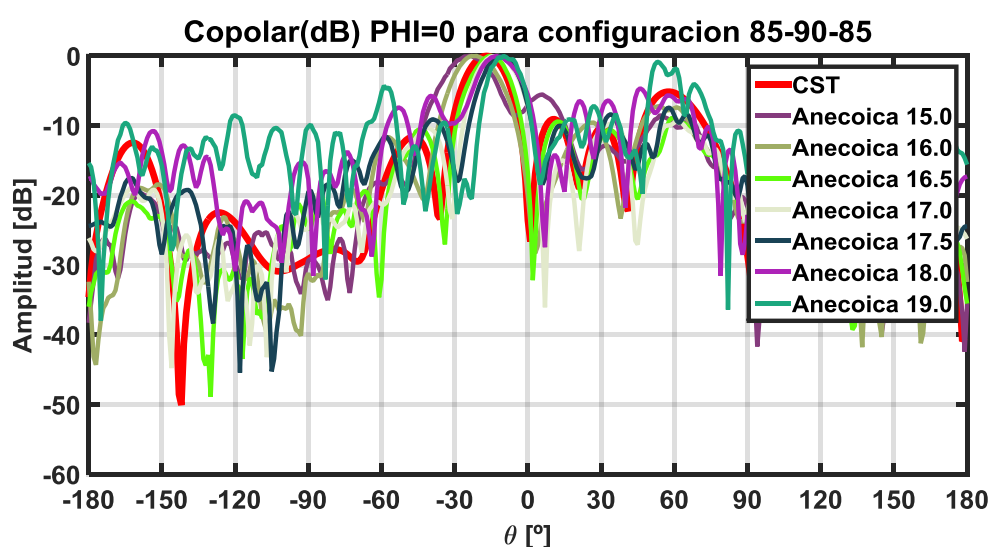


Figura D- 8 Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 85-90-85

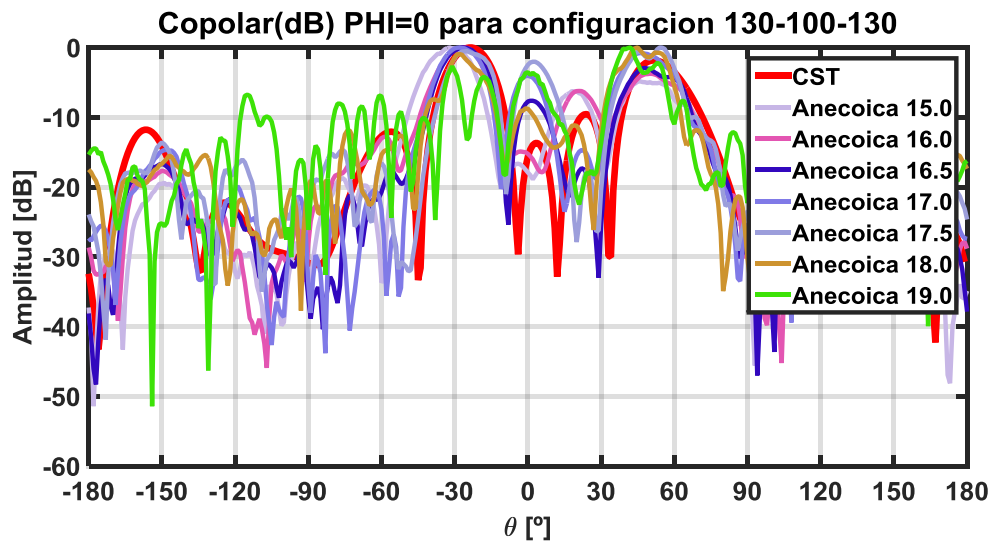


Figura D- 9 Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 130-100-130

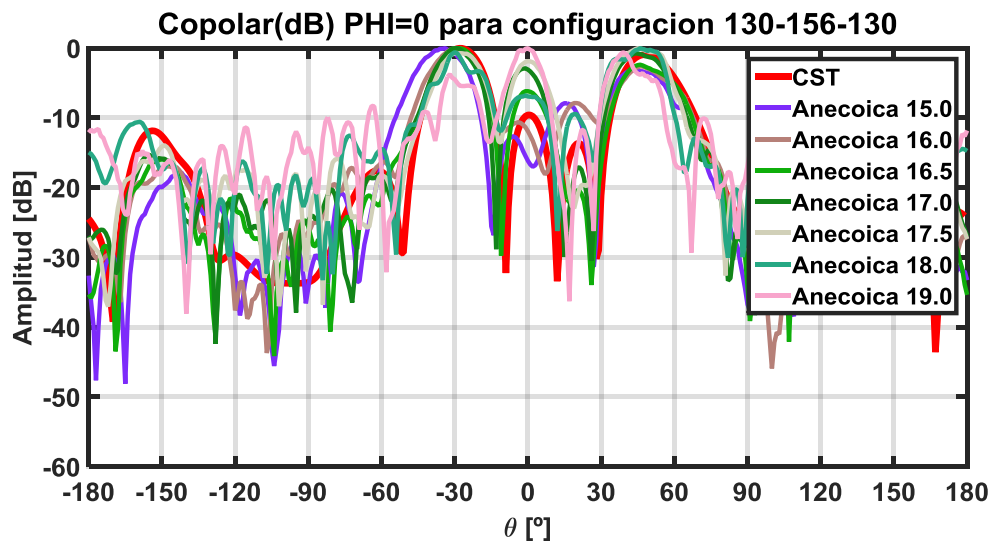


Figura D- 10 Diagramas de radiación medidos vs simulado para la configuración 130-145-130

Anexo E. Comparativa de diagramas de radiación simulados, medidos y teóricos.

