

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Integración de desfasadores digitales  
en un array lineal de parches sobre  
guía de onda para comunicaciones por  
satélite DBS**

**Ingeniería de Telecomunicación**

**Adrián Cobos de la Cruz**

**Julio 2015**



# Integración de desfasadores digitales en un array lineal de parches sobre guía de onda para comunicaciones por satélite DBS

AUTOR: Adrián Cobos de la Cruz  
TUTOR: José Luis Masa Campos



**Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)**

<http://rfcas.eps.uam.es>

**Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones**

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Julio de 2015



# Agradecimientos

---

Como suele ser tradición, lo primero de todo quisiera agradecerle a mi tutor José Luis la oportunidad de realizar este PFC, y toda la ayuda y atención que me ha proporcionado. Me ha gustado mucho las tareas que he realizado, y todo lo que he aprendido durante este proyecto. Me prometió un proyecto con mucho “cacharero” del que me gusta, y no era una promesa falsa, porque cacharreo “tenido he”.

En segundo lugar está el segundo pilar de esta historia. Mi familia. Sin su apoyo no hubiera llegado ni al principio del camino. Mi madre y mi hermana, que sin conocer al profesor del que me quejaba, y sin tener ni idea del temario tan coñazo que debía estudiar, siempre se han mantenido en su postura de que era poco para mí, que yo podía con todo, y que me estaba quejando en demasía (y que era un pesao). A mi padre le dedico una línea especial, porque él sí que entendía algo de lo que estaba hablando cuando me quejaba. Siempre estaba dispuesto a ayudarme en lo que pudiera, o escuchar cualquier historia que necesitara contarle, ya fuese lo complejo de los punteros de C, o lo difícil que es chuparse el codo. Gracias familia, por vuestro apoyo, vuestra comprensión, vuestra ganas de levantarme cuando me caía...y vuestro dinero, porque esta carrera la habéis patrocinado vosotros ;-)

Quiero hacer una mención verdaderamente especial al caballero en la sombra, el tutor que no figura en los libros, el derramador de cafés y madrugador por excelencia. A ti moñoño, sin tus consejos y tu ayuda tampoco hubiera llegado demasiado lejos, porque siempre estabas disponible para resolver cualquier duda por estúpida y/o infantil que fuera, de ti he aprendido un \*\*\*\* de cosas. Pablo, eres un grande. Y has ligado con una jovencita, combo breaker, eso puntúa doble.

Todos los profesores que he tenido en la carrera también tienen su agradecimiento, pues aunque pueda odiaros o amaros, todos me habéis enseñado algo. Aunque claro está, los del RFcas son los que mejor he conocido; son aquellos que discutían durante los descansos sobre los líos de faldas del universo Marvel, si estamos solos en el universo, o quien era el siguiente en caer en el juego de tronos.

Pero con todo esto, los años en la universidad simplemente se calificarían como “buenos”, y debido a todos los compañeros con los que he tenido el lujo de compartir esta experiencia, puedo elevar esta distinción a “una etapa inolvidable”.

Por los ineptos del parchís y todas las clases “perdidas” en favor de un propósito más lúdico. Todas aquellas personas que he conocido gracias a la AET, y gracias a las cuales no se nos ha ido la cabeza cursando esta carrera. Los Rfcanianos y la gran variedad de momentos vividos en esta etapa final. Los compañeros de ofi, como Irene y Juana, que hacían que levantarse por las mañanas para ir a trabajar no fuera tan pesado.

Gracias al señor Palero por dejarme disfrutar de los momentos únicos haciendo prácticas y comiendo en su compañía en la AET.

Tres personas empezaron a la par el proyecto, y como debe ser, tres personas terminan a la par (la señorita delante, como debe ser). Muchas gracias Pili por tu alegría, infatigable buen humor, y tu sobredosis de prozac mañanera. Guli, ojala fueras mujer para poder expresarte mi “amor”, eres de las personas más simpáticas y divertidas que he tenido el honor de conocer Grrrrrr.

Manue, el divertí-amigo, compañero desde los inicios y persona incluso más grande que Pablo. Aunque tu sin jovencita, ni mayorcita...como yo.

Paula, Edu, Raquel, Diego, y Gustavo, aunque seáis de grado, tenéis un corazón y una energía más grande que mis 7 años en plan antiguo.

Ana, que aunque seas un PFC de Jorge y te hayamos visto poco el pelo porque preferías la biblioteca a nuestra compañía, también has sido una estupenda compañera de viaje. Y siendo de un año menos, a muchos nos has adelantado por la izquierda.

No quisiera acabar sin hacer referencia a otra persona a la que quizás deba parte de mi carrera, o como mínimo, alguna asignatura. Gracias Pencho por toda tu ayuda, eres el único e inimitable dueño de la cueva.

Los premios MVP de este PFC van para dos chicas muy especiales: mis ~~gramar nazis~~ apasionadas correctoras. Paula, que sin estar obligada a ello por ninguna religión de dioses antiguos o nuevos, se ofreció voluntaria para leer este documento y adecentarlo todo lo posible. Inés, mi hermana, que aunque obligada por un vínculo de sangre y una deuda contraída por todo lo que me he esforzado para que le gustaran las matemáticas, también revisó a fondo mi redacción, y en mayor o menor medida, me hizo seguir la reglas APA. Como ambas notareis, esta parte no está revisada por nadie, y es que “quiero jugar a un juego”, y es tan simple como que pueda acordarme de esos momentos de corrección cada vez que lea los fallos de este texto.

Una recomendación final al posible lector, ¿seguro que quieres echarle mano a este troncho de documento? Quizá sea más fácil que lo comentemos tú y yo, con una cerveza entre medias, así yo podre recordarlo, y a ti no se te hará tan pesado ¿no? Bueno, pues continúa bajo tu cuenta y riesgo, pero debes saber que quien lo redactó intentaba estar siempre de buen humor, y de ahí, que esta página termine con la siguiente cita celebre.

*“Durante toda mi vida solo he tenido un sueño: alcanzar todas mis metas” – Homer Simpson*

Ah! Y a mi amigo Rodri

**Adrián Cobos de la Cruz**  
**Julio 2015**

# RESUMEN

---

El objetivo de este proyecto fin de carrera es diseñar un sistema radiante por medio de un array lineal de parches sobre guía de onda rectangular con polarización lineal, que opere en la banda Ku (11 GHz a 12 GHz). Entre cada una de las líneas de transmisión que alimentan los parches del array se introducirá un desfasador digital con el objetivo de modificar la fase de la señal de radiofrecuencia, y obtener un apuntamiento del haz principal de radiación distinto del apuntamiento inicial del sistema.

Debido a la gran versatilidad de la estructura en guía de onda, se ha decidido centrar el estudio en la optimización del array lineal de parches, mediante la modificación de las líneas de transmisión que alimentan cada uno de los elementos para incluir el dispositivo desfasador.

Para cumplir este objetivo se diseñará toda la circuitería y acondicionamiento necesario para estos circuitos integrados, y se realizarán las modificaciones necesarias en las líneas de transmisión y los elementos radiantes para adaptarlos al nuevo funcionamiento.

Con el objetivo de controlar con mayor facilidad la estructura y poder programar el barrido electrónico del sistema radiante se implementará un sistema de control síncrono mediante un microcontrolador, utilizando el puerto serie del integrado.

Para obtener la estructura final se realizarán diferentes prototipos. Los prototipos serán diseñados de forma modular con motivo de facilitar su replicación en la estructura final sobre la guía de onda.

Estos prototipos se centraran en la construcción de un array de tres elementos que permita caracterizar el comportamiento de todos los componentes utilizados, y poder comprobar la interacción de los elementos de corriente continua con los dispositivos de radiofrecuencia, así como posibles interferencias y efectos de acoplos mutuos entre los elementos radiantes.

Todos los circuitos fabricados y montajes serán llevados a cabo en el laboratorio de circuitos impresos de la Escuela Politécnica Superior (EPS) de la UAM, y serán medidos en la Cámara Anecoica situada en la EPS de la UAM.

La estructura de tres elementos diseñada y construida permite un apuntamiento del haz principal de radiación, con una imprecisión en la dirección de apuntamiento debida al ensanchamiento del haz principal de radiación.

## **PALABRAS CLAVE**

Antena, array, parche, desfasador, línea de transmisión, variación de fase, ganancia, diagrama de radiación, circuito, diseño, reflexión, transmisión, pérdidas, adaptación, sustratos, estructura, analizador de redes, cámara anecoica.



# ABSTRACT

---

The objective of this final Project is to design a radiant system using a linear phased patch array over a rectangular waveguide, with linear polarization and operating in the lower Ku band (11 GHz to 12 GHz). Between each of the transmission lines that feed the patches, a digital phase shifter will be introduced to modify the phase of the signal, and to be able to aim the main radiation lobe at different radiation angles.

Due to the versatility of waveguide structure, the study will focus on optimizing the linear patch array through the modification of the transmission lines that provide power to all the array elements, and to include the digital phase shifter device.

To fulfill this objective, signal conditioning circuitry necessary for these integrated circuits will be designed, and modifications will be performed on transmission lines and radiant elements to adapt them to the new functioning.

In order to facilitate the programming of the electronic sweep in the radiant system, a synchronous control through series port of the integrated circuit will be implemented.

To obtain the final structure different prototypes will be designed. These structures will be designed in a modularly way in order to facilitate replication in the final structure over waveguide.

These prototypes will center on the construction of a three-element array that allows to describe components behavior and interference effect between direct current elements and radio frequency devices, as well as possible interferences and coupling effects between the radiating elements.

All circuits and fabricated assemblies shall be carried out in the printed circuit laboratory at Escuela Politécnica Superior (EPS) of the UAM, and it will be measured in the Anechoic Chamber located on the EPS of at UAM.

The designed and manufactured three-element structure provides a main radiation lobe scanning, with imprecisions in its aiming direction due to the expansion of the main radiation lobe.

## **KEY WORDS**

Antenna, array, patch, digital shifter, transmission line, phase variation, gain, radiation pattern, circuit, design, reflection, transmission, losses, adaptation, substrate, structure, networks analyzer, anechoic chamber.



# 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 .....	5
2.1	Definición general de una antena.....	5
2.1.1	Banda de frecuencias.....	5
2.1.2	Tipos de antenas .....	6
2.1.2.1	Antenas de elementos .....	6
2.1.2.2	Antenas de apertura .....	6
2.1.2.3	Antenas de onda progresiva.....	7
2.1.2.4	Antenas de array .....	7
2.2	Parámetros para la caracterización de una antena .....	8
2.2.1	Impedancia de entrada .....	8
2.2.2	Adaptación de impedancias .....	8
2.2.2.1	Relación de onda estacionaria (ROE o SWR).....	9
2.2.3	Parámetros S (parámetros de dispersión) .....	10
2.2.4	Diagramas de radiación .....	12
2.2.4.1	Parámetros de un diagrama de radiación.....	13
2.2.4.2	Tipos de diagramas de radiación .....	14
2.2.5	Potencia de radiación, ganancia y directividad, y eficiencia.....	14
2.2.5.1	Potencia de radiación.....	14
2.2.5.2	Directividad y ganancia.....	15
2.2.5.3	Eficiencia .....	15
2.2.6	Polarización .....	15
2.2.7	Ancho de banda .....	17
2.3	Guías de onda .....	17
2.3.1	Modos de propagación .....	17
2.3.1.1	Frecuencia de corte.....	18
2.3.2	Tipos de guía de onda.....	19
2.3.2.1	Guía de onda rectangular .....	19
2.3.2.2	Guía de onda circular.....	20
2.3.3	Alimentación mediante conector coaxial .....	21
2.4	MicroStrip.....	22
2.4.1	Alimentación mediante coaxial .....	23
2.4.2	Parches.....	24
2.4.2.1	Parche rectangular .....	25
2.4.2.2	Parche circular .....	25
2.4.2.3	Alimentación del parche mediante línea microstrip.....	26
2.4.2.4	Alimentación mediante guía de onda .....	26
2.4.2.5	Estructura de doble parche apilado.....	27
2.5	Arrays de antenas.....	28
2.5.1	Phased arrays .....	29
2.6	Microcontroladores.....	29
2.6.1	Familia de microcontroladores AVR de Atmel©.....	30
2.6.2	Protocolo bus SPI (Serial Peripheral Interface).....	31
2.7	Herramientas de diseño y simulación utilizadas.....	32

2.7.1 AutoCAD.....	32
2.7.2 CST Microwave Studio .....	32
2.7.3 Advanced design System (ADS) .....	33
2.7.4 Atmel Studio 6.....	34
3 Evaluación previa .....	35
3.1 Introducción.....	35
3.2 Circuito de desfaseador individual (desfaseador de evaluación) .....	35
3.2.1 Pruebas de desfase mediante analizador de redes .....	35
3.2.2 Pruebas de radiación mediante cámara anecoica.....	37
3.2.3 Comprobación de estado final .....	39
3.3 Circuito conjunto de tres desfaseadores .....	40
3.3.1 Comprobación de estado .....	40
3.3.2 Pruebas de desfase mediante analizador de redes .....	41
3.3.2.1 Desfaseador número uno .....	41
3.3.2.2 Desfaseador número dos .....	43
3.4 Conclusión.....	44
4 Diseño y caracterización de placa de evaluación .....	47
4.1 Introducción.....	47
4.2 Diseño y fabricación.....	47
4.2.1 Diseño de los circuitos impresos .....	47
4.2.1.1 Circuito de evaluación sobre chasis. Versión 1 .....	48
4.2.1.2 Circuito de evaluación sobre chasis. Versión 3 .....	49
4.2.1.3 Circuito de evaluación sobre chasis. Versión 5 y versión 7 .....	51
4.2.2 Componentes utilizados.....	52
4.2.2.1 Chasis de soporte de aluminio .....	53
4.2.2.2 Desfaseador digital .....	54
4.2.2.3 Programador para la familia MegaAVR de Atmel.....	55
4.2.2.4 Circuitería de corriente continua .....	56
4.2.3 Montaje: fabricación, soldadura, y conexionado.....	56
4.2.3.1 Vías tradicionales .....	57
4.2.3.2 Vías para el plano de masa del desfaseador. ....	58
4.3 Comprobaciones y medidas.....	59
4.3.1 Comprobaciones eléctricas .....	60
4.3.1.1 Circuito de control paralelo .....	60
4.3.1.2 Circuito de control serie. Placa puente .....	60
4.3.1.3 Circuito de evaluación sobre chasis. Placa 1 .....	60
4.3.1.4 Circuito de evaluación sobre chasis. Placa 2, 3 y 4 .....	61
4.3.2 Medidas mediante analizador de redes.....	61
4.3.2.1 Circuito de evaluación sobre chasis. Placa 2.....	62
4.3.2.2 Circuito de evaluación sobre chasis. Placa 3.....	64
4.3.2.3 Circuito de evaluación sobre chasis. Placa 4.....	66
4.3.3 Medidas de radiación en la cámara anecoica.....	69
4.3.3.1 Diagramas de radiación. Placa 3.....	70
4.3.3.2 Diagramas de radiación. Placa 4.....	73
4.3.3.3 Reflexión de la estructura completa. Placa 4.....	78
4.4 Conclusion .....	81
5 Diseño de array de tres desfaseadores y tres parches independientes .....	83
5.1 Introducción.....	83
5.2 Descripción de funcionamiento previsto .....	83
5.3 Diseño y fabricación.....	84