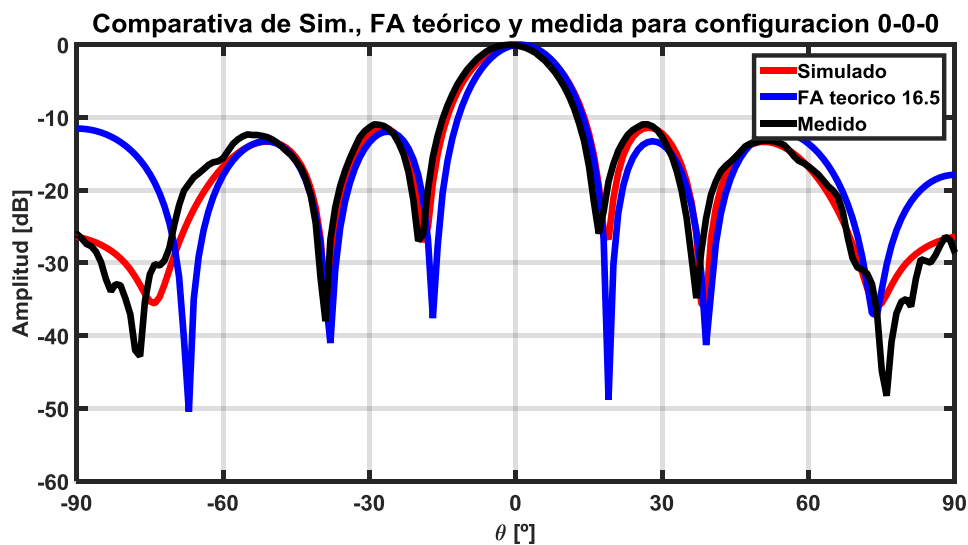


Figura E- 1 Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 0-0-0

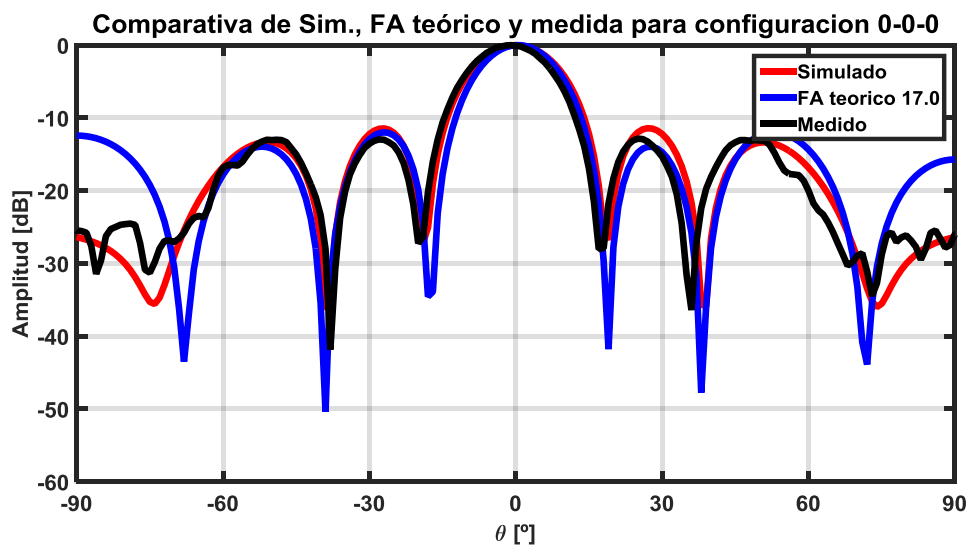


Figura E- 2 Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 0-0-0

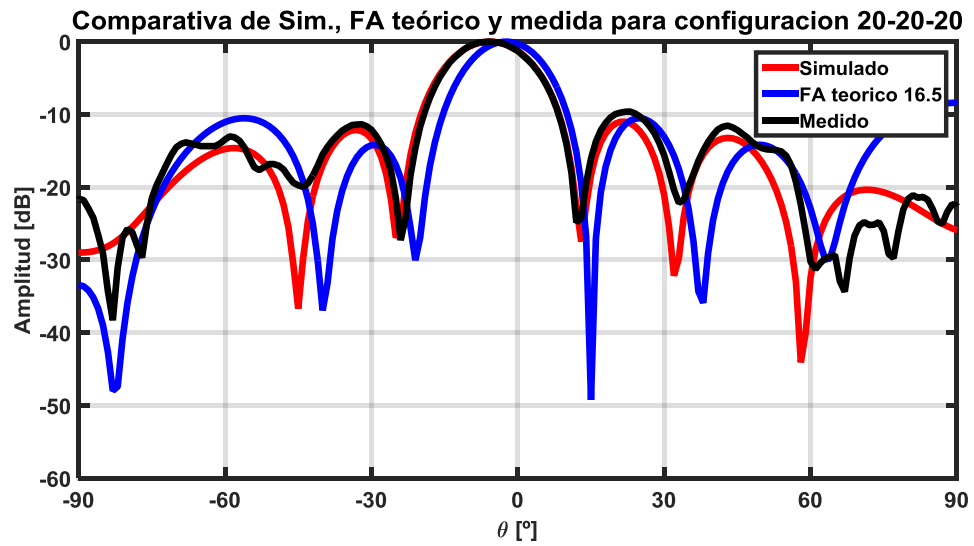


Figura E- 3Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 20-20-20

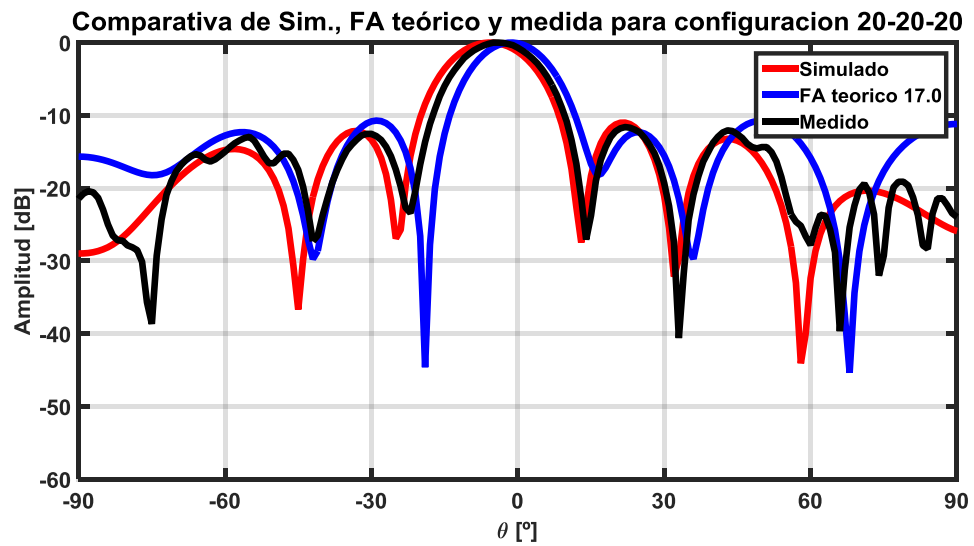


Figura E- 4Comparativa diagramas a 17GHz para la configuración 20-20-20

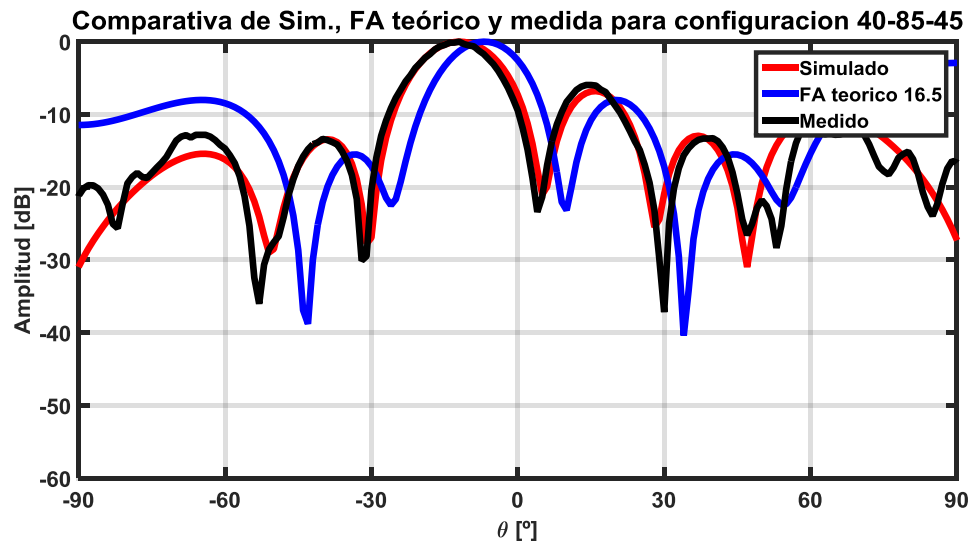


Figura E- 5 Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 40-85-45

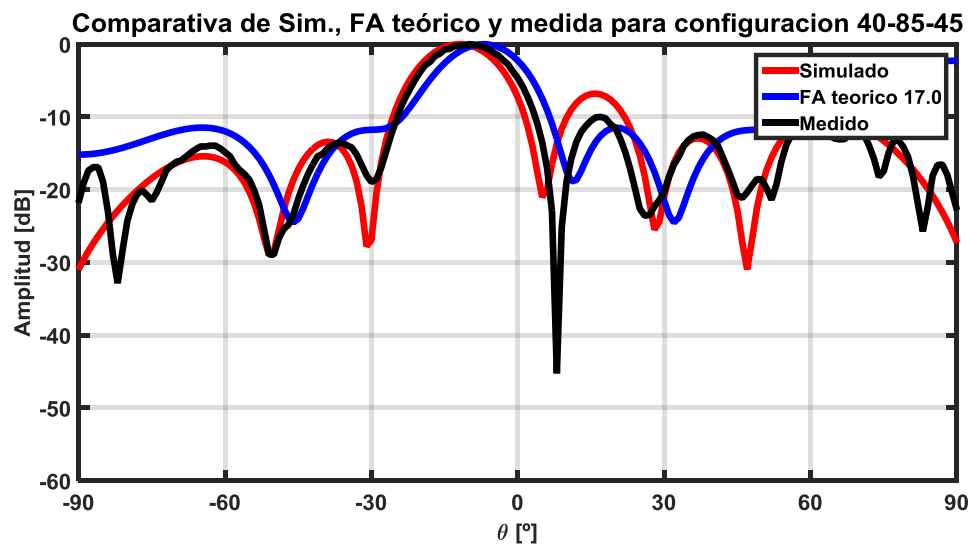


Figura E- 6 Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 40-85-45

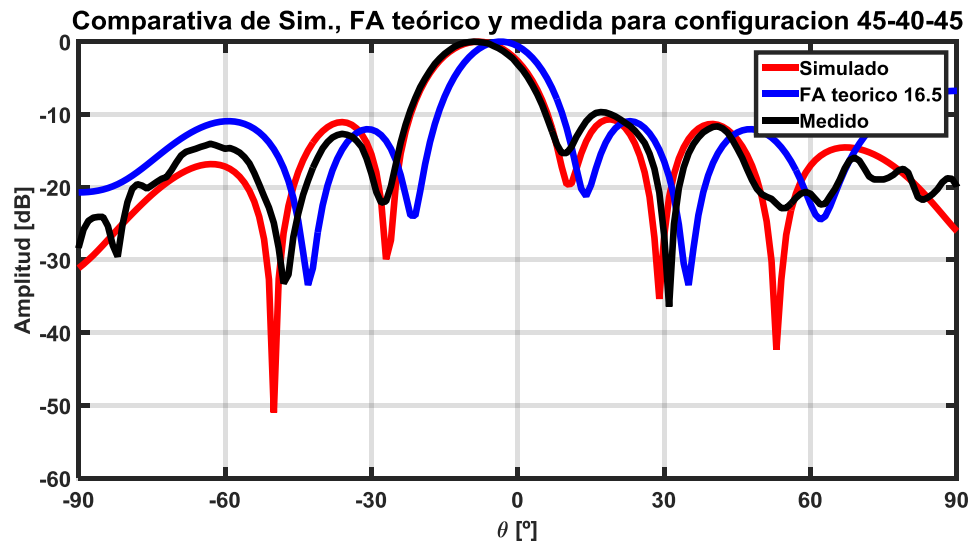


Figura E- 7Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 45-40-45