5.3.1	Diseño de los circuitos impresos .....	84
5.3.1.1	Circuito array de tres desfasadores .....	85
5.3.1.2	Circuito de control serie. Placa Puente.....	88
5.3.2	Componentes utilizados.....	88
5.3.2.1	Conectores y Universal Text Fixture.....	89
5.3.2.2	Chasis de soporte en aluminio .....	89
5.3.2.3	Circuitería de corriente continua .....	90
5.3.3	Montaje: fabricación, soldadura, y conexionado.....	91
5.3.3.1	Conexionado de las clemas de pines 1x7 .....	91
5.4	Comprobaciones y medidas.....	92
5.4.1	Comprobaciones eléctricas .....	93
5.4.1.1	Circuito array de tres desfasadores .....	93
5.4.1.2	Circuito de control serie. Placa puente .....	93
5.4.2	Medidas mediante analizador de redes .....	94
5.4.2.1	Circuito array de tres desfasadores. Primer desfasador .....	95
5.4.2.2	Circuito array de tres desfasadores. Segundo desfasador (central) .....	98
5.4.2.3	Circuito array de tres desfasadores. Tercer desfasador .....	100
5.4.2.4	Comparativa de desfasadores .....	101
5.4.3	Medidas de radiación en la cámara anecoica.....	104
5.4.3.1	Diagramas de radiación. Primer desfasador .....	106
5.4.3.2	Diagrama de radiación. Segundo desfasador (central) .....	109
5.4.3.3	Diagramas de radiación. Tercer desfasador.....	111
5.4.3.4	Reflexión de la estructura desfasador y parche .....	113
5.5	Conclusión.....	114
6	Diseño de array conjunto de tres desfasadores y tres parches .....	117
6.1	Introducción.....	117
6.2	Diseño y fabricación .....	117
6.2.1	Diseño de los circuitos impresos .....	117
6.2.1.1	Circuito array desfasadores y tres parches .....	117
6.2.2	Componentes utilizados.....	119
6.2.2.1	Chasis de soporte en aluminio .....	119
6.2.2.2	Circuitería de corriente continua .....	120
6.2.3	Montaje: fabricación, soldadura, y conexionado.....	121
6.2.3.1	Preparación de conectores verticales SMA coaxial.....	122
6.3	Comprobaciones y medidas.....	123
6.3.1	Comprobaciones eléctricas .....	123
6.3.2	Medidas de radiación en la cámara anecoica.....	124
6.3.2.1	Diagramas de radiación. Primer desfasador .....	125
6.3.2.2	Diagramas de radiación. Segundo desfasador (central).....	128
6.3.2.3	Diagramas de radiación. Tercer desfasador.....	130
6.3.2.4	Reflexión de la estructura desfasador - parche .....	133
6.4	Conclusión.....	135
7	Barrido electrónico .....	137
7.1	Introducción.....	137
7.2	Estimación del campo radiado.....	137
7.2.1	Estimación para array de tres elementos .....	138
7.2.2	Estimación para array de dieciséis elementos .....	144
7.3	Medidas de radiación en cámara anecoica .....	149
7.3.1	Array de tres desfasadores y tres parches independientes.....	150
7.3.2	Array conjunto de tres desfasadores y tres parches .....	155

7.4 Conclusión.....	160
8 Conclusiones finales y trabajo futuro .....	161
8.1 Conclusiones finales .....	161
8.2 Argumentación de la no finalización de la totalidad del PFC .....	162
8.3 Trabajo futuro .....	163
Referencias .....	165
Anexos.....	I
A Taller de circuitos impresos de la EPS .....	I
B Medidas en cámara anecoica de la EPS.....	VII
C Planos de mecanizados y circuitos impresos.....	XV
D Manual de instalación del interfaz.....	XXI

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Antena helicoidal (Izq.) y antena Yagui de 10 elementos (Dcha.)	6
Figura 2.2 Antena parabólica (Izq.) y antena de bocina (Dcha.)	7
Figura 2.3 Array de parches circular (Izq.) y array de parches lineal (Dcha.)	7
Figura 2.4 Esquema de conexión de antena y generador mediante línea de transmisión de impedancia característica $Z_0$	9
Figura 2.5 Dibujo esquemático de parámetros S en circuito de dos puertas	10
Figura 2.6 Matriz de parámetros S genérica para un circuito de "n" puertas	11
Figura 2.7 Sistema de coordenadas esféricas	12
Figura 2.8 Ejemplo de diagramas de radiación: Plano E (Izq.) y Plano H (Dcha.)	13
Figura 2.9 Diagramas de radiación 2D: Polares (Izq.) y Cartesianas (Dcha.)	14
Figura 2.10 Tipos de diagramas de radiación (representación 3D)	14
Figura 2.11 Polarización lineal	16
Figura 2.12 Polarización circular	16
Figura 2.13 Polarización elíptica	16
Figura 2.14 Carta de propagación de modos genérica	19
Figura 2.15 Guía de onda rectangular genérica ( $a > b$ )	19
Figura 2.16 Guía de onda circular de radio interior "a"	20
Figura 2.17 Atenuación de los modos de una guía de onda circular de "a" de 2,54 mm	21
Figura 2.18 Esquema de montaje para una alimentación de guía de onda rectangular mediante conector coaxial SMA	21
Figura 2.19 Composición de una línea microstrip y formación de líneas de campo	22
Figura 2.20 Constante dieléctrica relativa de una línea microstrip cuando $t \rightarrow 0$	23
Figura 2.21 Impedancia característica de una línea microstrip	23
Figura 2.22 Alimentación de microstrip mediante coaxial. Coaxial vertical (Izq) y coaxial horizontal (Dch)	24
Figura 2.23 Ejemplo de parche cuadrado en microstrip	24
Figura 2.24 Alimentación de parche rectangular mediante línea microstrip. Alimentación directa (Izq.) y alimentación con inserción (Dcha.)	26
Figura 2.25 Alimentación de array de parches mediante líneas de acoplo desde una guía de onda	27
Figura 2.26 Estructura de doble parche apilado	27
Figura 2.27 Microcontrolador en encapsulado TQFP de 80 pines.	30
Figura 2.28 Esquema de comunicación protocolo bus SPI	31
Figura 2.29 Entorno de trabajo de AutoCAD	32
Figura 2.30 Logo corporativo CST (Izq.) y entorno de trabajo del programa (Dcha.)	33
Figura 2.31 Entorno de trabajo de ADS	33
Figura 2.32 Entorno de trabajo de Atmel Studio 6.1	34
Figura 3.1 Desfasador de evaluación sobre chasis metálico para medidas	35
Figura 3.2 Parámetros $S_{11}$ y $S_{21}$ . Circuito de desfasador de evaluación	36
Figura 3.3 Parámetro $S_{21}$ (fase). Modificación de la fase de la señal RF.	37
Figura 3.4 Montaje típico para medidas en la cámara anecoica	37
Figura 3.5 Diagramas de radiación del desfasador de evaluación	39
Figura 3.6 Imagen ampliada de los componentes de la placa de evaluación	40
Figura 3.7 Circuito impreso de 3 desfasadores	40
Figura 3.8 Parámetros $S_{11}$ y $S_{21}$ desfasador 1 del array de 3 elementos	42
Figura 3.9 Parámetro $S_{21}$ (fase). Desfasador 1 de array de tres	42
Figura 3.10 Parámetros S desfasador 1 array de tres	43
Figura 3.11 Circuito impreso conjunto de 3 desfasadores y 3 parches	44
Figura 4.1 Circuito de evaluación. Versión 1	48
Figura 4.2 Circuito de evaluación. Versión 3. Placa de control (Izq.) y placa de RF (Dcha.)	50
Figura 4.3 Circuitos de control para versión 5 y 7 en Altium. Control paralelo (Izq.) y control serie, placa puente (Dcha.)	51
Figura 4.4 Circuito de evaluación. Versión 5 (Izq.) y versión 7 (Dcha.)	52
Figura 4.5 Modificaciones del chasis metálico. Antes (Izq.) y después (Dcha.)	53
Figura 4.6 Dibujo esquemático del desfasador y pines críticos.	54

Figura 4.7 Tabla de verdad del desfasador digital	55
Figura 4.8 Esquema de tiempos del funcionamiento serie	55
Figura 4.9 Interfaz de ADS para obtención de gerbers	56
Figura 4.10 Remachadora y remaches/vías	57
Figura 4.11 Esquema de montaje para el plano de masa del desfasador	59
Figura 4.12 Circuito de evaluación con control paralelo sobre Universal Text Fixture	61
Figura 4.13 Kit TRL creado para el diseño 7, y utilizado en la placa 3	62
Figura 4.14 Parámetros $S_{21}$ Placa 2 con control paralelo	63
Figura 4.15 Despliegue de equipos para verificación del control serie	64
Figura 4.16 Parámetros $S_{11}$ Módulo. Placa 3, ambos controles.	65
Figura 4.17 Parámetros $S_{21}$ módulo. Placa 3, ambos controles	65
Figura 4.18 Parámetros $S_{21}$ fase. Placa 3, control Serie	66
Figura 4.19 Parámetros $S_{11}$ módulo. Placa 4, ambos controles	67
Figura 4.20 Parámetros $S_{21}$ módulo. Placa 4, ambos controles	67
Figura 4.21 Parámetros $S_{21}$ fase. Placa 4, control serie	68
Figura 4.22 Montaje típico para medida en radiación en cámara anecoica	69
Figura 4.23 Diagramas de radiación. Placa 3 Control paralelo. Todos los estados	70
Figura 4.24 Diagramas de radiación. Placa 3 control paralelo. Estados significativos.	71
Figura 4.25 Ejemplo de montaje para pruebas experimentales realizadas con el analizador de redes sobre el conjunto desfasador sobre chasis – parche central.	72
Figura 4.26 Diagramas de radiación. Placa 3 control serie. Todos los estados	73
Figura 4.27 Diagramas de radiación. Placa 4 control paralelo. Todos los estados	74
Figura 4.28 Diagramas de radiación. Placa 4 control paralelo. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz	75
Figura 4.29 Diagramas de radiación. Placa 4 control serie. Todos los estados	76
Figura 4.30 Diagramas de radiación. Placa 4 control serie. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz	77
Figura 4.31 Parámetros $S_{11}$ (reflexión) de los tres parches separados del desfasador	79
Figura 4.32 Esquema en ADS para estimación de reflexión (Sup.) y montaje típico para medida de reflexión real (Inf.)	79
Figura 4.33 Parámetros $S_{11}$ (reflexión). Estimación de reflexión en ADS (Sup.) y medida de reflexión real (Inf.)	80
Figura 4.34 Montaje típico de circuito de evaluación. Control Serie (Izq.) y control paralelo (Dcha.)	81
Figura 5.1 Array de tres elementos, proyecto previo. Vista general (Izq.) y elementos clave de radiofrecuencia (Dcha.)	84
Figura 5.2 AVR y circuito de control serie montado sobre placa puente	85
Figura 5.3 Circuito de array de 3 desfasadores. Zonas críticas.	86
Figura 5.4 Circuito de array de 3 desfasadores. Esquema de conexionado	87
Figura 5.5 Control serie, placa puente modificada	88
Figura 5.6 Conector vertical de alma cilíndrica.	89
Figura 5.7 Diseño de soporte metálico para circuito de tres desfasadores. Diseño previo (Izq.) y resultado tras re-mecanizado (Dcha.)	90
Figura 5.8 Soldadura de circuito de tres desfasadores mediante microscopio	91
Figura 5.9 Agrupación de cables para conexionado entre desfasadores.	92
Figura 5.10 Conexionado permanente entre desfasadores.	92
Figura 5.11 Propagación de la “palabra” de control en un único desfasador	94
Figura 5.12 Propagación de la “palabra” de control para tres desfasadores.	94
Figura 5.13 Montaje típico para pruebas, mediante analizador de redes, del circuito array de tres desfasadores. Medida sobre tercer desfasador	95
Figura 5.14 Circuito de array de tres desfasadores. Vista frontal y trasera.	96
Figura 5.15 Parámetros $S_{11}$ y $S_{21}$ módulo. Desfasador 1. Array de tres desfasadores	96
Figura 5.16 Parámetro $S_{21}$ fase. Desfasador 1. Array de tres desfasadores	97
Figura 5.17 Parámetros $S_{11}$ y $S_{21}$ módulo. Desfasador 2. Array de tres desfasadores	98
Figura 5.18 Parámetro $S_{21}$ fase. Desfasador 2. Array de tres desfasadores	99
Figura 5.19 Parámetros $S_{11}$ y $S_{21}$ módulo. Desfasador 3. Array de tres desfasadores	100
Figura 5.20 Parámetro $S_{21}$ fase. Desfasador 3. Array de tres desfasadores	101
Figura 5.21 Parámetros $S_{11}$ módulo. Comparativa. Estados críticos	102
Figura 5.22 Parámetros $S_{21}$ módulo. Comparativa. Estados críticos	103

Figura 5.23 Montaje típico para medida en cámara anecoica del array de tres parches + circuito de tres desfasadores	105
Figura 5.24 Latiguillos normales (Superior), y acodados a 90° (Inferior).	105
Figura 5.25 Diagramas de radiación. Desfasador 1. Array de tres desfasadores más parches independientes. Todos los estados	106
Figura 5.26 Diagramas de radiación. Desfasador 1. Array de tres desfasadores más parches independientes. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz	108
Figura 5.27 Diagramas de radiación. Desfasador 2. Array de tres desfasadores más parches independientes. Todos los estados	109
Figura 5.28 Diagramas de radiación. Desfasador 1. Array de tres desfasadores más parches independientes. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz	110
Figura 5.29 Diagramas de radiación. Desfasador 3. Array de tres desfasadores más parches independientes. Todos los estados	111
Figura 5.30 Diagramas de radiación. Desfasador 3. Array de tres desfasadores más parches independientes. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz	112
Ilustración 5.31 Parámetros $S_{11}$ (reflexión) para los tres desfasadores del array de tres desfasadores más parches independientes	114
Figura 6.1 Circuito array de tres desfasadores y tres parches inferiores	118
Figura 6.2 Diseño de soporte metálico para circuito de tres desfasadores. Errores cometidos	119
Figura 6.3 Reparación de taladros mediante helicoil. Imagen extraída de HELICOIL® tangfree	120
Figura 6.4 Daños sufridos en el tercer parche durante el proceso de fabricación	121
Figura 6.5 Circuito de tres desfasadores y tres parches inferiores (Dcha.), capa de foam (Sup.) y circuito de parches superiores (Inf.)	121
Figura 6.6 Corte del recubrimiento de teflón del conector SMA	122
Figura 6.7 Corte y limado del conductor interior del conector SMA	123
Figura 6.8 Montaje típico en cámara anecoica del array conjunto de tres desfasadores y tres parches.	124
Figura 6.9 Diagramas de radiación. Desfasador 1. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches. Todos los estados	125
Figura 6.10 Diagramas de radiación. Desfasador 1. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz	126
Figura 6.11 Desfase del primer desfasador. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches	127
Figura 6.12 Diagramas de radiación. Desfasador 2. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches. Todos los estados	128
Figura 6.13 Diagramas de radiación. Desfasador 2. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz	129
Figura 6.14 Desfase del segundo desfasador. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches.	130
Figura 6.15 Diagramas de radiación. Desfasador 3. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches. Todos los estados	131
Figura 6.16 Diagramas de radiación. Desfasador 3. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz	132
Figura 6.17 Desfase del tercer desfasador. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches.	133
Figura 6.18 Parámetros $S_{11}$ (reflexión) para los tres desfasadores del array conjunto de tres desfasadores y tres parches	134
Figura 7.1 Ejemplo de diagrama de radiación con la aparición de grating lobes. Imagen extraída de "Computational Electromagnetics and Antennas Research Laboratory"	137
Figura 7.2 Diagramas de radiación de apuntamiento estimado. Apuntamiento de 0°, 5°, 10°, 15° y 20° respectivamente	141
Figura 7.3 Comparativa de configuraciones de estados para una ausencia de desfase progresivo (apuntamiento de 5°) en array de tres elementos	142
Figura 7.4 Comparativa de configuraciones de estados para desfase progresivo de 22.5° (apuntamiento de 5°) en array de tres elementos	143
Figura 7.5 Apuntamiento estimado para array de tres elementos	143
Figura 7.6 Diagramas de radiación de apuntamiento estimado en array de 16 elementos. Apuntamiento de 0°, 5°, 10°, 15° y 20° respectivamente	146
Figura 7.7 Comparativa de configuraciones de estados para una ausencia de desfase progresivo en array (apuntamiento de 0°) de dieciséis elementos	147