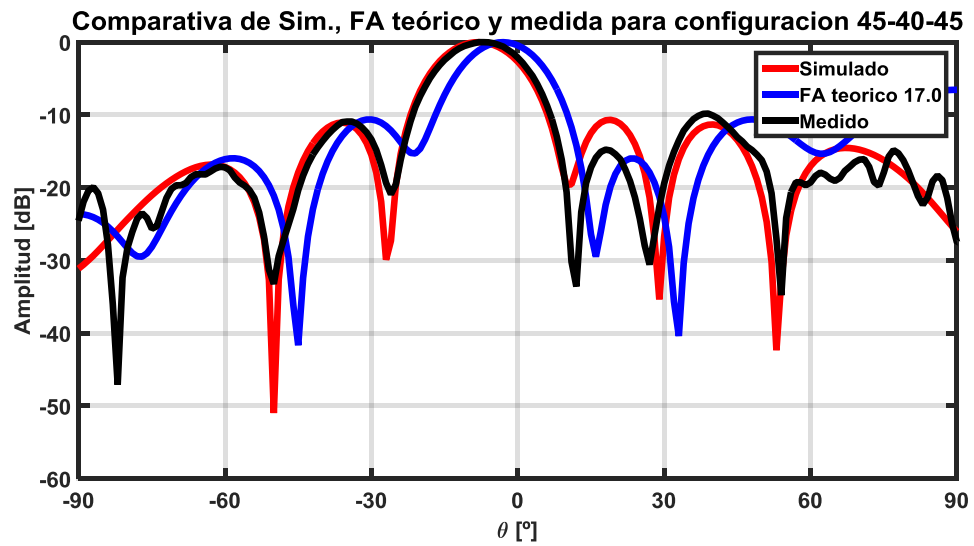


Figura E- 8 Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 45-40-45

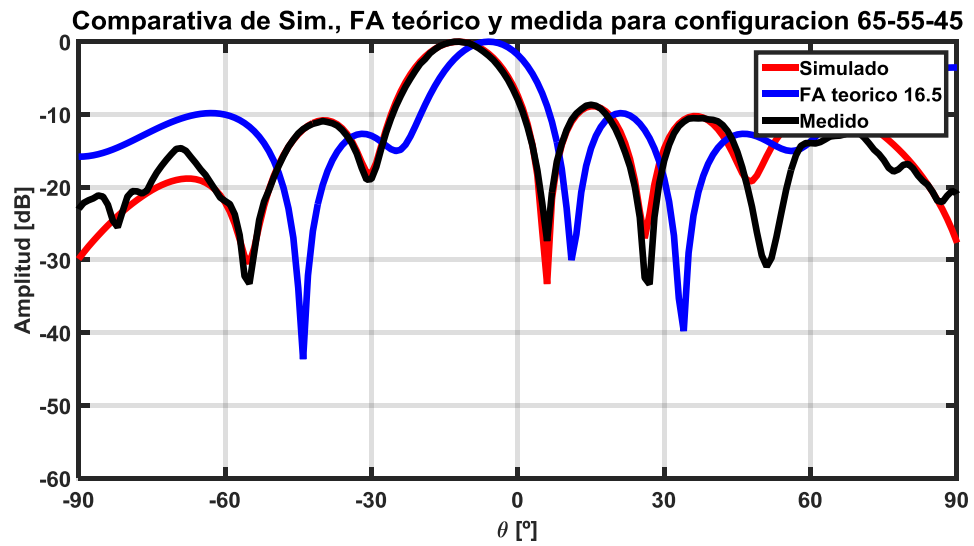


Figura E- 9Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 65-55-45

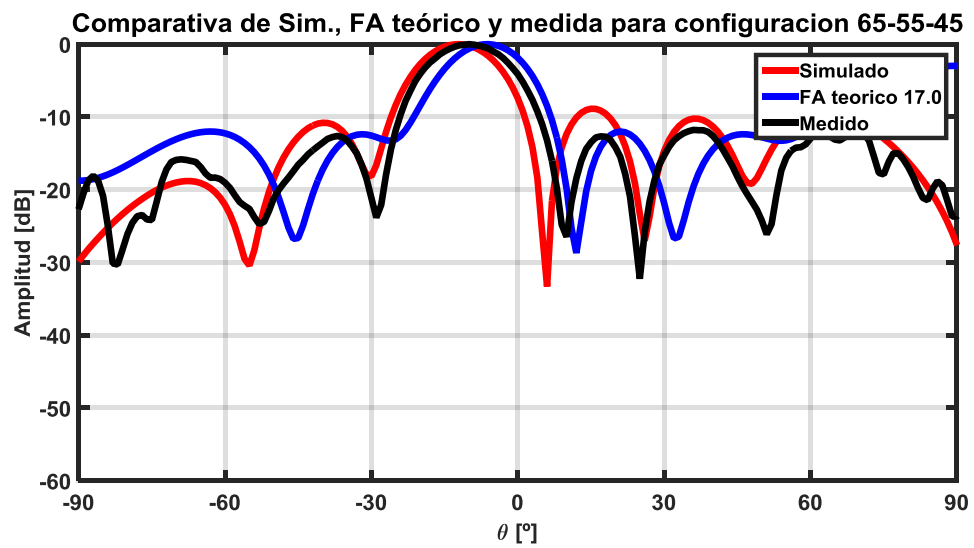


Figura E- 10Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 65-55-45

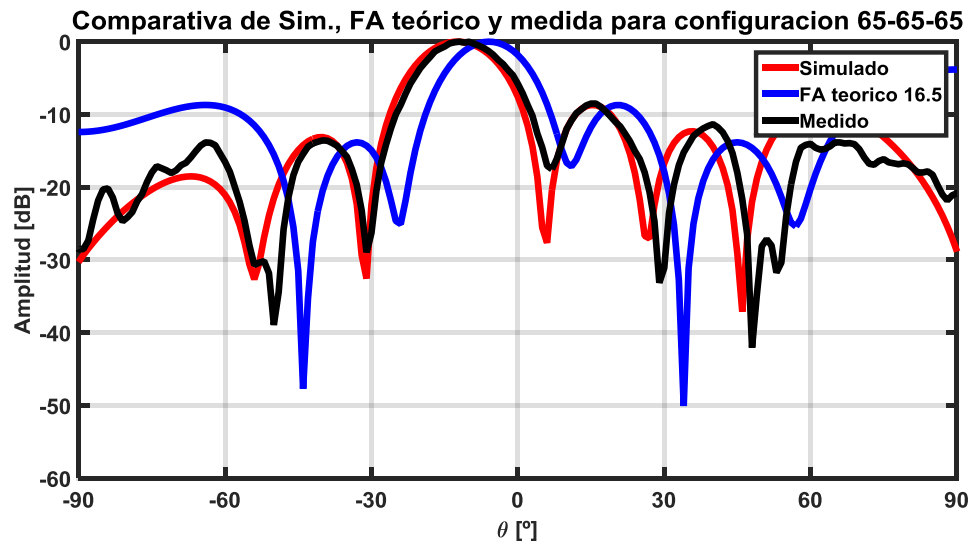


Figura E- 11Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 65-65-65

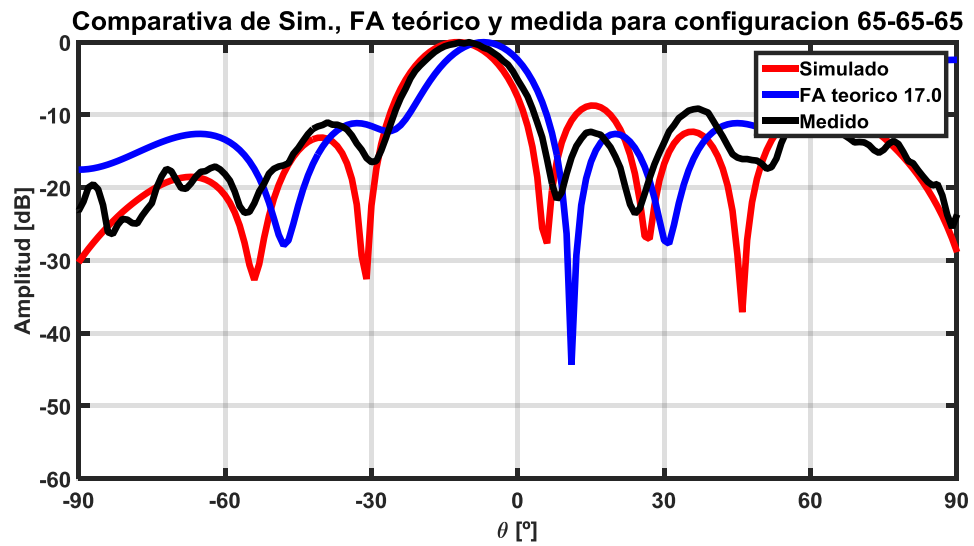


Figura E- 12 Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 65-65-65

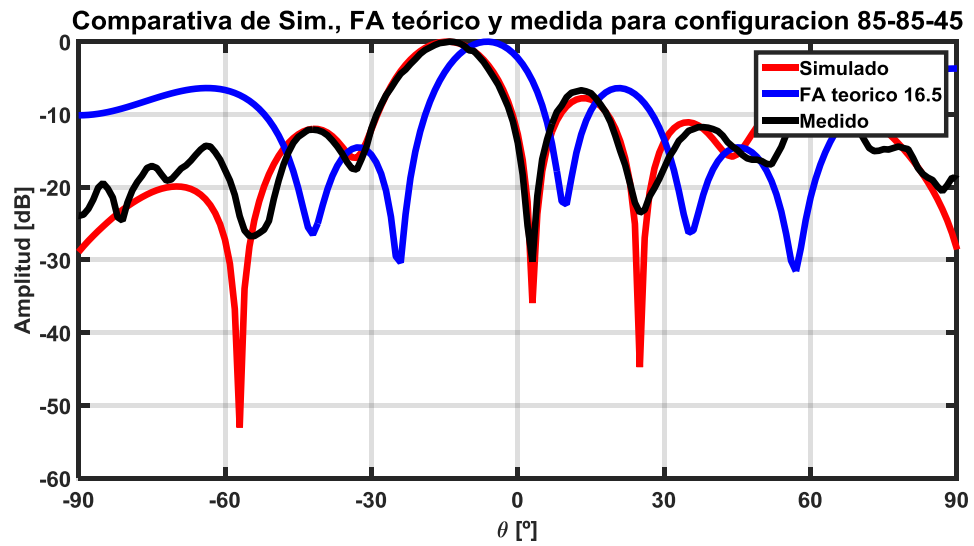


Figura E- 13Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 85-85-45

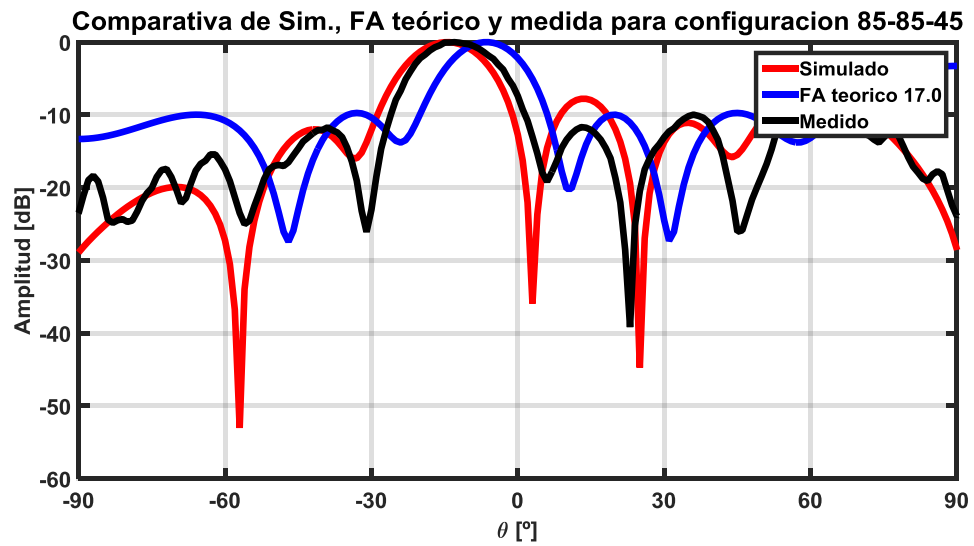


Figura E- 14Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 85-85-45