Figura 7.8 Comparativa de configuraciones de estados para desfase progresivo de 22.5° (apuntamiento de 5°) en array de dieciséis elementos	148
Figura 7.9 Apuntamiento estimado para array de dieciséis elementos	148
Figura 7.10 Red de alimentación 1 a 3 construida en tecnología microstrip	149
Figura 7.11 Conexión de array de tres desfasadores y tres parches independientes y red de alimentación en microstrip	150
Figura 7.12 Comparativa de configuraciones de estados en array de tres desfasadores y tres parches independientes.	151
Figura 7.13 Apuntamiento medido en array de tres desfasadores y tres parches independientes.	152
Figura 7.14 Ganancia medida para cada configuración de estados en array de tres desfasadores y tres parches independientes.	153
Figura 7.15 Ganancia medida según desfases progresivos en array de tres desfasadores y tres parches independientes.	153
Figura 7.16 Parámetro $S_{11}$ en array de tres desfasadores y tres parches independientes.	154
Figura 7.17 Conexión de array conjunto de tres desfasadores y tres parches y red de alimentación en microstrip	155
Figura 7.18 Comparativa de configuraciones de estados en array conjunto de tres desfasadores y tres parches.	156
Figura 7.19 Apuntamiento medido en array conjunto de tres desfasadores y tres parches	157
Figura 7.20 Ganancia medida para cada configuración de estados en array conjunto de tres desfasadores y tres parches.	158
Figura 7.21 Ganancia medida según desfases progresivos en array conjunto de tres desfasadores y tres parches.	158
Figura 7.22 Parámetro $S_{11}$ en array conjunto de tres desfasadores y tres parches.	159
Figura A.1 Flujo de trabajo para construcción en taller de circuitos impresos	I
Figura A.2 Herramientas de la fresadora LPKF, y función	II
Figura A.3 Fresadora de control numérico LPKF	III
Figura A.4 Fresadora de control numérico OPTIMUN	III
Figura A.5 Microscopio Motic del taller de circuitos impresos	IV
Figura A.6 Estación de nano-soldadura y herramienta de soldadura por aire caliente	V
Figura A.7 Cámara anecoica. Grupo de investigación RFcas	VII
Figura A.8 Dibujo esquemático del funcionamiento de la cámara anecoica	VIII
Figura A.9 Analizador de redes Agilent E5071C propiedad de la EPS	VIII
Figura A.10 Kit de calibración Agilent 85052D Economy para coaxial.	IX
Figura A.11 Cables de medida RF Agilent 85131E/F/H con conectores NMD de 3,5 mm.	IX
Figura A.12 Sistema DAMS 6000 para soporte de antenas	X
Figura A.13 Antena de bocina piramidal utilizada como sonda de 8 a 12 GHz. Incluye una transición guía-coaxial y un soporte para la torre.	X
Figura A.14 Entorno de trabajo de AM studio	XI
Figura A.15 Amplificador de señal de radiofrecuencia	XI
Figura A.16 Osciloscopio MSO-X 3014A	XII
Figura A.17 Convenio para la colocación del array	XIII
Figura A.18 Kit de calibración TRL. Line (Superior), Thru (Inferior izquierda) y CA (Inferior derecha)	XVI
Figura A.19 Circuito de evaluación	XVI
Figura A.20 Soportes para cámara anecoica. Circuitos independientes (Izquierda) y circuito conjunto (Derecha)	XVI
Figura A.21 Parches superiores	XVI
Figura A.22 Circuito de tres desfasadores y tres parches independientes	XVII
Figura A.23 Circuito conjunto de tres desfasadores y tres parches. Circuito original sin el error de 0.6mm	XVII
Figura A.24 Chasis de soporte para circuito de evaluación	XVIII
Figura A.25 Soporte para circuito de tres desfasadores y tres parches independientes	XIX
Figura A.26 Soporte para circuito conjunto de tres desfasadores y tres parches. Plano original sin el error de 0.6 mm	XX
Figura A.0.27 Proceso de actualización de controladores para sistema LUFA	XXII
Figura A.28 Selección de nomenclatura "COM" para el interfaz	XXII

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla 2—I Distribución del espectro radioeléctrico</i> -----	5
<i>Tabla 2—II Frecuencias para bandas de microondas y DBS</i> -----	6
<i>Tabla 2—III Parámetros S de una red de 2 puertos</i> -----	11
<i>Tabla 2—IV Sustratos comerciales y características</i> -----	25
<i>Tabla 4—I Características de sustrato utilizado</i> -----	48
<i>Tabla 4—II Componentes para circuito de evaluación</i> -----	56
<i>Tabla 4—III Archivos gbers necesarios para una construcción de circuito impreso</i> -----	57
<i>Tabla 4—IV Resumen de procesos de verificación, y resultados</i> -----	82
<i>Tabla 5—I Componentes para circuito de tres desfasadores.</i> -----	90
<i>Tabla 5—II Desfase teórico y medido. Array de tres desfasadores. Desfasador 1</i> -----	97
<i>Tabla 5—III Desfase teórico y medido. Array de tres desfasadores. Desfasador 2</i> -----	99
<i>Tabla 5—IV Desfase teórico y medido. Array de tres desfasadores. Desfasador 3</i> -----	101
<i>Tabla 5—V Comparativa de desfases medidos, y teórico. Array de tres desfasadores.</i> -----	104
<i>Tabla 7—I Fases progresivas y ángulo de apuntamiento teórico en array de tres elementos</i> -----	139
<i>Tabla 7—II Configuración de estados para un fase progresiva de 22.5º en array de 3 elementos</i> -----	142
<i>Tabla 7—III Fases progresivas y ángulo de apuntamiento teórico en array de dieciséis elementos</i> -----	144
<i>Tabla 7—IV Configuración de estados para un fase progresiva de 22.5º en array de 16 elementos</i> -----	147



# 1 Introducción

Esta memoria describe un proyecto de ingeniería basado en el desarrollo y diseño de un apuntamiento dinámico para una agrupación de antenas en la banda X (11-12GHz). El presente proyecto ha sido llevado a cabo en su totalidad en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.

## 1.1 *Motivación*

La sociedad actual ha desarrollado una enorme necesidad de comunicación que requiere del acceso constante a información a distancia. Esto ha propiciado la aparición de un gran número de tecnologías; como los array de antenas, que permiten obtener una mayor ganancia, alcance y adaptabilidad al entorno, que los diseños de antenas convencionales.

En este proyecto de fin de carrera, se integraran las características de distintas tecnologías: alimentación en guía de onda, que proporciona mejores valores en cuanto a pérdidas en la alimentación que cualquier red de alimentación en tecnología microstrip; un elemento radiante diseñado sobre tecnología microstrip, que aparte de su facilidad de construcción y robustez, permite reducir enormemente los costes; una tecnología de circuitos semiconductores muy potente, como son los desfasadores de señal, que permite modificar dinámicamente las características de radiación del sistema; y la utilización de un sistema de control software, intuitivo, fácil de replicar y automatizar.

Debido a todas las ventajas que ofrecen estas tecnologías, se piensa que su utilización conjunta aporte numerosos beneficios, y sirva como precedente para la utilización en sistemas más complejos que puedan ser elaborados con los resultados obtenidos de este estudio.

Aunque este tipo de integración ya se ha realizado dentro del grupo de investigación, sigue siendo una temática relativamente nueva, de la cual no se tienen una gran cantidad de estudios previos, y se piensa que podrían generar una línea de investigación futura de relevante interés.

## 1.2 *Objetivos*

Implementar un sistema radiante de 11 a 12GHz para comunicaciones por satélite DBS, con apuntamiento dinámico por medio de desfasadores digitales de señal controlados mediante distintas topologías.

El principal objetivo del proyecto es sumar los esfuerzos que proporcionan las cuatro tecnologías distintas en las que se va a apoyar, para obtener los mejores resultados posibles en cuanto a este tipo de sistemas se refiere. Se comenzará con la tecnología en guía de onda rectangular, para seguir con la construcción de un array lineal de parches, tecnología de circuitos impresos, finalizando con los desfasadores digitales como parte de la tecnología de semiconductores más compleja, y se estudiara las diferentes posibilidades de programación de estos desfasadores con la última tecnología.

El objetivo final es el diseño de hasta 16 desfasadores digitales, con 16 parches circulares alimentados con guía de rectangular metálica por acoplamiento. El objetivo es alcanzar valores tanto de reflexión como de polarización, dentro del ángulo de variación, satisfactorios.

### 1.3 *Organización de la memoria*

La documentación de este proyecto está estructurada de la siguiente forma:

➤ **Capítulo 1: Introducción.**

Aborda la temática general de este proyecto fin de carrera, además de explicar la motivación y objetivos del mismo.

➤ **Capítulo 2: Estado del arte.**

Descripción del estado de arte actual, profundizando en las antenas de array, guías de onda, tecnologías de circuitos impresos microstrip y tecnología de control digital.

➤ **Capítulo 3: Evaluación previa.**

Pruebas iniciales realizadas sobre las placas y diseños que ya se tenían del anterior PFC realizado sobre esta temática.

➤ **Capítulo 4: Diseño y caracterización de placa de evaluación.**

En este capítulo se explican todos los procesos de diseño y fabricación llevados a cabo, para obtener un circuito de evaluación mediante el cual poder comprobar el funcionamiento del elemento desfasador de manera individual.

➤ **Capítulo 5: Diseño de array de tres desfasadores y tres parches independientes.**

Todos los procesos de diseño y fabricación llevados a cabo, para obtener un circuito array de tres elementos mediante el cual poder comprobar el funcionamiento de cada uno de ellos.

➤ **Capítulo 6: Diseño conjunto de array de tres desfasadores y tres parches**

Últimos diseños y procesos realizados para integrar en un mismo circuito todos los elementos estudiados con anterioridad.

➤ **Capítulo 7: Conclusiones y trabajo futuro.**

Finalmente, este capítulo resume las principales conclusiones extraídas y sugiere posibles mejoras y líneas a seguir en futuros trabajos similares.



## 2 Estado del arte

### 2.1 Definición general de una antena.

Una antena es un dispositivo, compuesto por uno o varios conductores metálicos, diseñado con el objetivo de emitir o recibir energía en forma de ondas electromagnéticas hacia el espacio libre, y que además permite adaptar el cambio del conductor al medio. Una antena transmisora transforma energía eléctrica en radiación electromagnética, y una receptora realiza la función inversa.

*“Aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEEE Std. 145-1983)”*

Existe una gran diversidad de tipos de antenas, dependiendo de la función que vaya a desarrollar en el sistema cada una tendrá una definición determinada. Una diferenciación muy utilizada se basa en las dimensiones de la antena, las cuales dependen estrechamente de la frecuencia a la que se quiere que oscilen las ondas que va transmitir (o recibir), y esto, a la vez permite agrupar los tipos de antena según su banda frecuencial de trabajo.

#### 2.1.1 Banda de frecuencias.

Una banda de radiofrecuencia es una pequeña sección de frecuencias del Espectro Radioeléctrico utilizada en comunicaciones por radio, en la que los canales de comunicación se utilizan para un mismo propósito, con el objetivo de un mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico, y evitar interferencias entre servicios. Existe una convención para separar las bandas según la longitud de onda en divisiones de  $10^n$  metros, o frecuencias de  $3 \times 10^n$  hercios.

DENOMINACIÓN	RANGO DE FRECUENCIAS	APLICACIÓN
<b>Ultra Low Frequency - ULF</b>	0.3 - 3 KHz	Com. Submarina y a través de la tierra
<b>Very Low Frequency - VLF</b>	3 - 30 KHz	Radio ayuda, geofísica
<b>Low Frequency - LF</b>	30 - 300 KHz	Radio AM (onda larga)
<b>Medium Frequency - MF</b>	0.3 - 3 MHz	Radio difusión de onda media
<b>High Frequency - HF</b>	3 - 30 MHz	Control maritime, telefonía fija
<b>Very High Frequency - VHF</b>	30 - 300 MHz	Televisión, radio FM, servicios de emergencia
<b>Ultra High Frequency - UHF</b>	0.3 - 3 GHz	Television, telefonía móvil, enlaces radio
<b>Super High Frequency - SHF</b>	3 - 30 GHz	Radar, enlaces radio, com. por satélite
<b>Extremely High Frequency - EHF</b>	30 - 300 GHz	Radar experimental, radio astrología

Tabla 2—I Distribución del espectro radioeléctrico

Las ondas de frecuencias entre 1 y 300 GHz son llamadas “microondas”, incluidas en las bandas UHF, SHF y EHF dentro del espectro radioeléctrico. Dentro de las microondas se puede encontrar una división en bandas de frecuencia distinta a la anterior.

<b>BANDA</b>	<b>FRECUENCIA</b>
<b>L</b>	1 – 2 GHz
<b>S</b>	2 – 4 GHz
<b>C</b>	4 – 8 GHz
<b>X</b>	8 – 12 GHz
<b>Ku</b>	12 – 18 GHz
<b>K</b>	18 – 27 GHz
<b>Ka</b>	27 – 40 GHz
<b>mm</b>	30 – 300 GHz

**Direct Broadcast Satellite (DBS)** es el servicio que distribuye una señal de audio, vídeo o datos sobre una extensa zona determinada, haciendo uso de sistemas satelitales y permitiendo la recepción con terminales de pequeño diámetro. Asignado entre los 10.7 GHz y los 11.7 GHz

Tabla 2—II Frecuencias para bandas de microondas y DBS

### 2.1.2 Tipos de antenas

Las antenas se suelen dividir en grupos dependiendo de su modo de radiación y de la frecuencia de funcionamiento. La clasificación más clásica es la siguiente:

#### 2.1.2.1 Antenas de elementos

Las antenas de hilo son antenas cuyos elementos radiantes son conductores de hilo que tienen una sección despreciable respecto a la longitud de onda de trabajo. Según se disponga dicho hilo, hablaremos de antenas de dipolo, de lazo circular o cuadrado, de hélice, etc.



Figura 2.1 Antena helicoidal (Izq.) y antena Yagui de 10 elementos (Dcha.)

#### 2.1.2.2 Antenas de apertura

Las antenas de apertura son aquellas que utilizan superficies o aperturas para direccionar el haz electromagnético de forma que concentran la emisión (o recepción) de su sistema radiante. La más conocida y utilizada es la antena parabólica, tanto en enlaces

de radio terrestres como de satélite. Estas antenas a su vez pueden dividirse en dos subgrupos:

- A) Aperturas delimitadas por paredes metálicas: ranuras y bocinas.
- B) Aperturas definidas como una superficie plana donde se analiza el campo colimado por la antena: reflectores (antenas parabólicas) y lentes.