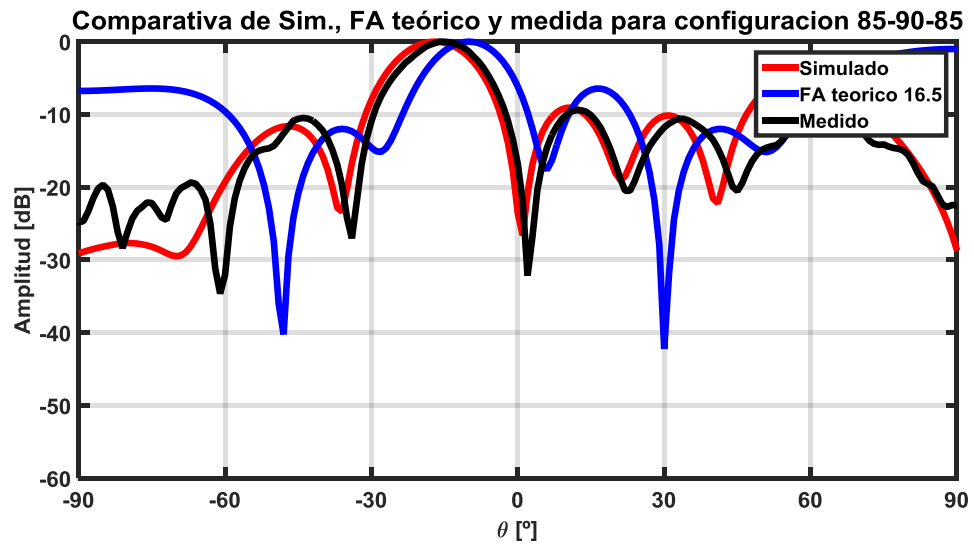


Figura E- 15 Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 85-90-85

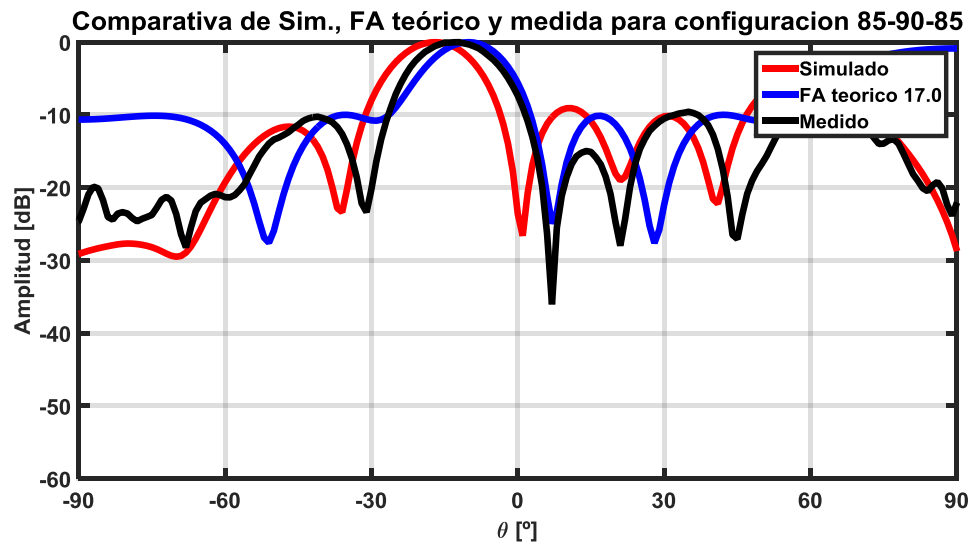


Figura E- 16 Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 85-90-85

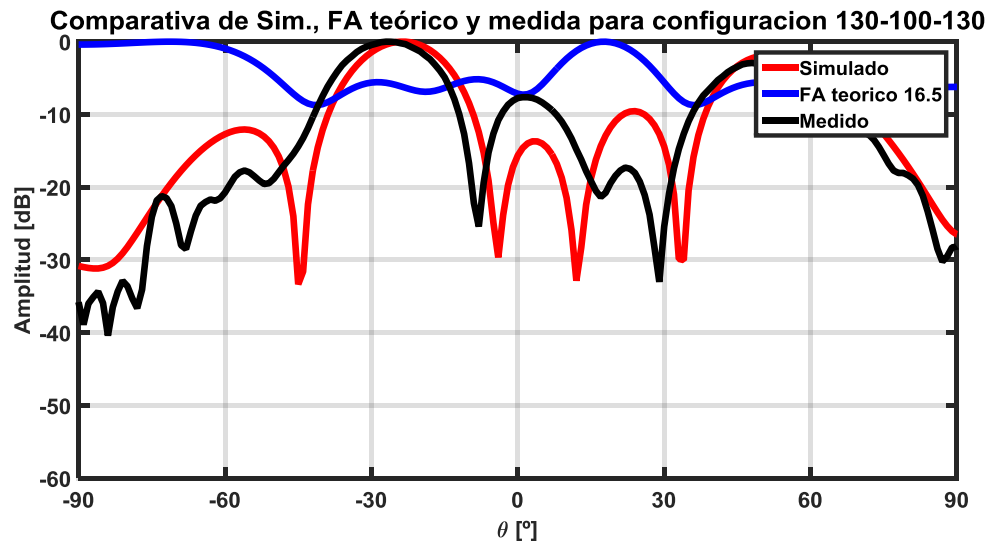


Figura E- 17 Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 130-100-130

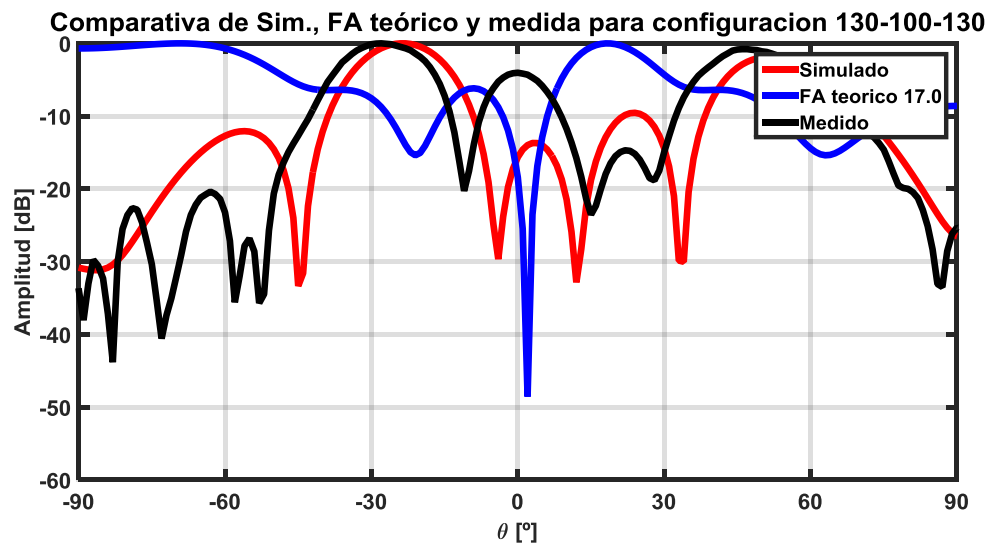


Figura E- 18 Comparativa diagramas a 17GHz para la configuración 130-100-130

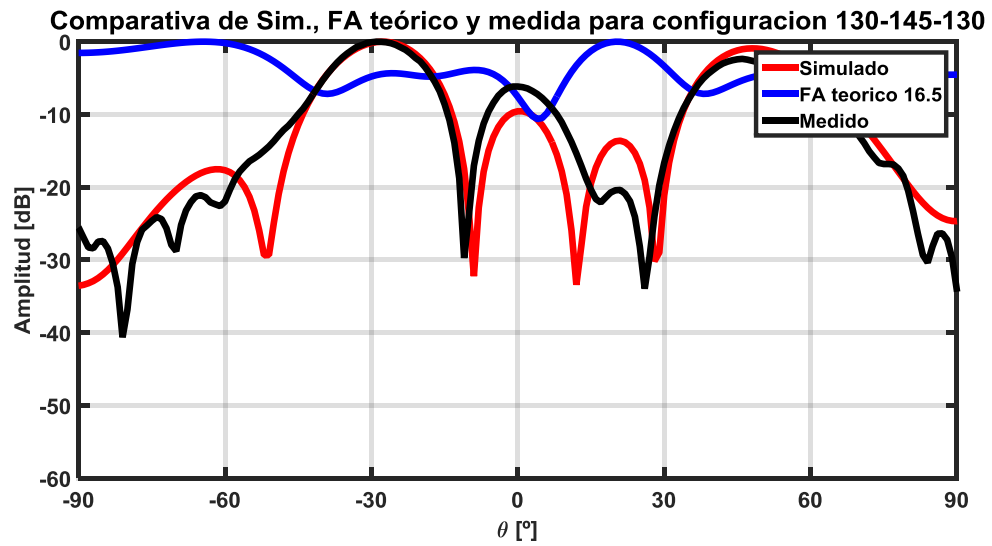


Figura E- 19Comparativa diagramas a 16.5 GHz para la configuración 130-145-130

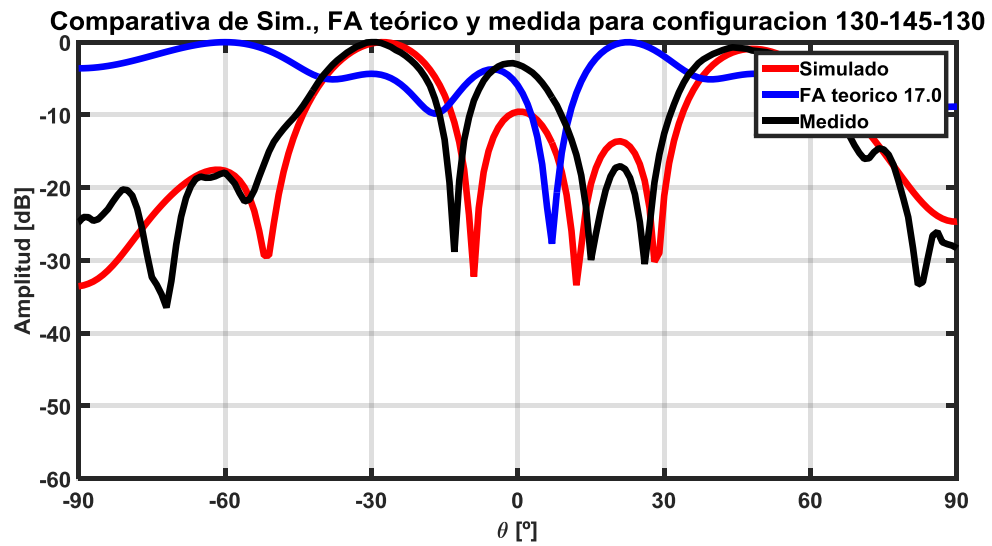


Figura E- 20Comparativa diagramas a 17 GHz para la configuración 130-145-130

Anexo F. Medidas de transmisión y adaptación de la antena medida con el analizador de redes