*Figura 2.2 Antena parabólica (Izq.) y antena de bocina (Dcha.)*

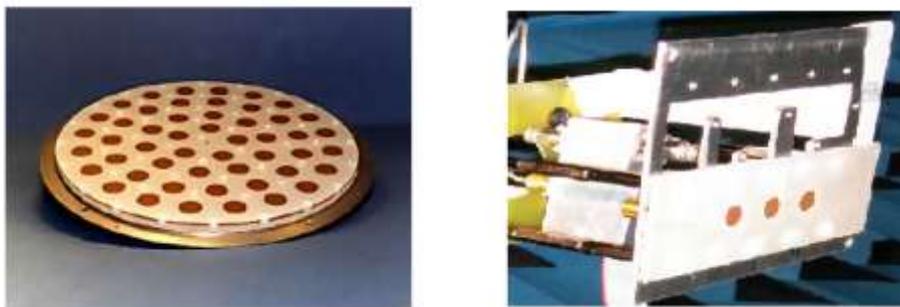
#### *2.1.2.3 Antenas de onda progresiva*

Se basan en generar una onda progresiva sobre una estructura radiante eléctricamente larga (varias longitudes de onda). Estas antenas acaban en una carga adaptada o guía eléctrica que recoge la potencia sobrante para evitar reflexiones.

#### *2.1.2.4 Antenas de array*

Las antenas de array son consideradas generalmente como un tipo más de antena, aunque en realidad se conforman mediante la unión de diferentes antenas, lo que permite conformar un dispositivo con prestaciones normalmente superiores a las de cada elemento por separado.

El diagrama de radiación de las antenas de array se puede modificar mediante el control de la amplitud y fase de cada elemento del array. Esta característica supone una gran ventaja, ya que permite adaptar la antena a diferentes aplicaciones.



*Figura 2.3 Array de parches circular (Izq.) y array de parches lineal (Dcha.)*

## 2.2 *Parámetros para la caracterización de una antena*

Existen una serie de parámetros que se definen y miden siguiendo el estándar IEEE 145-1973, esos parámetros, ya sean de carácter circuital o más direccionales normalmente permiten describir las características y el funcionamiento de cualquier antena.

### 2.2.1 *Impedancia de entrada*

La impedancia de entrada de una antena se define como la relación de tensión y corriente que existe entre sus terminales de entrada. Se denota como  $Z_a$  (es un número complejo con parte real  $R_a(\omega)$ , llamada resistencia de la antena, y parte imaginaria  $X_a(\omega)$ , llamada reactancia de la antena).

$$Z_a = R_a(\omega) + jX_a(\omega) \quad : \text{Fórmula 2.1}$$

La parte real de la resistencia  $R_a(\omega)$ , se puede descomponer a su vez en la suma de dos partes reales: la resistencia en radiación [ $R_r(\omega)$ ] y la resistencia en pérdidas óhmicas de la antena [ $R_p(\omega)$ ]. Estas dos variables nos permiten distinguir entre la potencia radiada por la antena, y la potencia disipada por la misma, respectivamente.

$$P_r = \frac{1}{2} |I_0|^2 R_r \quad : \text{Fórmula 2.2}$$

$$P_p = \frac{1}{2} |I_0|^2 R_p \quad : \text{Fórmula 2.3}$$

Se puede observar que los valores antes expuestos dependen de la frecuencia, y que por lo tanto podemos hablar de “resonancia” de la antena, si para una determinada frecuencia se anula  $X_a(\omega)$

### 2.2.2 *Adaptación de impedancias*

Independientemente de la función del sistema, es necesario interconectar los elementos que componen el transmisor (o receptor) con el elemento radiante (antena), y esta conexión mediante líneas de transmisión tiene que estar diseñada de tal forma que se garantice la máxima transferencia de potencia. Es aquí, a la hora de diseñar la línea de transmisión adecuada, donde se hacen verdaderamente importantes los conceptos de impedancias de entrada y salida, y la adaptación a los cambios de las mismas.

Particularizando para un caso con una antena (representada como una carga al final de una línea de transmisión), el parámetro  $S_{11}$  nos da una visión sobre la cantidad de onda reflejada producida en la antena. Y más concretamente en términos de impedancia tendremos:

$$S_{11} = \frac{Z_{In} - Z_0}{Z_{In} + Z_0} \quad : \text{Fórmula 2.4}$$

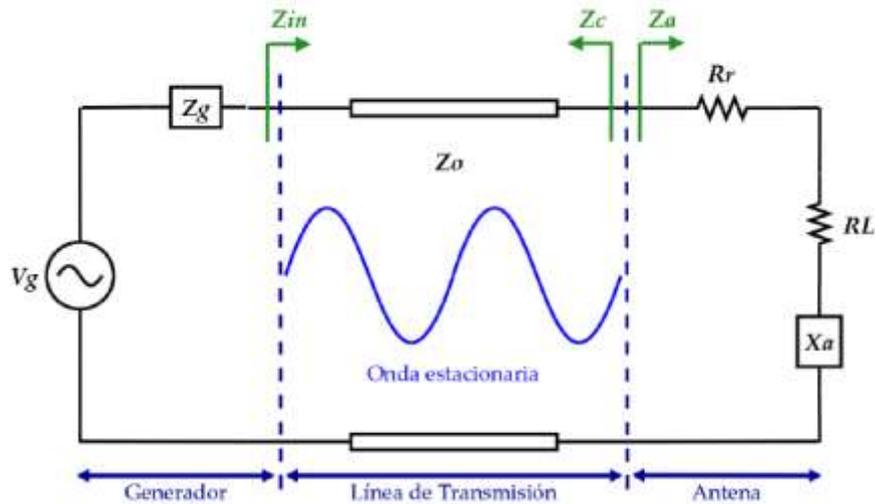


Figura 2.4 Esquema de conexión de antena y generador mediante línea de transmisión de impedancia característica  $Z_0$

La impedancia equivalente desde el generador hacia la carga es  $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$ , y gracias a esto se puede definir la potencia de entrada a la red como:

$$P_{in} = \frac{1}{2} |I|^2 R_{in} = \frac{1}{2} \left| \frac{V_g}{Z_g + Z_{in}} \right|^2 R_{in} = \left[ \frac{1}{8} \frac{|V_g|^2}{R_g} \right]_{Si Z_g = Z_{in}^*} \quad : \text{Fórmula 2.5}$$

La máxima transferencia de potencia se produce cuando existe adaptación:  $Z_g = Z_{in}^*$  entre el generador, y el resto de la red. De este modo el generador entrega la máxima potencia a la línea de transmisión, como puede deducirse en la última parte de la ecuación anterior. La ausencia de onda reflejada se produce cuando la impedancia de la carga está adaptada a la de la línea de transmisión ( $Z_a = Z_0 \rightarrow S_{11} = 0$ ).

$$\Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_g^*}{Z_{in} + Z_g} \quad : \text{Fórmula 2.6}$$

Es importante no confundir estos dos conceptos, y saber que el mejor caso de adaptación que puede darse en un sistema, se produce cuando las 3 impedancias  $Z_c$ ,  $Z_a$  y  $Z_0$  son reales e iguales.

### 2.2.2.1 Relación de onda estacionaria (ROE o SWR)

Si la carga no está adaptada a la línea de transmisión ( $s_{11} \neq 0$ ) se generará una onda reflejada. En este caso se produce una interferencia entre las ondas incidente y reflejada originando una onda estacionaria en la línea

$$ROE = \frac{V_{Max}}{V_{Min}} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad : \text{Fórmula 2.6}$$

La SWR mide la desadaptación entre la carga y la línea, es decir, la reflexión que se produce por falta de adaptación, dando una idea de la potencia que se transmite finalmente a la antena. Toma valores reales comprendidos entre  $1 \leq \text{SWR} \leq \infty$

### 2.2.3 Parámetros S (parámetros de dispersión)

Mientras se trabaje a frecuencias bajas, la longitud de onda de la señal es mucho mayor que la de los elementos del circuito; pero conforme aumentamos la frecuencia, dicha longitud de onda se va haciendo cada vez más pequeña y las leyes de Kirchhoff, que se aplican a la circuitería tradicional, dejan de tener validez. En consecuencia, calcular tensiones y corrientes en un circuito, se vuelve más complicado. Generalmente, al aumentar la frecuencia se suelen utilizar los conceptos relacionados con potencia por su mayor sencillez de caracterización y medida, pero se sigue queriendo poder utilizar toda la teoría circuital asociada a impedancia, admitancia, tensión o corriente.

La herramienta más cómoda para solucionar este problema son los parámetros S, puesto que sus conceptos se mantienen válidos para todas las frecuencias.

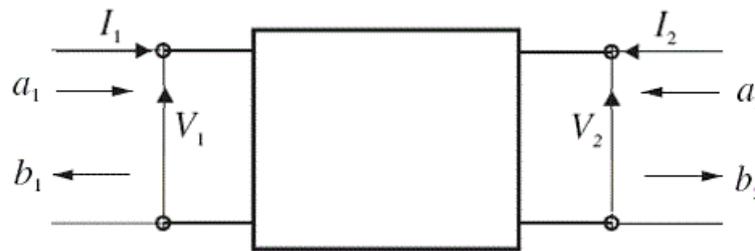


Figura 2.5 Dibujo esquemático de parámetros S en circuito de dos puertas

Los parámetros S se basan en los niveles de potencia existentes en los puertos de un circuito, según las ondas de potencia incidente ( $a_i$  - entrantes al circuito) y reflejada ( $b_n$  - salientes del circuito), ambas normalizadas a la impedancia del puerto correspondiente.

$$a_i = \frac{v_i + Z_{oi} i_i}{\sqrt{8RE[Z_{oi}]}} \quad b_i = \frac{v_i - Z_{oi} i_i}{\sqrt{8RE[Z_{oi}]}} \quad : \text{Fórmula 2.7}$$

Donde “ $v_i$ ” es la tensión en la puerta  $i$ , “ $i_i$ ” la corriente entrante al circuito en la puerta  $i$ , y “ $Z_{oi}$ ” la impedancia de referencia de la puerta  $i$ . Mediante estas definiciones y la matriz de parámetros S genérica (a continuación) se consigue relacionar las ondas de potencia del circuito.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdot & \cdot & S_{1n} \\ S_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ S_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & S_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n \end{pmatrix}$$

Figura 2.6 Matriz de parámetros  $S$  genérica para un circuito de “ $n$ ” puertas

A continuación solo queda calcular cada uno de los elementos de la matriz de parámetros  $S$  ( $S_{ji}$ ), para lo cual, únicamente es necesario cargar cada terminal de la red con su impedancia característica  $Z_{oi}$ , excepto el terminal  $i$ -ésimo, al que se conectara un generador que produzca la onda incidente “ $a_i$ ”, por lo que el resto de ondas incidentes será cero.

$$S_{ji} = \left( \frac{b_j}{a_i} \right)_{a_k=0 (\forall k \neq i)} \quad : \text{Fórmula 2.8}$$

Para un circuito de 2 puertos como el de la *Figura 2.5 Dibujo esquemático de parámetros  $S$  en circuito de dos puertas*, se obtiene una matriz de parámetros de 4 elementos (2 filas x 2 columnas), cuya explicación encontramos en la siguiente tabla:

PARÁMETRO $S$	NOMBRE*	DESCRIPCIÓN	FÓRMULA
$S_{11}$	Reflexión a la entrada	Relación entre la onda de potencia reflejada en la puerta 1 cuando se genera una onda incidente en el puerta 1	$S_{11} = \left( \frac{b_1}{a_1} \right)_{a_2=0}$
$S_{12}$	Transmisión inversa o ganancia inversa	Relación de onda de potencia que llega a la puerta 1 cuando se alimenta la red por la puerta 2	$S_{12} = \left( \frac{b_1}{a_2} \right)_{a_1=0}$
$S_{22}$	Reflexión a la salida	Relación entre la onda de potencia reflejada en la puerta 2 cuando se genera una onda incidente en el puerta 2	$S_{22} = \left( \frac{b_2}{a_2} \right)_{a_1=0}$
$S_{21}$	Transmisión directa o ganancia directa	Relación de onda de potencia que llega a la puerta 2 cuando se alimenta la red por la puerta 1	$S_{21} = \left( \frac{b_2}{a_1} \right)_{a_2=0}$

\*Normalmente se suele utilizar esta nomenclatura de manera generalizada, aunque su utilización solo es correcta si los puertos están cargados con sus respectivas impedancias de referencia.

Tabla 2—III Parámetros  $S$  de una red de 2 puertos

A partir de los elementos definidos anteriormente, se pueden caracterizar unos parámetros de gran interés, como son las pérdidas de retorno e inserción del circuito.

$$L_{Retorno}(dB) = -20 * \log_{10} S_{ii} \quad L_{Insercion}(dB) = -20 * \log_{10} S_{ji} \quad : \text{Fórmula 2.9}$$

#### 2.2.4 Diagramas de radiación

El diagrama de radiación es la representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales.

El diagrama de radiación está definido en regiones de campo lejano (far-field). El campo lejano es la distribución del campo angular que no depende de la distancia de la antena, considerándose campo lejano a distancias de la antena superiores a  $2D^2 / \lambda$ , donde "D" es la dimensión máxima de la antena y " $\lambda$ " la longitud de onda de trabajo.

El sistema de referencia más utilizado para este tipo de representaciones son las coordenadas esféricas. Una coordenada esférica queda perfectamente definida mediante 3 parámetros:

- Radio: distancia al origen (r)
- Ángulo polar o elevación: ángulo respecto al eje z ( $\theta$ )
- Azimut: ángulo respecto al eje x ( $\varphi$ )

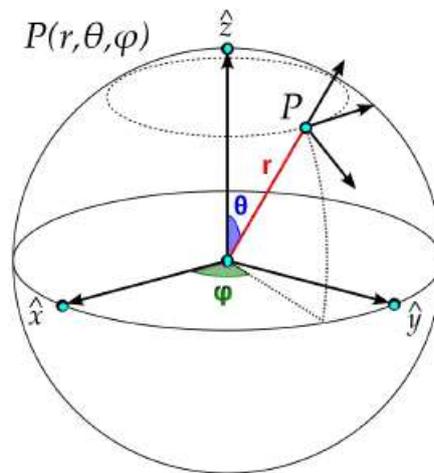


Figura 2.7 Sistema de coordenadas esféricas

Este diagrama es tridimensional, pero es frecuente presentar cortes o planos del mismo, para apreciar mejor parámetros como el nivel de los lóbulos secundarios o el ancho del haz principal. Lo más normal es situar la antena en el plano XY, de forma que la dirección de apuntamiento sea según  $\hat{z}$ . De esta manera, podemos representar cortes de y variando. Dichos cortes pueden servirse de un sistema de coordenadas polares o cartesianas.

El plano E se define como el plano que contiene al vector de polarización de la antena y la dirección de máximo apuntamiento. Este plano contiene el vector de campo eléctrico. El plano H se define como el plano ortogonal al campo E, que también contiene la dirección de máximo apuntamiento. El plano H es el que contiene al vector de campo magnético.

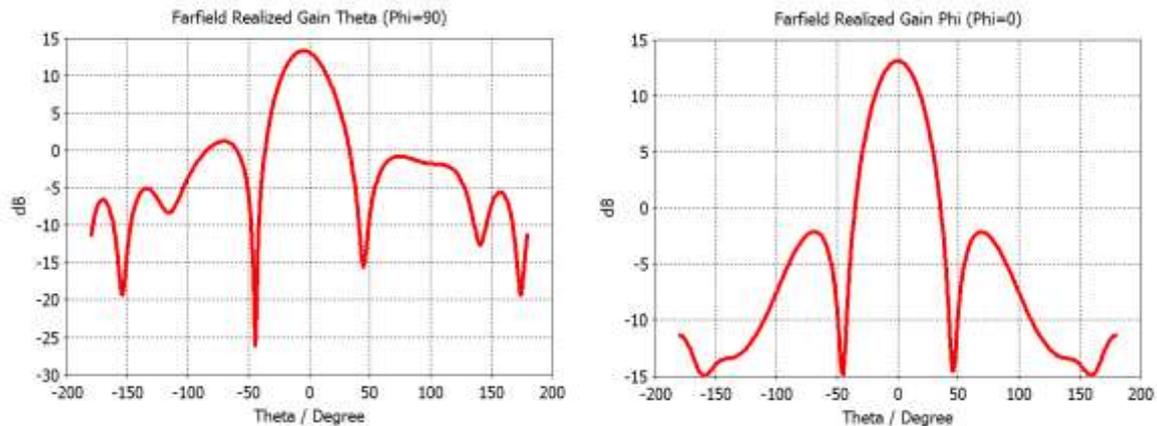


Figura 2.8 Ejemplo de diagramas de radiación: Plano E (Izq.) y Plano H (Dcha.)

#### 2.2.4.1 Parámetros de un diagrama de radiación

Aparte de los distintos planos y representaciones, es necesario conocer una serie de conceptos para comprender correctamente la información mostrada por un diagrama de radiación:

- **Dirección de apuntamiento:** la dirección de máxima radiación.
- **Lóbulo principal:** margen angular alrededor de la dirección de radiación máxima. Determina la dirección de máximo apuntamiento.
- **Lóbulos secundarios:** el resto de lóbulos que no son el principal. Están separados por nulos y suelen ser de menor magnitud.
- **Anchura de haz a -3 dB:** intervalo angular en el que la densidad de potencia radiada es mayor o igual a la mitad de la potencia máxima. Es muy práctico para determinar la directividad de la antena. Se suele denotar como  $\theta_{3dB}$ .
- **Relación de lóbulo principal a secundario (SLL):** SLL (Side Lobe Level) es la diferencia en dB entre el valor máximo del lóbulo principal y el valor máximo del lóbulo secundario.

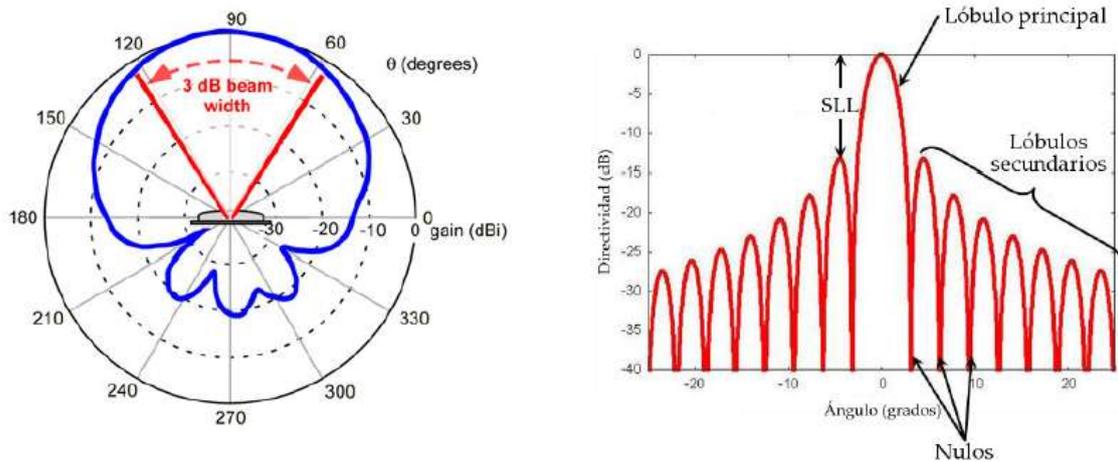


Figura 2.9 Diagramas de radiación 2D: Polares (Izq.) y Cartesianas (Dcha.)

### 2.2.4.2 Tipos de diagramas de radiación

En función de la directividad se pueden encontrar distintos tipos de diagramas de radiación:

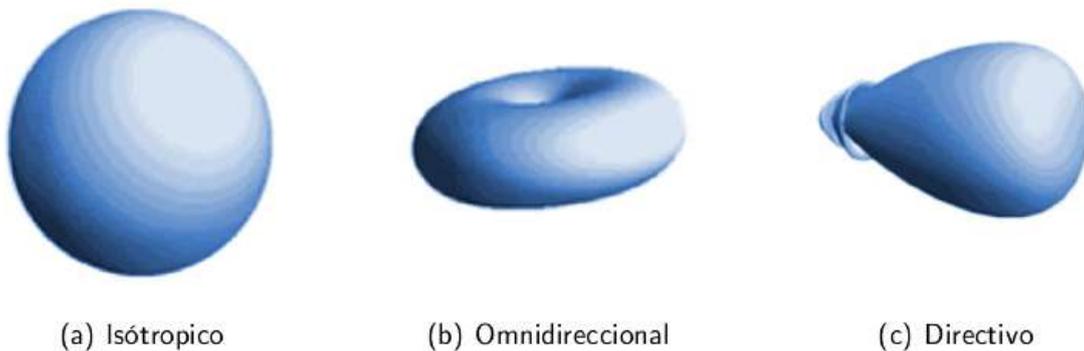


Figura 2.10 Tipos de diagramas de radiación (representación 3D)

## 2.2.5 Potencia de radiación, ganancia y directividad, y eficiencia

### 2.2.5.1 Potencia de radiación

Se define la potencia radiada aparente (pra) como el producto de la potencia suministrada a la antena por su ganancia, en relación a un dipolo de media onda en una dirección dada.

Por ejemplo, una antena de referencia alimentada con 1kW se considera que radia una pra de 1kW en cualquier dirección del plano horizontal y produce una intensidad de campo de 222mV/m a 1km de distancia.

Definimos la potencia isótropa radiada equivalente (pire) como el producto de la potencia suministrada a la antena por su ganancia, en relación a una antena isótropa en una dirección dada.

Del ejemplo anterior, podemos considerar que una alimentación de 1kW se considera que se genera una pire de otro kW en todas direcciones y con una intensidad de campo eléctrico de 173mV/m a 1km de distancia.

### 2.2.5.2 Directividad y ganancia

La directividad de una antena se define como la relación entre la radiación que produce una antena bajo estudio, y la que produciría una antena isotrópica a la misma distancia con iguales características.

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi r^2 \frac{W(\theta, \varphi)}{P_{rad}} \quad W_{max} \Rightarrow D_{max} \quad : \text{Fórmula 2.10}$$

De forma análoga se define la ganancia de una antena bajo estudio como la potencia máxima radiada, o máxima densidad de radiación, en el punto de máxima directividad en relación con otra antena isótropa de iguales características.

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi r^2 \frac{W(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad : \text{Fórmula 2.11}$$

### 2.2.5.3 Eficiencia

La eficiencia se puede definir como la potencia resultante en radiación de la potencia que se le entrega a la antena. Esta pérdida de potencia es debida a pérdidas óhmicas, si una antena no tiene pérdidas óhmicas, la directividad y ganancia son iguales.

$$\mu = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad 0 < \mu \leq 1 \quad : \text{Fórmula 2.12}$$

### 2.2.6 Polarización

Las antenas emiten y reciben ondas electromagnéticas. Por consiguiente, en cada punto del espacio existe un vector de campo eléctrico ( $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y$ ) que depende de la posición y el tiempo. La polarización de una antena en una dirección determinada es la variación temporal del campo radiado en esa misma dirección. La variación de dirección del campo y su sentido de giro traza una figura vista desde la antena que define el tipo de polarización.

- **Polarización lineal:** variaciones de campos contenidas en una misma dirección horizontal o vertical.

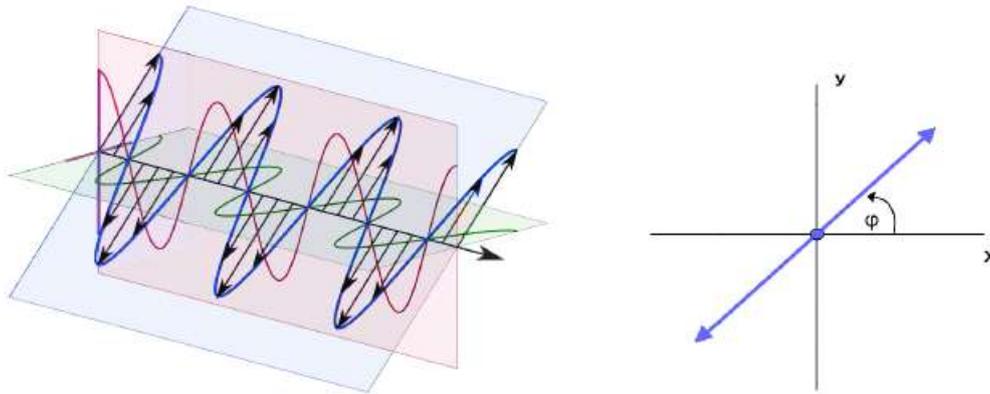


Figura 2.11 Polarización lineal

- **Polarización circular:** el vector de campo eléctrico describe una trayectoria circular con distinta orientación, izquierda o derecha.

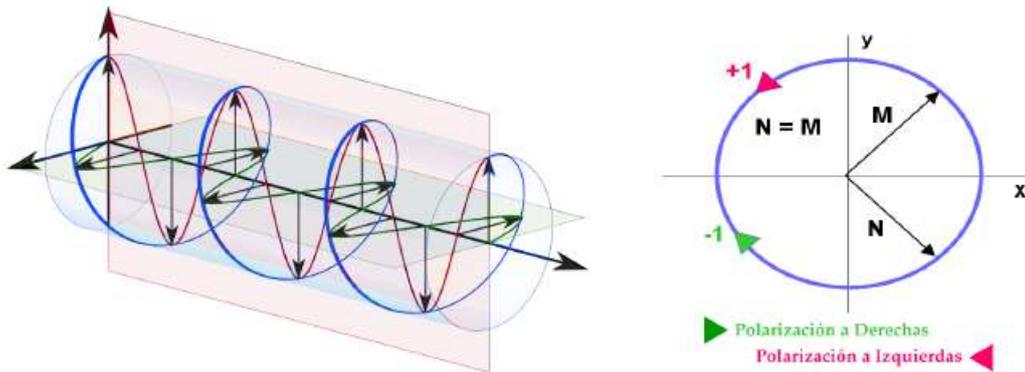


Figura 2.12 Polarización circular

- **Polarización elíptica:** el vector describe una elipse a lo largo del tiempo, y de la misma forma tiene dos orientaciones.

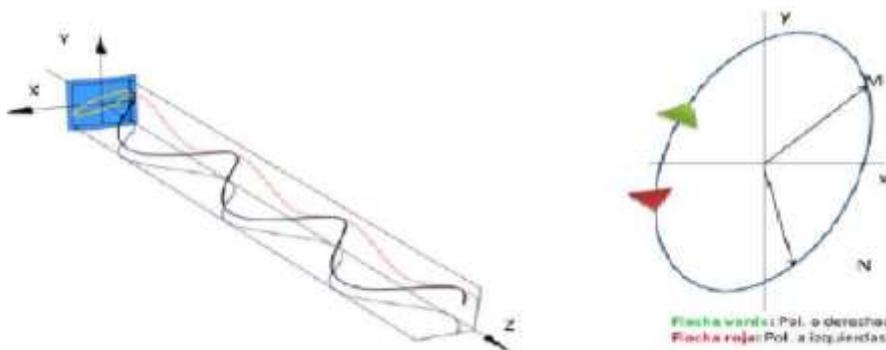


Figura 2.13 Polarización elíptica

Como se puede observar, la polarización circular y lineal son dos casos particulares de una polarización elíptica. Para conocer el tipo de polarización que tenemos bajo estudio, se define un parámetro denominado Relación Axial Axial Ratio ( $AR = M / N$ ) como el cociente entre el eje mayor y el eje menor de la elipse de polarización.

$$AR = \infty \text{ (Polarización lineal)} \quad AR = 0 \text{ (Polarización circular)}$$

Para determinar si una antena está bien polarizada se pueden representar dos diagramas: copolar (co-polarization CP) y contrapolar (cross-polarization XP). Se llama diagrama copolar al diagrama de radiación con la polarización deseada, y contrapolar al diagrama de radiación con la polarización contraria. Por ejemplo, si el diagrama copolar es de polarización vertical, su contrapolar será el de polarización horizontal.

### 2.2.7 Ancho de banda

Dado que las antenas tienen geometría finita, están limitadas a funcionar en un rango de frecuencias restringido. El ancho de banda (BandWidth) es el margen de frecuencias en el que los parámetros de la antena cumplen unas determinadas características.

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \quad : \text{ F\acute{o}rmula 2.13}$$

## 2.3 Guías de onda

Una guía de onda se puede emplear en electromagnetismo para denominar a cualquier elemento físico capaz de propagar ondas electromagnéticas a través de su estructura, generalmente formada por un único conductor cerrado en cuyo interior hay uno o más dieléctricos. Estas estructuras poseen la capacidad para propagar señales de alta potencia con bajas pérdidas.

### 2.3.1 Modos de propagación

Las diferentes formas según se propagan las ondas electromagnéticas dentro de la guía de onda son denominados modos. Existen cuatro tipos de modos según la propagación de los campos eléctricos y magnéticos, estos modos de propagación provienen de las diferentes soluciones de ecuaciones de Maxwell.

Las ecuaciones de Maxwell en forma fasorial, asumiendo que la línea de transmisión está libre de fuentes ( $\vec{J} = 0, \vec{M} = 0, \rho = 0$ ) y el medio está caracterizado por  $\mu$  y  $\epsilon$ , son las siguientes:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad : \text{Fórmula 2.14}$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E} \quad : \text{Fórmula 2.15}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad : \text{Fórmula 2.16}$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad : \text{Fórmula 2.17}$$

Obteniendo las anteriormente citadas soluciones a las ecuaciones de Maxwell, determinamos los cuatro modos de propagación posibles, como los siguientes:

- **Modos Transversales Electromagnéticos (TEM):** este modo se caracteriza por tener los campos electromagnéticos longitudinales nulos ( $E_z = 0 = H_z$ ). Esta solución solo se da en líneas de transmisión formadas por dos conductores diferenciados.
- **Modos Transversales Eléctricos (TE):** estos modos se caracterizan por tener únicamente la componente longitudinal eléctrica nula ( $E_z = 0$ ).
- **Modos Transversales Magnéticos (TM):** estos modos se caracterizan por tener únicamente la componente longitudinal magnética nula ( $H_z = 0$ ).
- **Modos Híbridos:** estos modos se caracterizan por no tener ninguna componente de campo nula ( $E_z \neq 0, H_z \neq 0$ ).

Debido a la composición de las guías de onda, es imposible que tengamos modos TEM (debido a la necesidad de dos conductores diferenciados), pero podemos tener una amplia variedad de modos TE y TM (e híbridos) dependiendo de las características y diseño de la guía.

### 2.3.1.1 Frecuencia de corte

Un modo se propaga por una guía de onda si su frecuencia de corte ( $f_c$ ) es mayor que la frecuencia de corte de funcionamiento de la propia guía ( $f_0$ ), los modos que tienen una  $f_c$  superior, sufren una atenuación tan rápida que se puede considerar que no se propagan.