Configuración 20-20-20

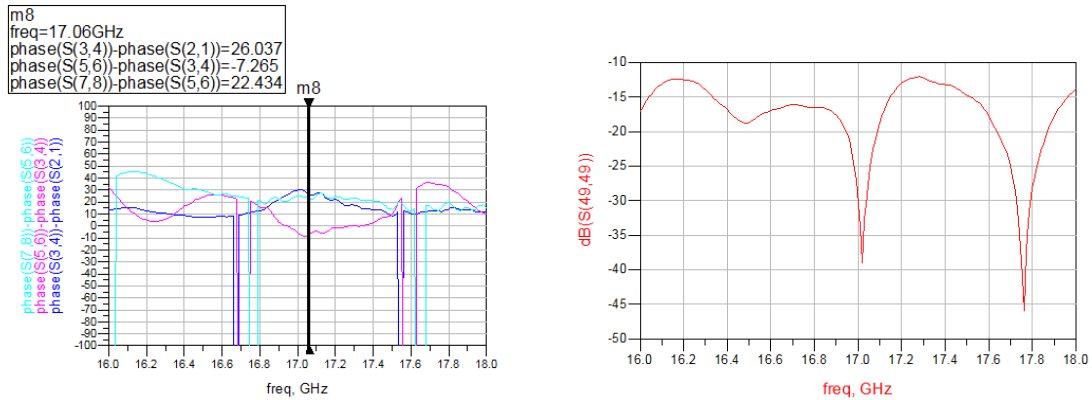


Figura F- 1 Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 20-20-20

Configuración 40-45-40

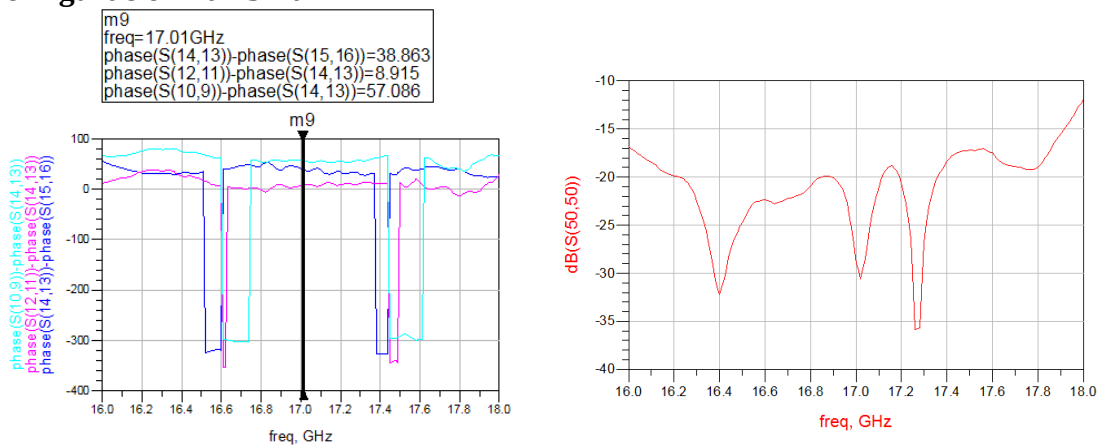


Figura F- 2Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 40-45-40

Configuración 65-55-45

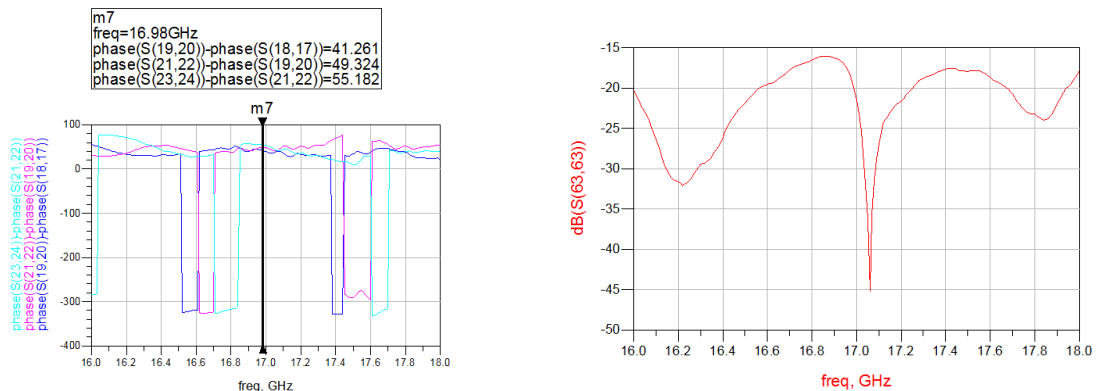


Figura F- 3Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 65-55-45

Configuración 65-65-65

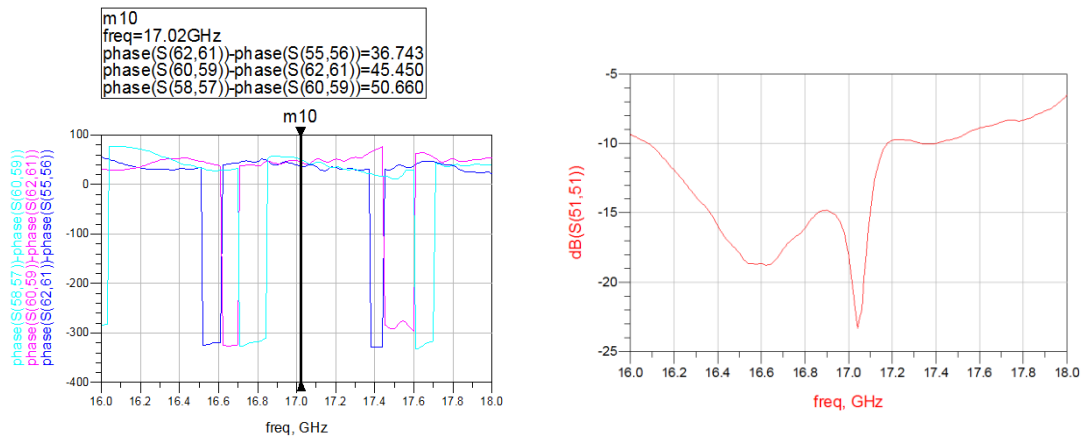


Figura F- 4Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 65-65-65

Configuración 40-85-45

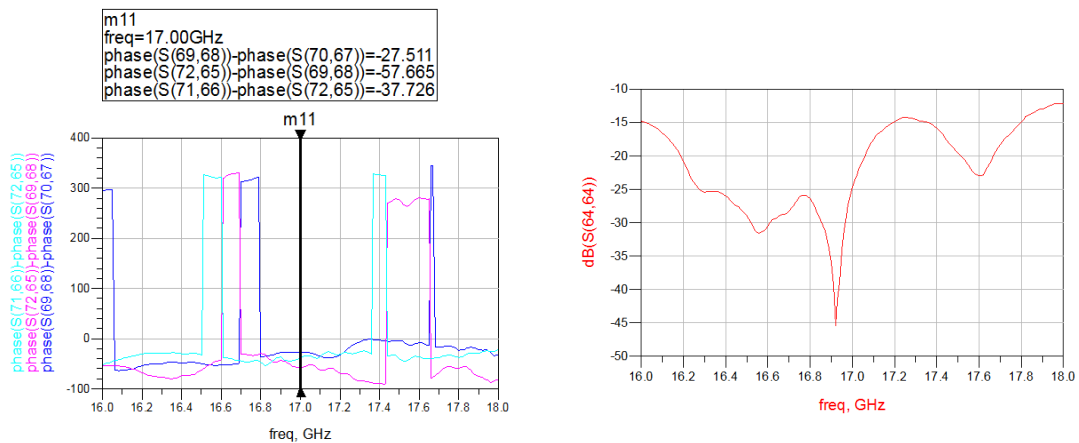


Figura F- 5Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 40-85-45

Configuración 85-90-85

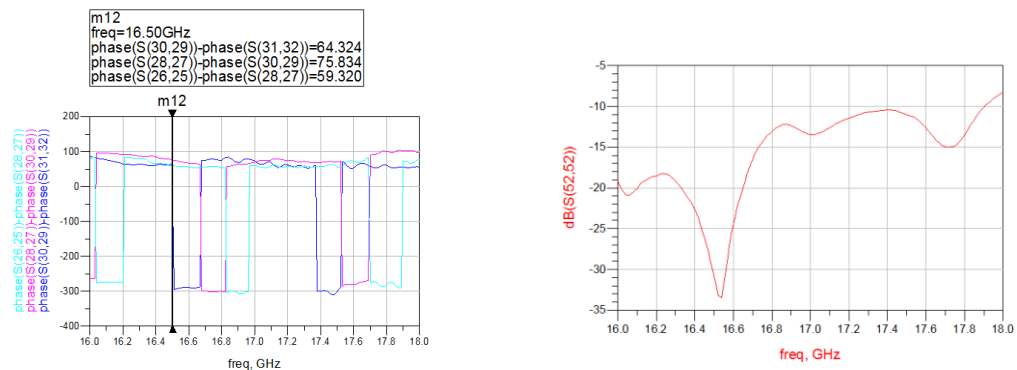


Figura F- 6Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 85-90-85

Configuración 130-100-130

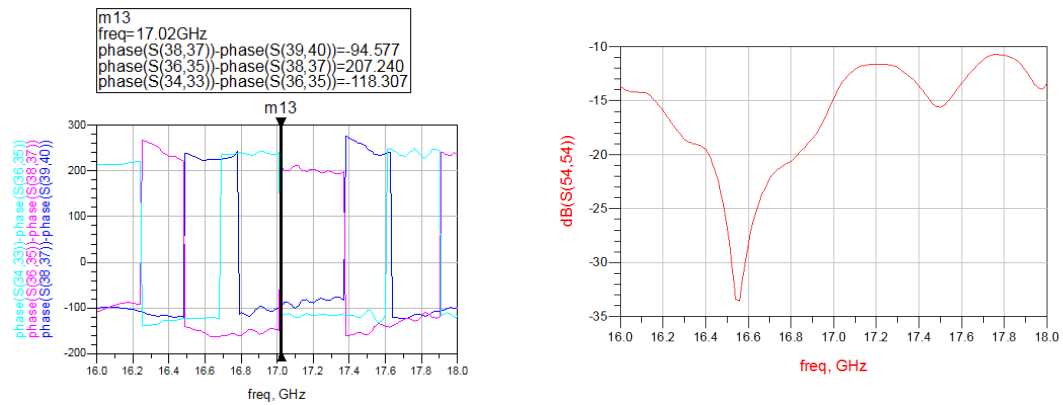


Figura F- 7 Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 130-100-130

Configuración 130-145-130

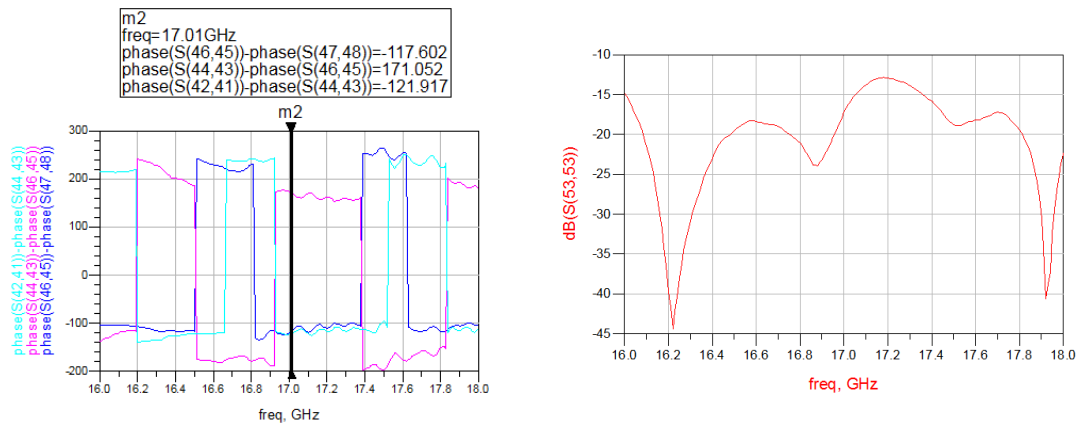


Figura F- 8 Resultados de medida de transmisión y adaptación de la configuración 130-145-130

Anexo G. Calibración del analizador de redes

Calibración en guía de onda: WR-51

El analizador de redes utilizado es el Agilent E5071C, y el kit de calibración para guía de onda es el FlannMicrowave LTD Calibration Kit 19703. Este kit proporciona transiciones de coaxial a guía de onda, ya que las conexiones del analizador son únicamente de coaxial. El hecho de tener que utilizar una transición de coaxial a guía de onda puede presentar, y presenta, pérdidas y reflexiones que pueden crear un rizado en la respuesta.



Figura G- 1Analizador de redes Agilent E571C del RFcas



Figura G- 2 Kit de calibración WR-51 Flann Microwave LTD Calibration Kit 19703

Se realiza una calibración TRL (Thru, Reflect, Linea), ya que el kit disponible tiene los elementos necesarios para la misma. Este tipo de calibración solo suele usarse en los casos en los que se requiera una gran precisión y en el que la tecnología de los conectores del dispositivo a medir no es la misma que de la que dispone el analizador.

Las ventajas de este tipo de calibración son los buenos resultados que se obtienen en sistemas donde no es sencillo situar una carga adaptada y que permitan una buena repetitividad. Este tipo de calibración se compone de un Thru, o conexión entre puertos, Reflect o reflexión en cada puerto y Line o línea de longitud típicamente $\lambda/4$ situada entre ambos puertos.

Calibración en coaxial

La calibración en coaxial se realiza utilizando el kit Agilent 85052D 3.5mm EconomyCalibration Kit. El procedimiento de calibrado consiste en conectar los terminales finales con las terminaciones disponibles del kit (circuito abierto u open, cortocircuito o short y carga o broadband load). Mediante esta calibración, el equipo puede calcular la respuesta y compensarla teniendo en cuenta pérdidas en los cables, de modo que los terminales de medida sean transparentes al dispositivo que se va a analizar.