Existen dos figuras importantes en cuando a la propagación de los modos en las guías de onda: una de ellas es la frecuencia de modo fundamental (o frecuencia de corte más baja de los modos que se propagan por la guía) y muy relacionado con esto, el ancho de banda monomodo (margen de frecuencias durante el cual solo existe propagación de un modo por la guía de onda). Estos conceptos nos permiten diferenciar entre guías de onda monomodo (solo se propaga un único modo dentro de la guía) o multimodo (propagación de varios modos en la guía de onda).

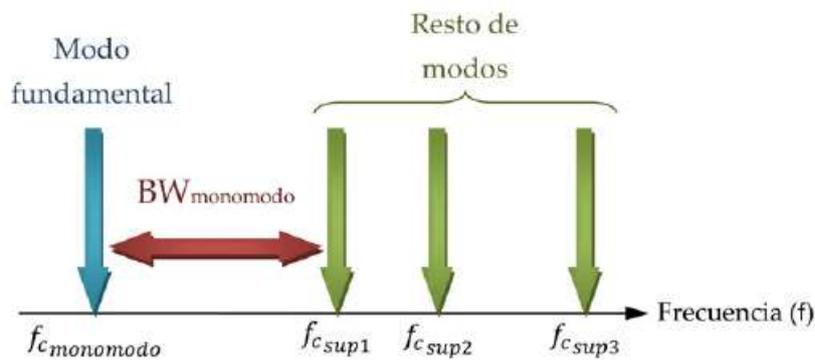


Figura 2.14 Carta de propagación de modos genérica

### 2.3.2 Tipos de guía de onda

Aparte de la clasificación más genérica dependiente del número de modos que se propagan por la guía, existe una clasificación mucho más utilizada que depende de las características geométricas con las que se construyen la guía.

#### 2.3.2.1 Guía de onda rectangular

Este tipo de estructura se caracteriza por tener un corte con forma rectangular con los lados del mismo de dimensiones “a” y “b” (generalmente, por convenio,  $a > b$ ).

Los modos que se propagan en este tipo de guías son los  $TE_{mn}$  y  $TM_{mn}$ , identificados cada uno por sus índices “m” y “n” respectivos. Debido a la suposición inicial de  $a > b$ , determinamos que el modo fundamental de este tipo de guías es el  $TE_{10}$

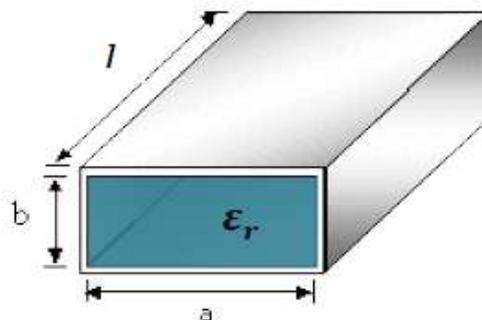


Figura 2.15 Guía de onda rectangular genérica ( $a > b$ )

Para el resto de modos que se propagan en una guía de onda rectangular, podemos obtener su frecuencia de corte y su longitud de onda características mediante las siguientes ecuaciones.

$$f_{c_{m,n}} = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad : \text{Fórmula 2.18}$$

$$TE_{m,n}: m, n \geq 0 \quad \text{y} \quad TM_{m,n}: m, n \geq 1$$

$$\lambda_{g_{m,n}} = \frac{\lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{m,n}}}{f}\right)^2}} \quad : \text{Fórmula 2.19}$$

Existe también un caso especial para este tipo de construcciones denominado guía de onda cuadrada, aunque no deja de ser una particularización de las ecuaciones anteriores para el caso  $a = b$ .

### 2.3.2.2 Guía de onda circular

Este tipo de estructura se caracteriza por tener un corte con forma circular con un radio interior “a”. En este tipo de guías los modos que se propagan también son los  $TE_{11}$  y  $TM_{11}$ , y se caracterizan de manera similar mediante las frecuencias de corte.

$$\text{Modo } TM_{mn} \Rightarrow f_{c_{m,n}} = \frac{\rho_{m,n}}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad \lambda_{c_{m,n}} = \frac{2\pi a}{\rho_{m,n}} \quad : \text{Fórmula 2.20}$$

$$\text{Modo } TE_{mn} \Rightarrow f_{c_{m,n}} = \frac{\rho'_{m,n}}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad \lambda_{c_{m,n}} = \frac{2\pi a}{\rho'_{m,n}} \quad : \text{Fórmula 2.21}$$

siendo  $\rho_{m,n}$  y  $\rho'_{m,n}$  las raíces de las funciones de Bessel

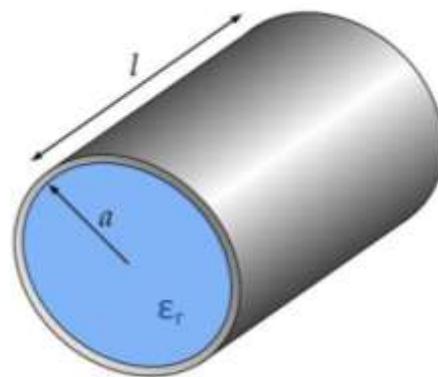


Figura 2.16 Guía de onda circular de radio interior “a”

En este caso, la deducción de cual es el modo fundamental de la guía de onda no puede realizarse de forma tan inmediata, y para ellos es necesario recurrir a las gráficas en

las que se muestran las atenuaciones sufridas en la transmisión de cada uno de los modos posibles.

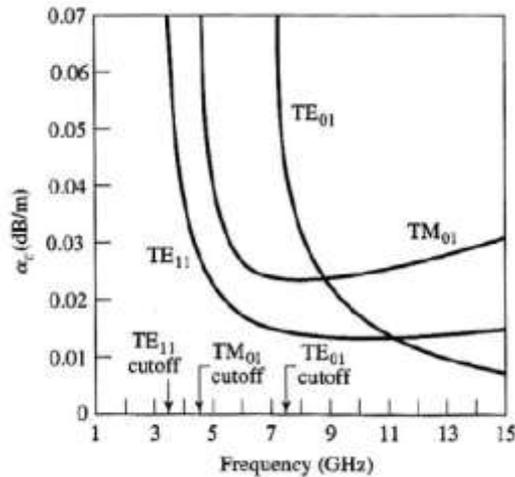


Figura 2.17 Atenuación de los modos de una guía de onda circular de “a” de 2,54 mm

El modo fundamental de las guías circulares es siempre el  $TE_{11}$ , seguido del  $TM_{01}$  y  $TE_{01}$ . Un hecho interesante es que la atenuación que sufre el modo  $TE_{01}$  es considerablemente menor que la que sufre el fundamental.

### 2.3.3 Alimentación mediante conector coaxial

Una forma de alimentar una guía de onda consiste en una transición microstrip-guía de onda; aunque la forma más común de alimentar una guía de onda, es utilizando un conector coaxial que se inserta en el interior de la guía por una de sus caras.

El conductor exterior del coaxial se une al conductor de la guía, constituyendo el plano de masa. El conductor interior o alma del conector, se introduce en el interior de la guía alimentándola a modo de antena monopolo.

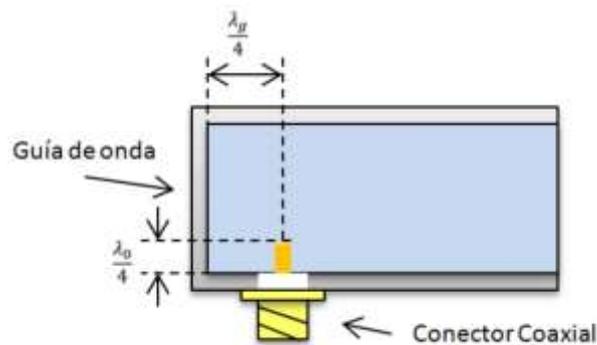


Figura 2.18 Esquema de montaje para una alimentación de guía de onda rectangular mediante conector coaxial SMA

Es necesario tener en cuenta un par de medidas de cara a mejorar la adaptación de la transición coaxial-guía de onda, para ello es muy importante la colocación del alma del coaxial dentro del espacio de la guía de onda, la distancia a las caras del coaxial (se debe mantener una longitud de  $\lambda_g/4$ , para que la onda que se genera en dirección opuesta a la de propagación, se refleje en el final de la guía y llegue con una fase igual a la propagada directamente), y la propia longitud del alma (longitud de tamaño  $\lambda_g/4$ , para que actúe como un monopolo dentro de la guía).

## 2.4 MicroStrip

La línea microstrip es un tipo de línea de transmisión fabricada en tecnología impresa que se utiliza para transmitir señales de microondas. Consiste en una fina lámina de material conductor o línea de RF de espesor ' $t$ ' y anchura ' $W$ ', separada del plano de masa por una capa de material dieléctrico de altura ' $h$ ' y constante dieléctrica  $\epsilon_r$ .

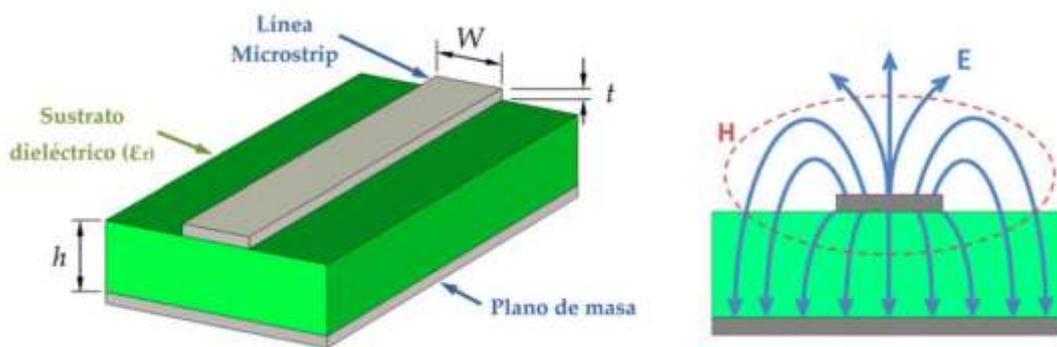


Figura 2.19 Composición de una línea microstrip y formación de líneas de campo

Según esta teoría, las líneas de campo eléctrico se originan en las pistas de RF y se propagan en dirección al plano de masa a través del sustrato dieléctrico. Estas líneas de campo, dependen principalmente de la longitud y anchura de la pista ( $w$ ), y de la cercanía de esta a los bordes del sustrato.

La radiación es, por tanto, producida por la propagación de estos campos que se crean en las discontinuidades del sustrato (si estas son de dimensiones comparables a  $\lambda$  a la frecuencia de trabajo). Algunas de las líneas de campo que se forman pueden saltar al plano de masa a través del aire, debido a la proximidad del borde (en vez de atravesar directamente el sustrato como ocurre en las líneas de campo fundamentales). Debido a que se dispone de dos constantes dieléctricas distintas (aire y sustrato), es necesario utilizar el concepto de constante dieléctrica relativa que unifique ambas posibilidades encontrándose esta entre ambos términos  $1 < \epsilon_{\text{reff}} < \epsilon_r$

$$\varepsilon_{r_{\text{eff}}} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-0,5} + 0,04 \left(1 - \frac{W}{h}\right)^2 \right] & \frac{W}{h} \leq 1 \\ \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-0,5} & \frac{W}{h} > 1 \end{cases}$$

Figura 2.20 Constante dieléctrica relativa de una línea microstrip cuando  $t \rightarrow 0$

Una vez obtenida la constante dieléctrica relativa, se puede obtener la impedancia característica de la línea, utilizando también las cualidades físicas de la propia línea; así como la longitud de onda de la microstrip.

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{r_{\text{eff}}}}} \text{Ln} \left( \frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right) & , \forall \frac{w}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{r_{\text{eff}}} \left[ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \text{Ln} \left( \frac{w}{h} + 1.44 \right) \right]}} & , \forall \frac{w}{h} > 1 \end{cases}$$

Figura 2.21 Impedancia característica de una línea microstrip

$$\lambda_{\text{microstrip}} = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_{r_{\text{eff}}}} \quad : \text{Fórmula 2.22}$$

#### 2.4.1 Alimentación mediante coaxial

De manera similar al tipo de alimentación que se explicó para las guías de onda, se puede alimentar cualquier construcción en microstrip mediante un cable coaxial, conectando el alma del cable, con la pista de radiofrecuencia de la microstrip, y haciendo coincidir el plano de masa de esta, con la carcasa del conector coaxial.

- **Coaxial vertical:** se introduce el alma del conector coaxial en dirección perpendicular al plano que forma la línea construcción microstrip, atravesando todo el sustrato de la misma mediante un orificio pasante

- **Coaxial horizontal:** se coloca el alma del conector coaxial apoyado sobre la línea de radiofrecuencia de la construcción microstrip por uno de sus extremos, y se hace coincidir el plano de masa del sustrato con la carcasa del conector.

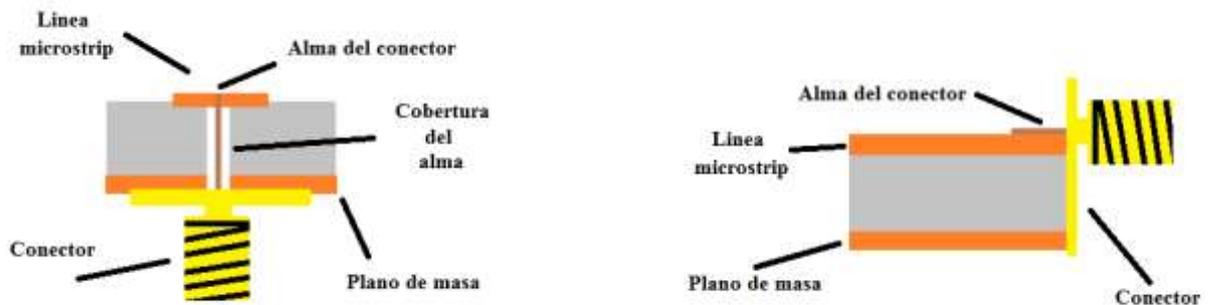


Figura 2.22 Alimentación de microstrip mediante coaxial. Coaxial vertical (Izq) y coaxial horizontal (Dch)

#### 2.4.2 Parches

Las antenas dieléctricas de parche están diseñadas para disipar la mayor parte de la potencia que les llega, en forma de radiación al medio. Su económico precio, así como su facilidad de construcción y robustez las hace muy adaptables a gran variedad de sistemas.

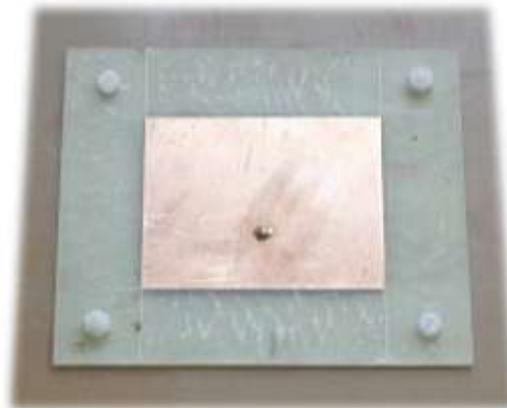


Figura 2.23 Ejemplo de parche cuadrado en microstrip

Construidas a partir de líneas de transmisión o resonadores sobre sustrato dieléctrico como una línea de transmisión en microstrip, con un plano de masa tal que  $\omega$  y  $h \ll \lambda_0$ . La elección del sustrato es verdaderamente importante debido a dos factores: en primer lugar, se encuentra su espesor, un aumento del espesor provoca un aumento de la eficiencia de radiación de la antena; aunque también un aumento de las pérdidas en el dieléctrico, así como un aumento de las ondas de superficie.

En segundo lugar, se encuentra su constante dieléctrica, bajas constantes dieléctricas llevan asociadas mejores eficiencias de radiación, menos pérdidas en el dieléctrico y una disminución de las ondas de superficie.

Sustrato	Constante dieléctrica $\epsilon_r$	Pérdidas $\tan(\delta)$
<i>Epoxy fiberglass FR-4</i>	4.4	0.01
<i>Rohacell Foam</i>	1.07	0.001
<i>Heneycomb</i>	1.02	< 0.0001
<i>Taconic</i>	2.33	0.0009
<i>Kapton</i>	3.5	0.002
<i>Cuclad</i>	2.17	0.0009
<i>RT Duroid 5880 (teflón + fibra de vidrio)</i>	2.2	0.0009
<i>RT Duroid 6010 (PTFE ceramic)</i>	10.5	0.002
<i>GaAs</i>	13	0.0006
<i>Barium – titanite oxides</i>	>80	0.0001

Tabla 2—IV Sustratos comerciales y características

Existe multitud de formas posibles de cara a la construcción de una antena de parche en microstrip, y las características de radiación de dicha antena dependen estrechamente de esta geometría. Existen dos geometrías con un uso ampliamente extendido en la actualidad.

#### 2.4.2.1 Parche rectangular

Todos aquellos parches cuyas caras son planas, ya sea de forma rectangular o cuadrada. Se considera el primer tipo de parche utilizado, y también el más extendido en la actualidad por la multitud de aplicaciones. Su importancia se debe a su fácil e intuitivo análisis, muy ligado a los cálculos para líneas de transmisión, que permiten una mayor rapidez y optimización en el diseño (únicamente dependiendo de dos parámetros: ancho y largo).

#### 2.4.2.2 Parche circular

La geometría circular y la elíptica también son muy utilizadas en la actualidad, y proporcionan una impedancia inferior a la de los parches rectos (debido a su tamaño), aunque su ganancia y ancho de banda también es menor.

La optimización de este tipo de parches se realiza mediante la variación de una única variables, el radio, pudiendo generar polarizaciones lineales, circulares y duales.

Una forma de aproximar el radio teórico necesario para una antena de parche, teniendo en cuenta las características del sustrato, y la frecuencia de trabajo, se realiza mediante las siguientes Fórmulas.

$$r = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2t}{\pi \epsilon_r F} \left( \ln \left( \frac{\pi F}{2t} \right) + 1.7726 \right) \right\}^{1/2}} \quad : \text{Fórmula 2.23}$$

$$F = \frac{8,791 \cdot 10^9}{f \sqrt{\epsilon_r}} \quad : \text{Fórmula 2.24}$$

#### 2.4.2.3 Alimentación del parche mediante línea microstrip

Este método requiere de un contacto directo entre la estructura de alimentación y el elemento radiante, siendo el más sencillo y el que peor eficiencia presenta en relación al ancho de banda y acoplamiento.

En este tipo de alimentación es de vital importancia la colocación de la línea de alimentación respecto a la forma del lateral del parche, y para el caso de las inserciones, la profundidad de conexión.

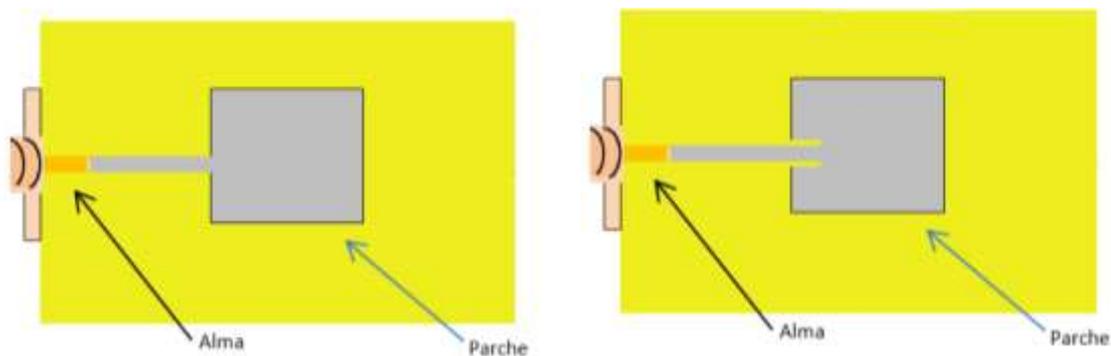
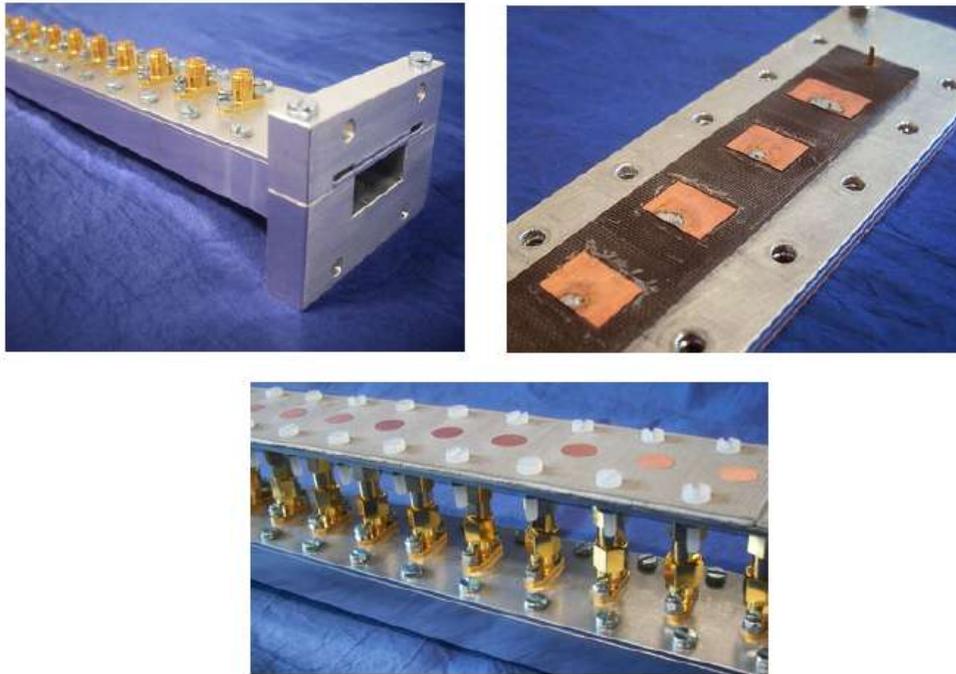


Figura 2.24 Alimentación de parche rectangular mediante línea microstrip. Alimentación directa (Izq.) y alimentación con inserción (Dcha.)

#### 2.4.2.4 Alimentación mediante guía de onda

La alimentación de los parches mediante la en guía de onda que se va a realizar en este PFC tiene algunas particularidades.

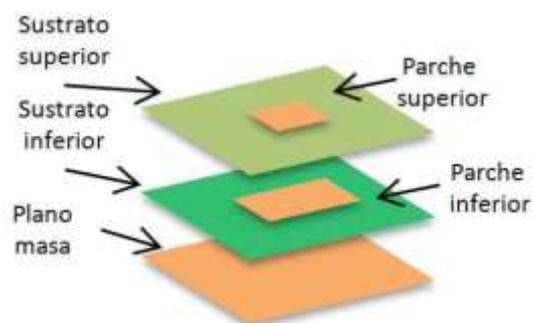
En este caso la guía de onda no está del todo cerrada, dado que dispone de las líneas de acoplo para obtener la señal para los parches a través de una serie de conectores coaxiales, que posteriormente se unen al circuito que contiene los parches. La alimentación de los parches desde los conectores coaxiales se realiza mediante una conexión directa por línea de transmisión microstrip.



*Figura 2.25 Alimentación de array de parches mediante líneas de acoplo desde una guía de onda*

#### 2.4.2.5 Estructura de doble parche apilado

Esta estructura de alimentación acopla fuertemente la resonancia de cada parche, alimentando el parche superior mediante acoplo del inferior. No existe un plano de masa entre ambas capas, aunque las dimensiones de las mismas están estrechamente relacionadas, y por ello las líneas de campo se autoinducen entre ambos parches.



*Figura 2.26 Estructura de doble parche apilado*

En esta configuración, los sustratos utilizados, por lo general, son de distinto grosor e incluso pueden llegar a ser de constantes dieléctricas distintas. También los parches son de distintas dimensiones según requerimientos del diseño, aunque interesa que el parche

superior sea de menor dimensión. El plano de masa ha de estar presente en el parche inferior.

## 2.5 Arrays de antenas

Para la mayoría de aplicaciones en comunicaciones a larga distancia, como las comunicaciones por satélite, se requiere de diseño de antenas con alta ganancia y directividad, para lo cual sería necesario aumentar excesivamente el tamaño de una antena individual, ya que generalmente ofrecen un nivel bajo de ganancia y un haz bastante ancho.

Los arrays de antenas suplen estas dificultades, gracias a la disposición conjunta de varios elementos radiantes iguales, que mediante acoplamientos entre ellos nos permiten obtener las características de anchura de haz y ganancia deseados. Dependiendo de la distribución de los elementos individuales podemos tener distintos tipos de arrays.

- **Arrays lineales o 1D**, equiespaciados o no.
- **Arrays planos o 2D**, distribuciones matriciales de forma rectangular o reticular.
- **Arrays conformado o 3D**, distribución de los elementos radiantes siguiendo la forma de una superficie curva, generalmente esférica o cilíndrica.

Generalmente las antenas que componen el array son iguales y están igualmente orientadas, por lo que se puede hacer una traslación para hacerlas coincidentes en un punto del espacio y calcular el campo radiado de forma independiente.

$$\vec{E}_i(r, \theta, \phi) = \vec{E}_e(r, \theta, \phi) \frac{I_i}{I_0} e^{jk\hat{r}\cdot\vec{r}_i} \quad : \text{Fórmula 2.25}$$

Después de esto se calcula el campo total radiado (mediante la superposición derivada de la linealidad de las ecuaciones de Maxwell) como el sumatorio de los campos radiados por cada elemento.

$$\vec{E}_A(\theta, \phi) = \sum_i \vec{E}_i(\theta, \phi) = \vec{E}_e(\theta, \phi) * \sum_{i=1}^N A_i * e^{j\hat{r}\cdot\vec{r}_i k_0} = \vec{E}_e(\theta, \phi) * F_A(\theta, \phi)$$

: Fórmula 2.26

Y si a este sumatorio se le saca factor común del campo radiado por cada elemento de referencia, queda el sumatorio ponderado por el producto de la contribución de cada campo y elemento particular del array que denominamos Factor de Array; concepto de una relevante importancia en el ámbito de los arrays, debido a que nos permite conocer la naturaleza de una agrupación a priori.

$$F_A(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N A_i * e^{j\hat{r}\cdot\vec{r}_i k_0} \quad : \text{Fórmula 2.27}$$

Como se puede observar, el factor de array sólo depende de las variables angulares  $\theta$  y  $\phi$ , y de la frecuencia, si tenemos en cuenta que viene intrínseca en la variable  $k_0$ . Y por tanto, teniendo en cuenta la Fórmula anterior, el control del array se puede implementar mediante los siguientes factores:

- Disposición geométrica de los elementos, y posición relativa entre ellos mismos.
- Amplitud y/o fase de la alimentación de cada elemento individual.
- Diagrama de radiación conformado para cada elemento.

### 2.5.1 Phased arrays

Este tipo de construcciones se basan en un array lineal o plano, en el cual se varían las fases de las alimentaciones de cada elemento individual, con el objetivo de controlar el diagrama de radiación del conjunto.

Gracias a la posibilidad de variar las fases de cada elemento, se consigue barrer completamente todo el plano  $\phi$  (para arrays lineales o 1D), y ambos planos  $\phi$  y  $\theta$  (para arrays planos o 2D). Este tipo de diseños, son muy útiles para la construcción de sistemas de detección de objetos, con los radares.

El Factor de Array de una antena plana con sus elementos M y N colocados de forma equidistante, se calcula como el producto del factor de array de cada plano X e Y.

$$\left. \begin{aligned} A_{mn} &= a_m \cdot e^{jma_x} \cdot a_n \cdot e^{jna_y} \\ \Psi_X &= k_0 \cdot d_x \sin \theta \cos \phi + \alpha_x \\ \Psi_Y &= k_0 \cdot d_y \sin \theta \sin \phi + \alpha_y \end{aligned} \right\} F_A(\Psi_X, \Psi_Y) = \left[ \sum_{m=0}^{M-1} a_m \cdot e^{jm\Psi_X} \right] \cdot \left[ \sum_{n=0}^{N-1} a_n \cdot e^{jn\Psi_Y} \right]$$

$$F_A(\Psi_X, \Psi_Y) = F_{A_X}(\Psi_X) \cdot F_{A_Y}(\Psi_Y) \quad : \text{Fórmula 2.28}$$

## 2.6 Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres principales unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada/salida.



Figura 2.27 Microcontrolador en encapsulado TQFP de 80 pines.

### 2.6.1 Familia de microcontroladores AVR de Atmel©

Los AVR son una familia de microcontroladores de arquitectura RISC del fabricante Atmel©. La serie AVR se presenta como los sustitutos de los procesadores basados en la arquitectura 8051. Tienen un set de instrucciones renovado, permiten la programación en ensamblador, ANSI C y C++. Se agrupan en 6 familias en función de sus características y prestaciones:

- **32-bit AVR UC3:** procesadores de alto rendimiento de 32 bits y bajo consumo. DSP integrado para operar decimales eficientemente. Disponen de controladores DMA (Direct Access Memory) que, junto con el bus de datos multinivel, permite trabajar eficientemente con memorias de almacenamiento. Cuentan con gran variedad de módulos de comunicaciones, entre los que destacan Ethernet/Mac USB High Speed y OTG (On The Go). Además, cuentan con un módulo criptográfico AES/DES para cifrado eficiente de datos. La mayoría requieren una alimentación entre 3V y 3.6V, aunque dispone de una serie con voltajes de alimentación de 3V a 5.5V. Algunas versiones disponen de hasta 109 líneas de E/S. Pueden trabajar hasta 66 MHz y tienen una capacidad de almacenamiento de hasta 250 Kbytes.
- **AVR XMega:** esta familia se sitúa entre la familia UC3 y la familia MegaAVR. Son procesadores de 8 y 16 bits, con las características de la familia MegaAVR: ADC/DAC módulos de comunicación I2C, SPI, USB (OTG), múltiples contadores Watchdog. Pero que además, incluyen algunas características importantes de la serie UC3, como son el módulo criptográfico AES/DES y el controlador DMA.
- **MegaAVR:** esta línea de procesadores de propósito general de 8 bits es la más popular de la familia AVR. Se compone de una amplia variedad de procesadores que permiten ajustarse a necesidades muy específicas sin desaprovechar funcionalidades. Muchos de ellos disponen de interfaz USB integrada, módulos de

comunicación I2C, USART, SPI, CAN y LIN. También dispone de convertidores ADC/DAC para aplicaciones con señales analógicas, por ejemplo, para trabajar con sensores.

Disponen de varios temporizadores y algunas versiones, hasta controladores de pantallas líquidas LCD integrados, dentro del propio encapsulado. Los más grandes tienen hasta 69 pines de entrada/salida de propósito general. La capacidad para el programa oscila entre 16kb y 64 kb y muchos de ellos disponen de interfaces JTAG y DebugWire, para el depurado de código en tiempo real. Pueden alimentarse entre 1.8V y 5.5V.