Figura G- 3Kit de calibración para coaxial Agilent 85052D 3.5mm EconomyCalibration Kit

Anexo H. Optimización de la transición entre el divisor de nivel 1 y los divisores de nivel 2 de la red 1

Esta caracterización se realiza mediante los valores de los parámetros S extraídos desde el CST en formato .s3p y unas líneas de transmisión que actúan como transición entre ambos divisores. Un ejemplo de este modelo se puede apreciar en la siguiente figura:

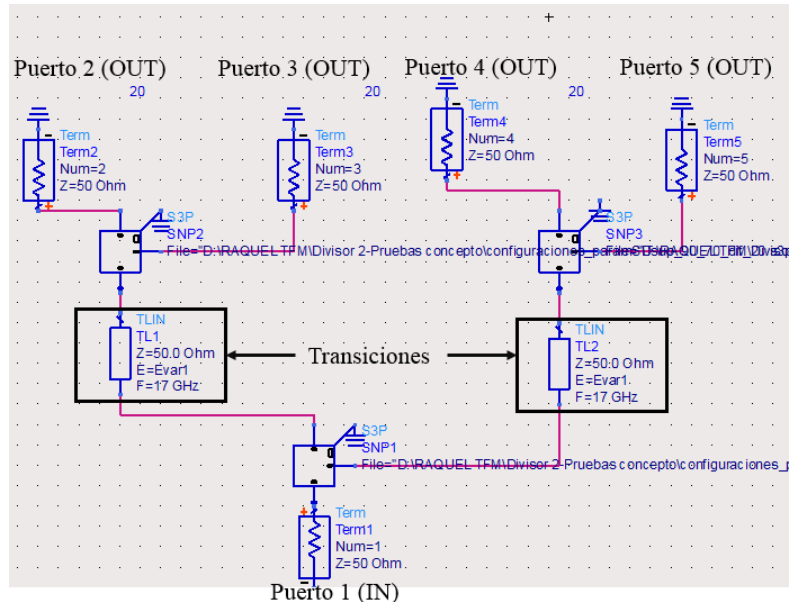


Figura H- 1 Ejemplo de estructura del modelo circuital para el estudio de las transiciones de la red 1

Ajustando estas transiciones se busca conseguir la mejor respuesta en banda en adaptación. Tras varias pruebas se ha comprobado que con un valor aproximado de -136° que equivale a reducir la distancia entre sendos divisores en 6.7mm, se consigue una respuesta óptima. Los resultados obtenidos de adaptación se pueden ver a continuación:

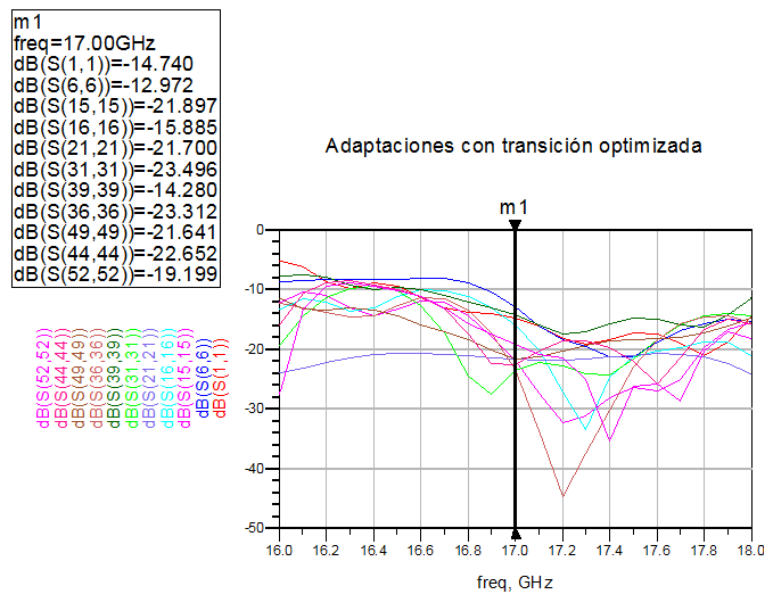


Figura H- 2 Adaptación optimizada con ADS para la red 1

Optimizada la estructura, se pasa a realizar el estudio de los valores de adaptación, fase y distribución de potencia para cada una de las configuraciones de tornillos con los desfases tanto progresivos como quasi-progresivos calculados para el divisor completo. En la Tabla se observa un resumen de los valores de desfase obtenidos tanto en ADS como en CST.

Tabla H- 1 Comparativa de resultados de desfase circuitales vs electromagnéticos del divisor completo de la red 1

Configuraciones	s21/s31		s31/s41		s41/s51	
	CST	ADS	CST	ADS	CST	ADS
0-0-0	0	-0.035	0	0.012	0	-0.035
20-20-20	22	21.6	20	21.37	19	19.408
50-50-50	48	47.37	61	61.09	50	49.8
70-70-70	65	66.54	66	64.76	70	69.27
120-120-120	117	116.48	125	110.47	116	116.48
30-20-30	26	25.59	19	25.67	22	19.41
40-30-15	41	25.57	37	18.94	18	3.9
50-40-30	47.5	100	46	100	25.5	25.59
50-40-50	47	47.33	42	44.82	47	47.37
70-70-50	69	69.27	63	62.94	50	49.8
90-80-70	90	90.81	72	66.56	66	63.76

Anexo I. Medida en transmisión de la antena 2

Para comprobar el funcionamiento de la red en transmisión se hizo uso del analizador de redes y el módulo de conectores diseñado en [2].

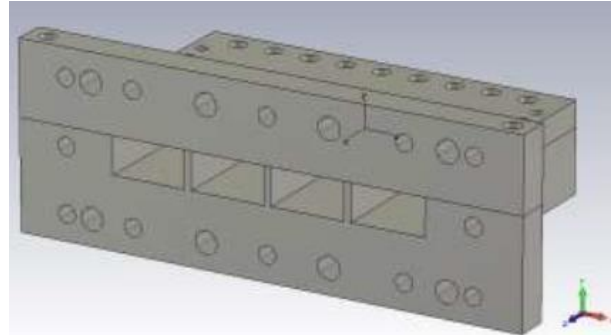


Figura I- 1 Módulo de medida de la red, extraído de [2]

MEDIDA DE LA RED

La medida de la red en transmisión se realiza conectando el puerto de entrada al analizador y a las salidas sendas cargas menos el puerto que se quiere medir. Al tener cuatro salidas, se conseguirán cuatro medidas para cada una de las configuraciones. Las medidas tomadas se exportaron en formato .s2p para poder comprobar mediante el programa ADS que su comportamiento en red es similar al simulado. En la tabla **Error! Reference source not found.** se pueden consultar los valores de fase conseguidos para cada configuración.

Tabla I- 1 Medidas de desfase en red del prototipo.

Configuración	Desfase medido en ADS (°)		
	S31-S21	S41-S31	S51-S41
0-0-0	-0.1	0.2	-0.05
20-20-20	26	-7.26	22.43
45-40-45	38.86	8.91	57.09
65-65-65	36.74	45.45	50.66
45-85-40	-27.51	-57.66	-37.73
65-55-45	41.26	49.32	55.18
85-90-85	64.32	75.83	59.32
130-100-130	-94.58	207.24	-118.31
130-145-130	-117.6	171.05	-121.9

En la medida de la transmisión, se encuentra el problema de la calibración que desvirtualiza la medida. A tratarse de una guía de onda es necesario utilizar una transición coaxial a guía de onda a la entrada, mientras que a la salida se utiliza el módulo de conectores, siendo éste una transición de guía de onda a coaxial. Sin embargo, el analizador de redes sólo puede calibrarse utilizando una de las dos tecnologías (o coaxial o guía).

Anexo J. Estudio de modos superiores en la red 2

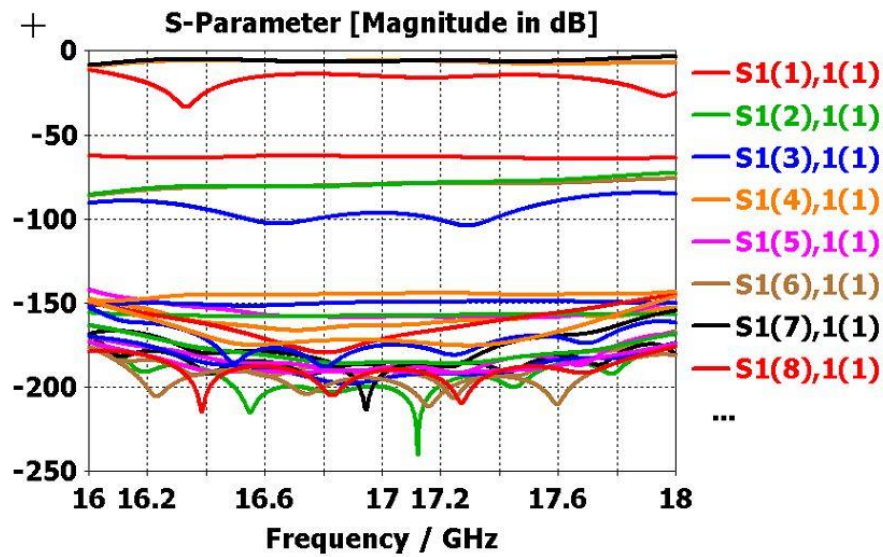


Figura J- 1 Modos superiores de la red 2 en la configuración 20-20-20

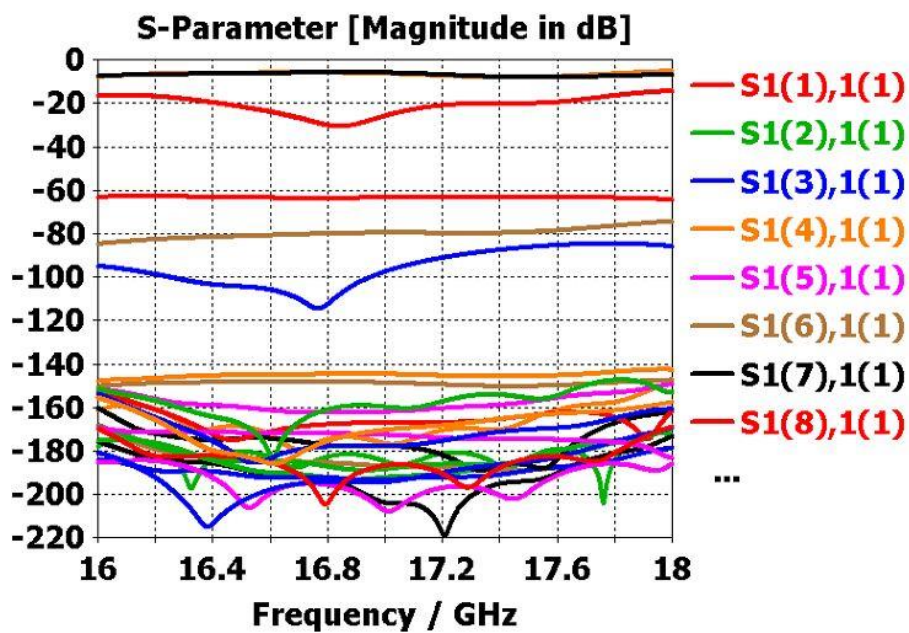


Figura J- 2 Modos superiores de la red 2 en la configuración 40-45-40

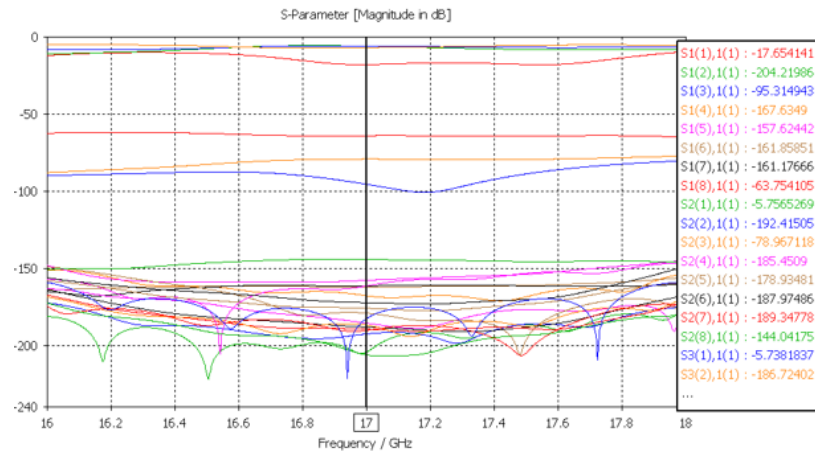


Figura J- 3 Modos superiores de la red 2 en la configuración 85-85-45

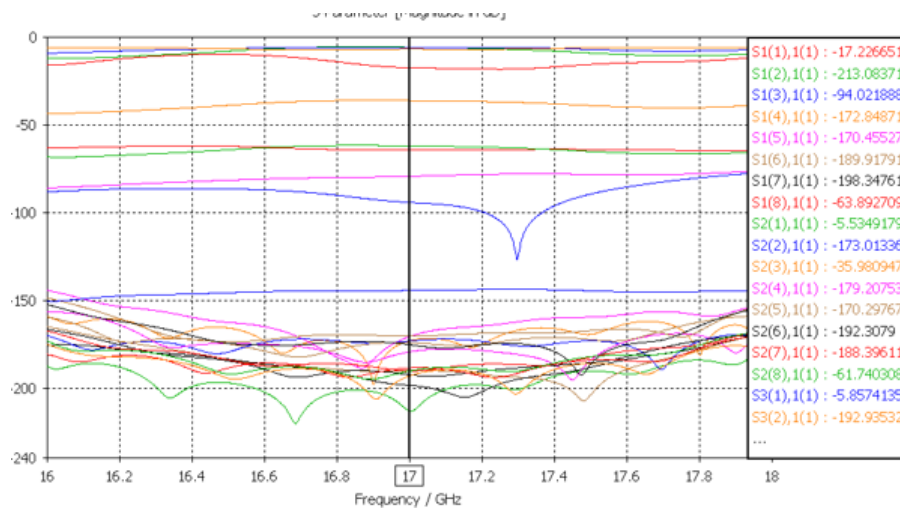


Figura J- 4 Modos superiores de la red 2 en la configuración 85-90-85

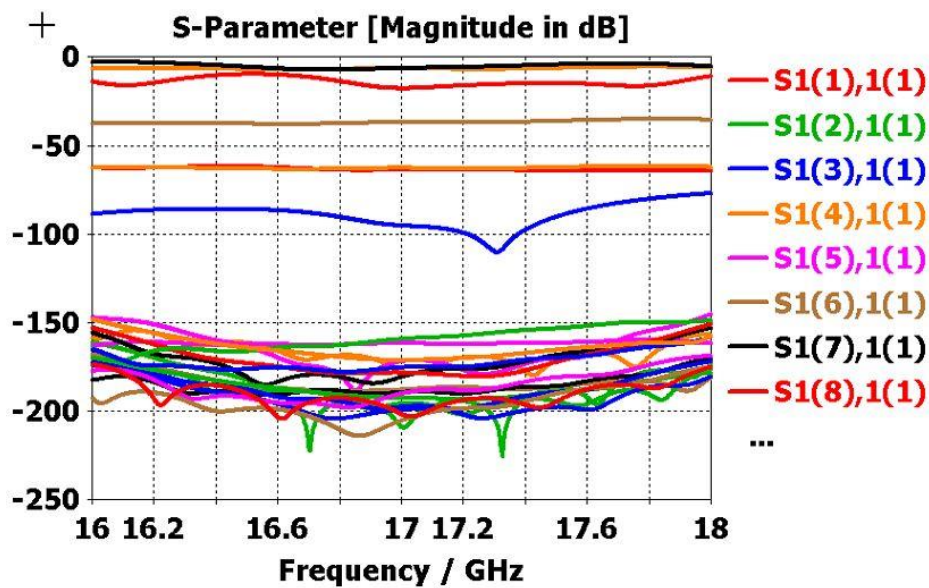


Figura J- 5 Modos superiores de la red 2 en la configuración 130-100-130

Anexo K. Estudio de modos superiores en la antena 2

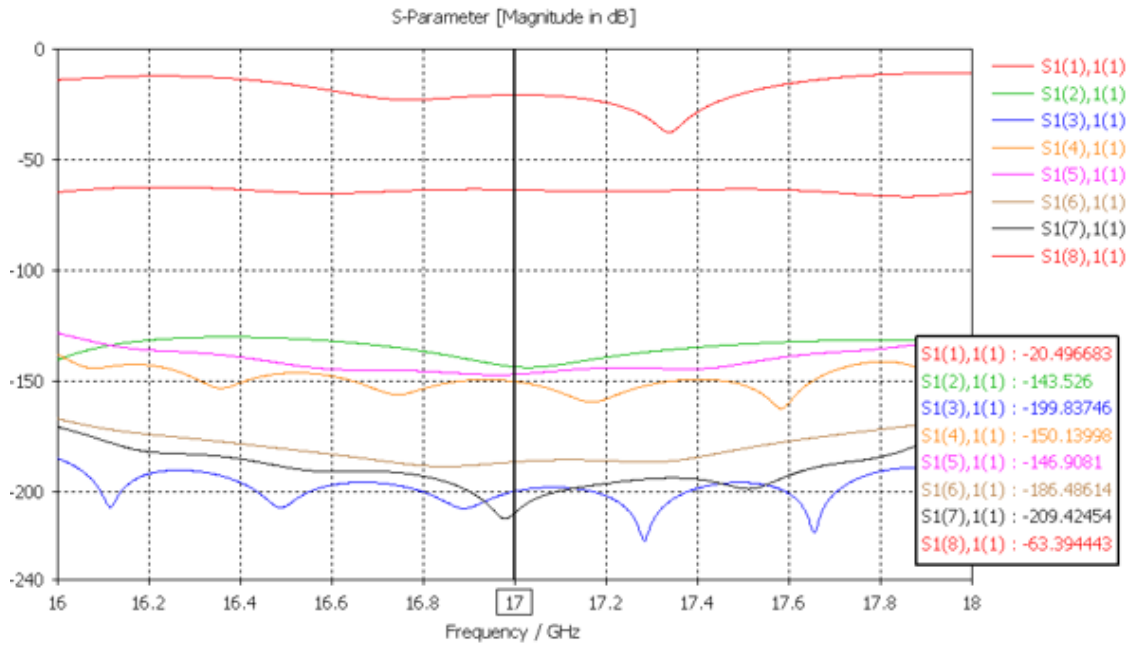


Figura K- 1 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 0-0-0

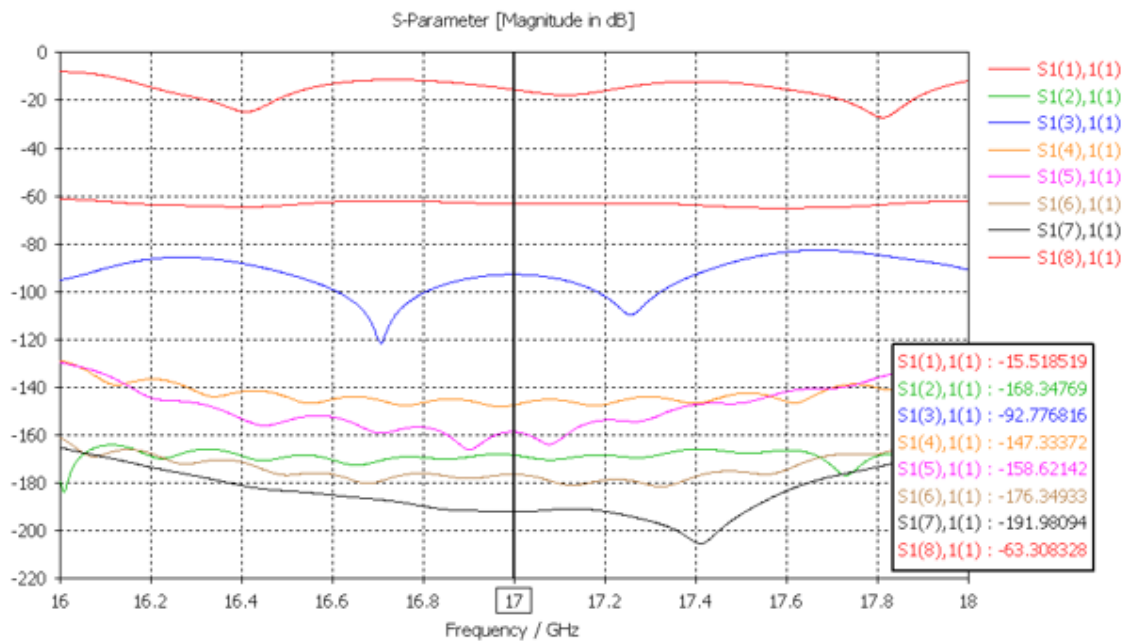


Figura K- 2 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 20-20-20

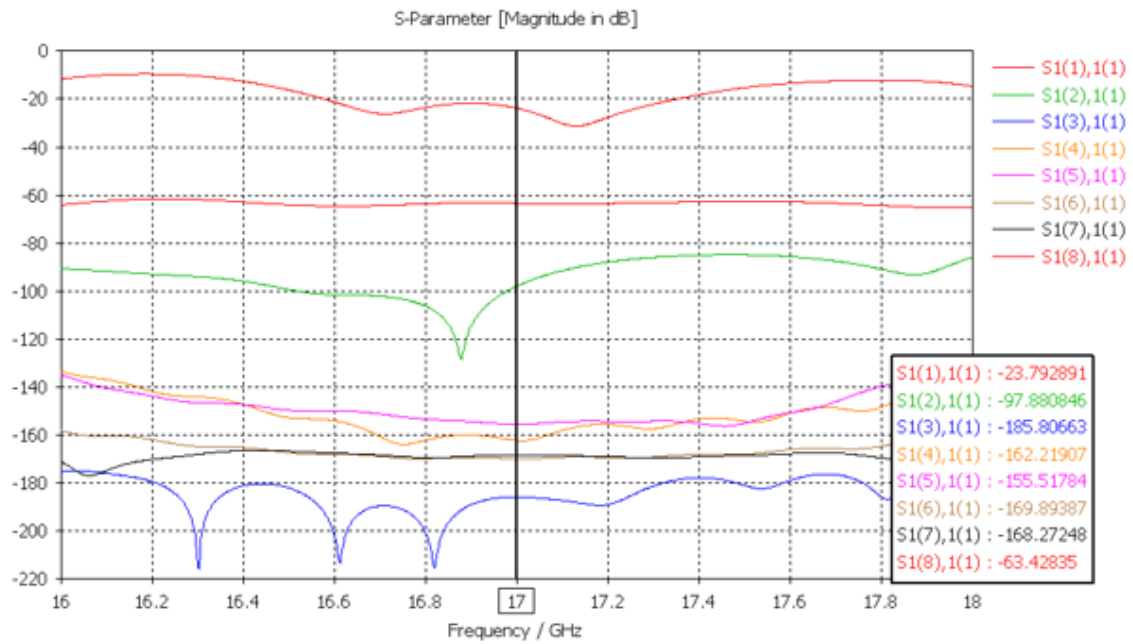


Figura K- 3 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 40-85-45

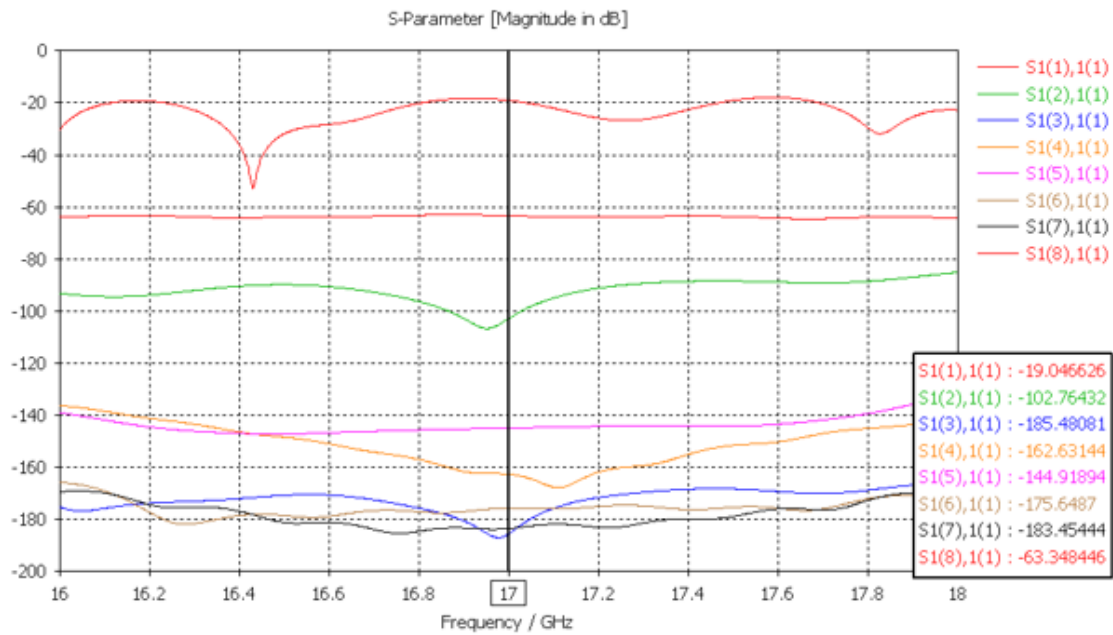


Figura K- 4 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 65-55-45

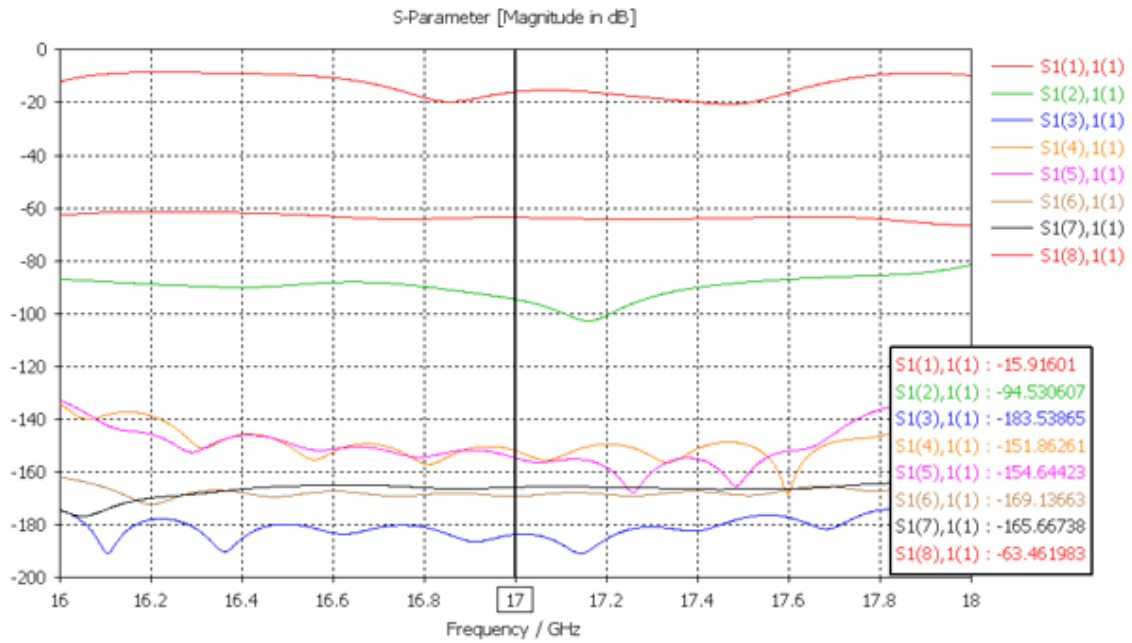


Figura K- 5 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 85-85-45

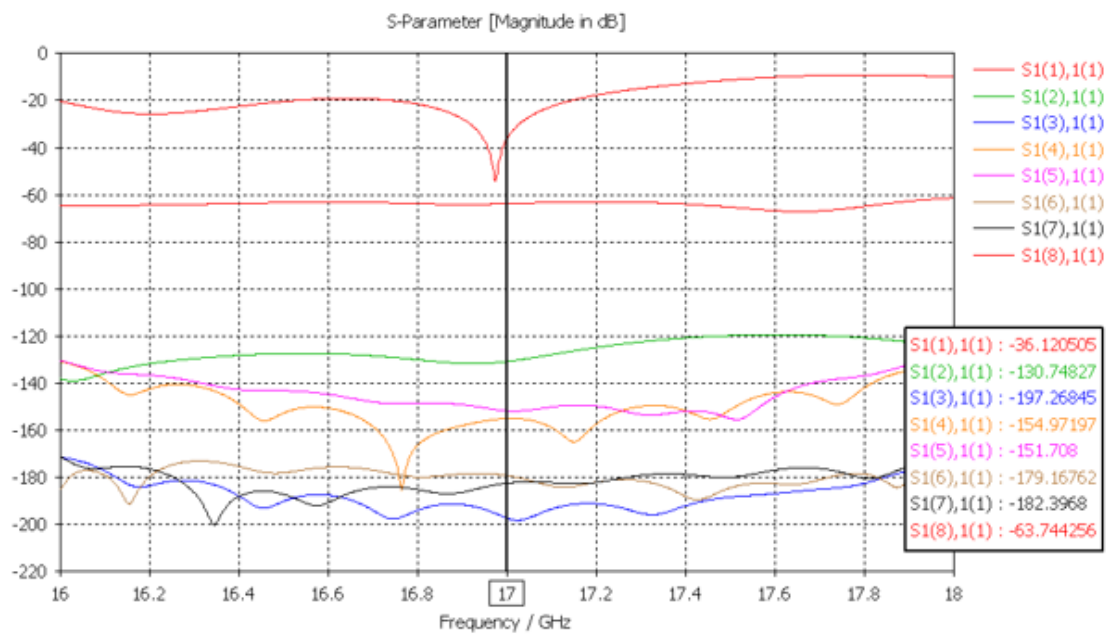


Figura K- 6 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 85-90-85

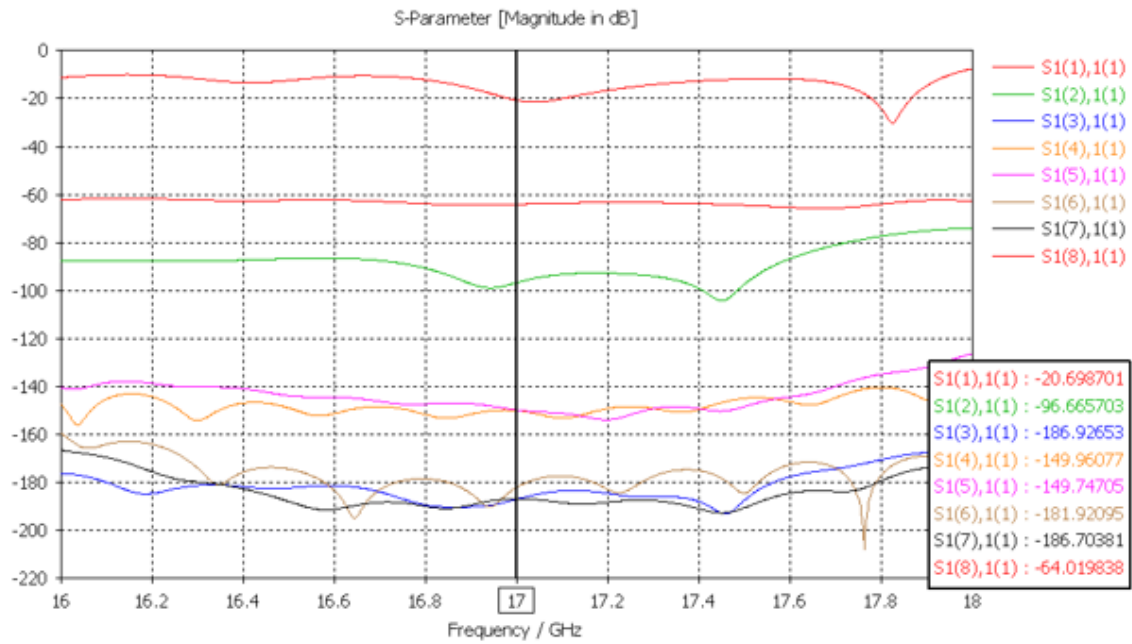


Figura K- 7 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 130-100-130

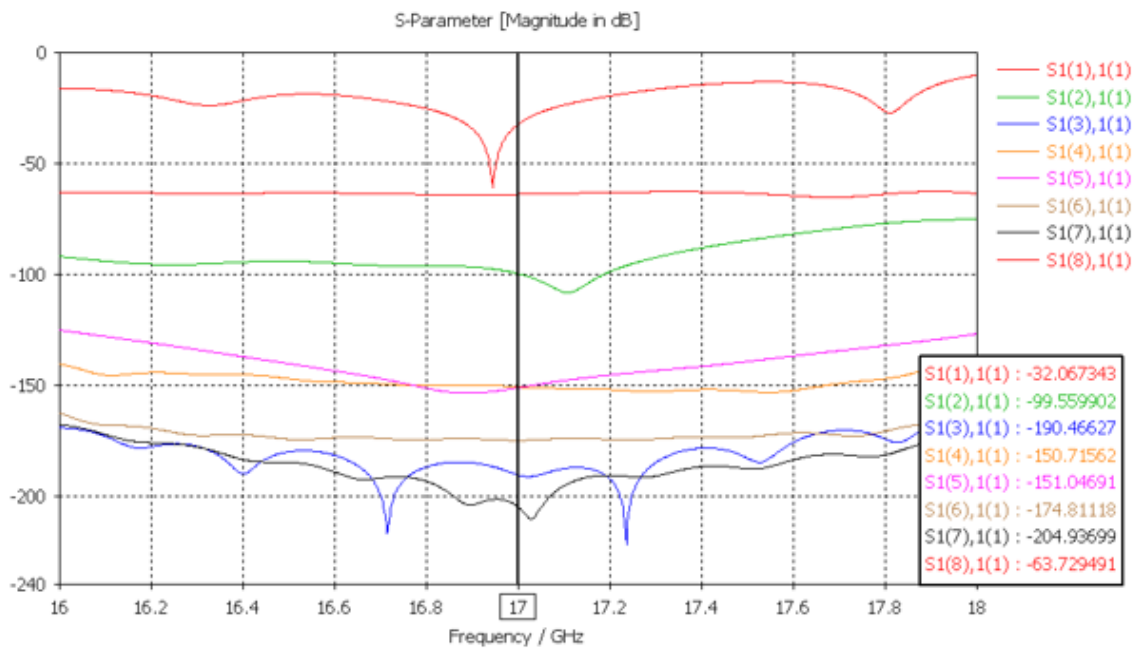


Figura K- 8 Modos superiores de la antena 2 para la configuración 130-145-130