- **8-bit tinyAVR:** familia de procesadores de propósito general de 8 bits de pequeñas dimensiones y muy versátiles. Ideados para el control de pequeños dispositivos que no requieran una capacidad de proceso elevada (frecuencia máxima 20MHz). Cuentan con módulos de comunicaciones serie, USART, I2C, SPI, convertidores ADC, varias líneas de entrada/salida de propósito general y PWM. Disponen de 1kb a 8kb de espacio para el programa y también disponen de una memoria EEPROM interna para almacenar datos de forma permanente. Requieren una tensión de alimentación entre 2.7V y 5.5V, aunque existen versiones con convertidores Boost incorporados que permiten trabajar hasta con 0.7V.

### 2.6.2 Protocolo bus SPI (Serial Peripheral Interface)

El bus de interfaz de periféricos serie es un estándar para controlar dispositivos electrónicos. El bus se compone de una línea de reloj, SCLK, dos líneas de datos, MISO (entrada) y MOSI (salida), y una línea de selección de dispositivo, SS, por cada periférico que se desea controlar.

Las líneas SCLK, MISO y MOSI son líneas compartidas entre todos los dispositivos presentes en el bus. Sin embargo, cada línea SS es exclusiva del dispositivo controlado.

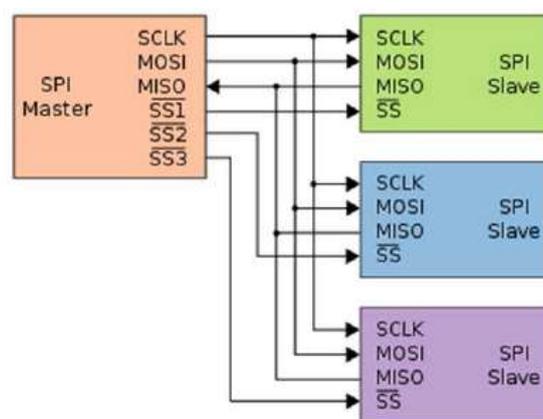


Figura 2.28 Esquema de comunicación protocolo bus SPI

Los bits son enviados o recibidos en serie sincronizados por los pulsos de la línea SCLK. La selección del nodo que ha de recibir o transmitir los datos se selecciona a través su línea SS.

A diferencia del resto de buses, se tiene control absoluto de los datos transmitir y no necesita enviarse los datos empaquetados en bytes. La longitud de los datos es indefinida.

Permite comunicaciones full-dúplex con mayor velocidad de transmisión que el bus I2C. No obstante, si el número de dispositivos es elevado, las líneas de selección necesarias complican el diseño.

## 2.7 Herramientas de diseño y simulación utilizadas

### 2.7.1 AutoCAD

AutoCAD versión 2015 es un software reconocido a nivel internacional por sus amplias capacidades de edición, que hacen posible el dibujo digital de planos en 2D y 3D, o la recreación de imágenes en 3D: Es uno de los programas más usados por arquitectos, Ingenieros y diseñadores industriales.

Este programa permite la importación/exportación tanto de archivos CAD como de IGS, lo que permite una fluida y cómoda comunicación con cualquier otro programa de diseño utilizado, como CST o ADS.

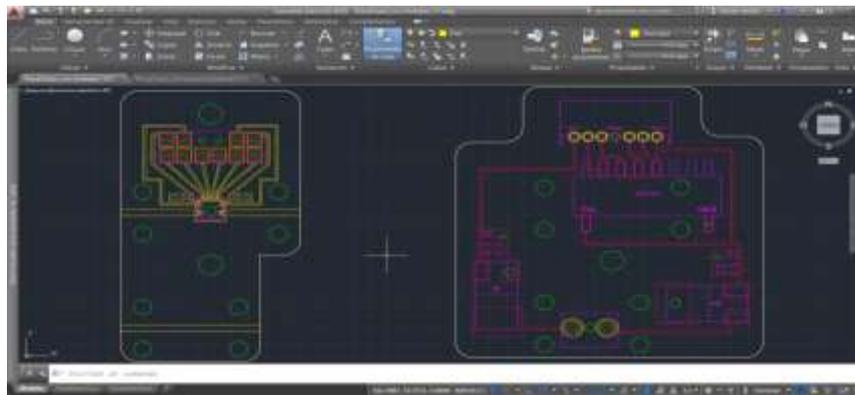


Figura 2.29 Entorno de trabajo de AutoCAD

### 2.7.2 CST Microwave Studio

CST Microwave Studio versión 2014 es un programa de simulación electromagnética que permite diseñar estructuras tridimensionales y estudiar su comportamiento radioeléctrico a altas frecuencias.

Asimismo CST es capaz de importar y exportar archivos CAD. De esta forma se pueden importar diseños ya desarrollados en otras aplicaciones como ADS, así como exportar los ya finalizados para generar planos de fabricación con AutoCAD o programas similares como Solid Edge.

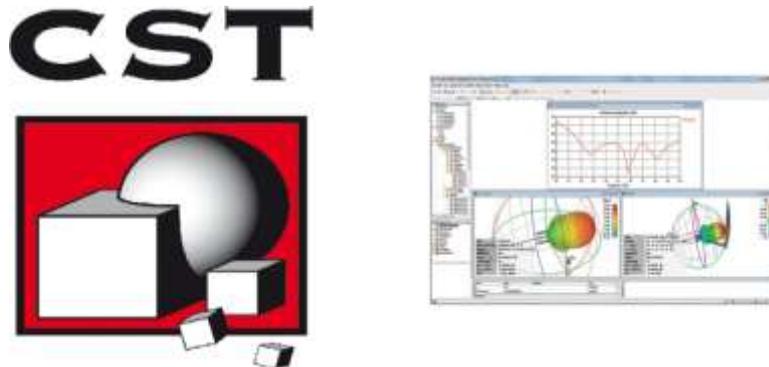


Figura 2.30 Logo corporativo CST (Izq.) y entorno de trabajo del programa (Dcha.)

### 2.7.3 Advanced design System (ADS)

ADS versión 2011 es un programa de simulación de circuitos, donde se puede analizar su comportamiento radioeléctrico, e incluso diseñar físicamente.

Tiene una ingente cantidad de librerías donde se pueden obtener elementos de todo tipo (líneas de transmisión, filtros, elementos pasivos...). Además, permite integrar en el circuito parámetros extraídos de CST, lo cual permite predecir el comportamiento de una antena diseñada en CST dentro de un sistema de mayores dimensiones.

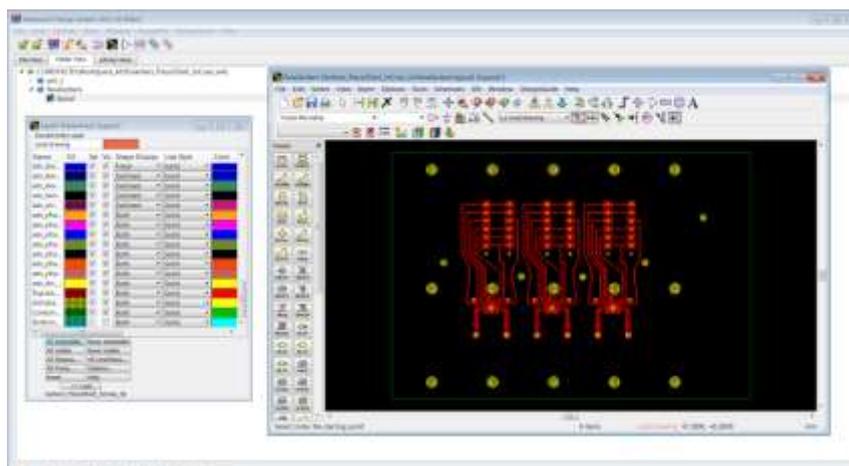


Figura 2.31 Entorno de trabajo de ADS

### 2.7.4 Atmel Studio 6

Atmel Studio versión 6.1 es una plataforma de desarrollo integrado (PDI), para el desarrollo, programación, y depuración de aplicaciones basadas en las familias de microcontroladores Atmel®.

La conectividad del programa esta optimizada para las familiar Atmel AVR® ARM® Cortex®, con un entorno simple e intuitivo que permite crear y depurar programas en C/C++ y ensamblador, para estos microcontroladores.

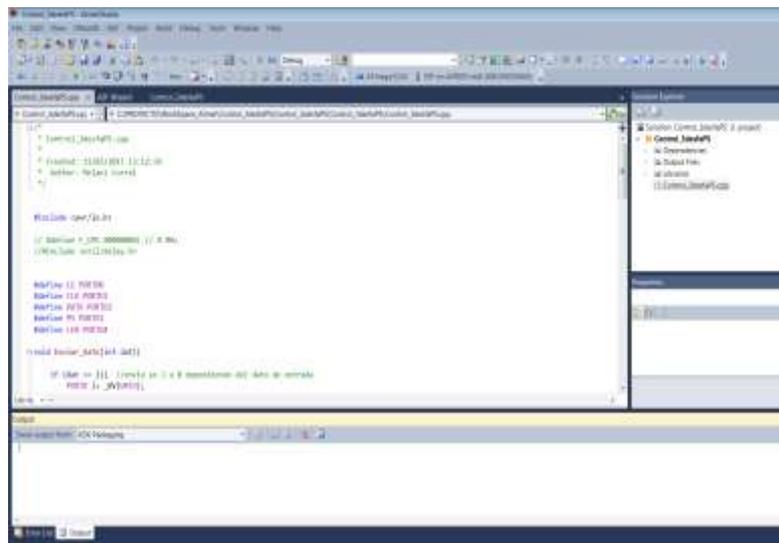


Figura 2.32 Entorno de trabajo de Atmel Studio 6.1

## 3 Evaluación previa

### 3.1 Introducción

En este capítulo se muestran las pruebas iniciales realizadas sobre las placas y diseños que ya se tenían del anterior PFC de Jesús Vazquez “*Diseño de un phased array lineal de parches sobre guía de onda para comunicaciones por satélite DBS*”.

Estas pruebas se llevaron a cabo como toma inicial de contacto con el proyecto que se iba a realizar y, sobre todo, para comprobar el estado de las construcciones que se habían desarrollado previamente y familiarizarse con el funcionamiento de las mismas.

### 3.2 Circuito de desfasador individual (desfasador de evaluación)

El proyecto precursor decidió construir una “placa de evaluación” donde se soldaba un único desfasador (con toda la circuitería de control asociada), con el objetivo de caracterizarlo y familiarizarse con su funcionamiento; debido a esto se piensa que una buena forma de investigar sobre las posibles mejoras aplicables al proyecto sería empezar trabajando sobre este montaje.



Figura 3.1 Desfasador de evaluación sobre chasis metálico para medidas

#### 3.2.1 Pruebas de desfase mediante analizador de redes

Mediante estas pruebas con el analizador de redes se pretendía obtener los parámetros de dispersión que caracterizan al circuito montado y al desfasador de evaluación en particular, y comprobar los cambios en los niveles de potencia según los distintos estados de fase programados en el componente. A su vez, y mediante el análisis de las fases de los mismos parámetros S, se pretendía familiarizar con la calidad del desfase que nos permite realizar el circuito a la señal de radiofrecuencia introducida por su terminal de entrada.

Teniendo el desfasador de evaluación montado y soldado al chasis metálico con todos los conectores SMA, únicamente fue necesario seleccionar en el analizador las especificaciones del diseño (después de haber calibrado el equipo en la banda de trabajo), y mediante el switch biestado de 4 bits, seleccionar el desfase que se quiere que adopte el componente.

Los resultados más relevantes que se pueden destacar para este diseño se encuentran en la información aportada por el estudio de los parámetros de dispersión  $S_{11}$  (módulo de la reflexión) y  $S_{21}$  (módulo y fase de la transmisión).

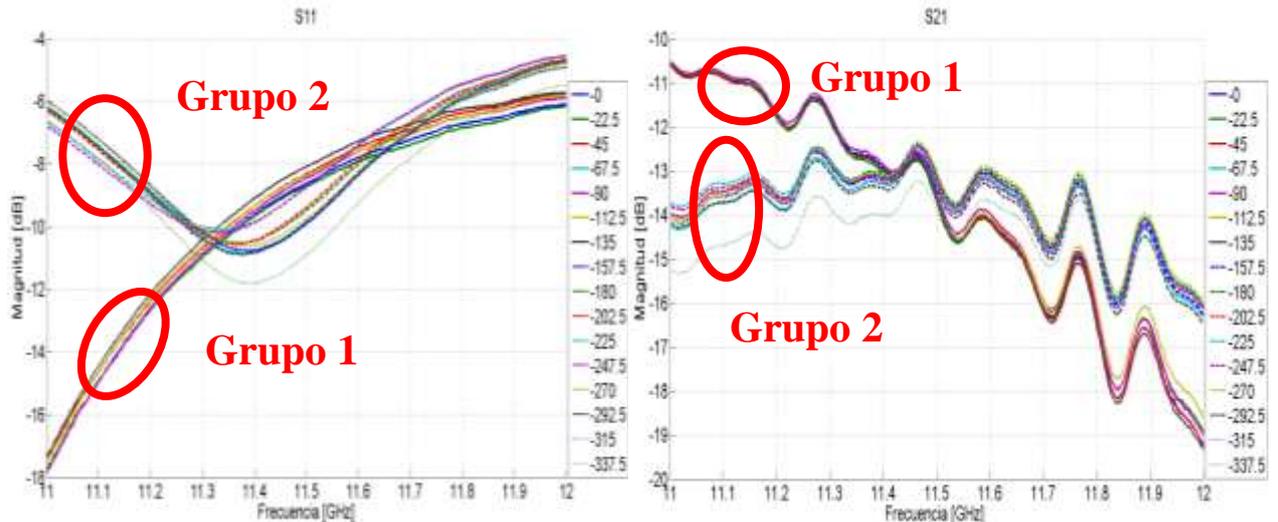


Figura 3.2 Parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$ . Circuito de desfasador de evaluación

Se puede observar con bastante claridad unos resultados nada satisfactorios, no solo por los niveles de potencia mostrados, que no coinciden con los resultados de las pruebas que se realizaron durante las medidas del proyecto predecesor (para el  $S_{11}$  se obtuvo unos resultados comprendidos entre -4 y -8 dB's, y para la  $S_{21}$  entre -10 y -14 dB's), sino también por la aparición de dos grupos de resultados bastante diferenciados.

Los dos grupos de resultados obtenidos en estas pruebas se deben al mal funcionamiento de la alimentación del switch que programa el desfasador. Una vez que se activan varios bits de estado a la vez, se produce un consumo excesivo por parte del mismo, lo que genera la caída de la fuente de alimentación. Además, otro posible problema es la utilización de un conmutador biestado, en el que la primera posición conecta la pista a Vcc colocando un '1' lógico en el desfasador; sin embargo, al programar un '0' lógico, el componente deja la pista "al aire". En el PFC predecesor se intentó solucionar esto colocando una resistencia de pull-down de  $50\Omega$ , que después de varias pruebas se ha podido comprobar que no era un valor adecuado para las características del circuito. Estos problemas se descubrieron en la revisión exhaustiva que se describe en la sección 3.2.3 descrita más adelante

Debido a los problemas nombrados anteriormente, no se esperaba que los resultados en fase fueran correctos, lo que termina de demostrar que el circuito no funciona correctamente en cuanto a su cometido principal de modificar la componente en fase de la señal de radiofrecuencia entrante.

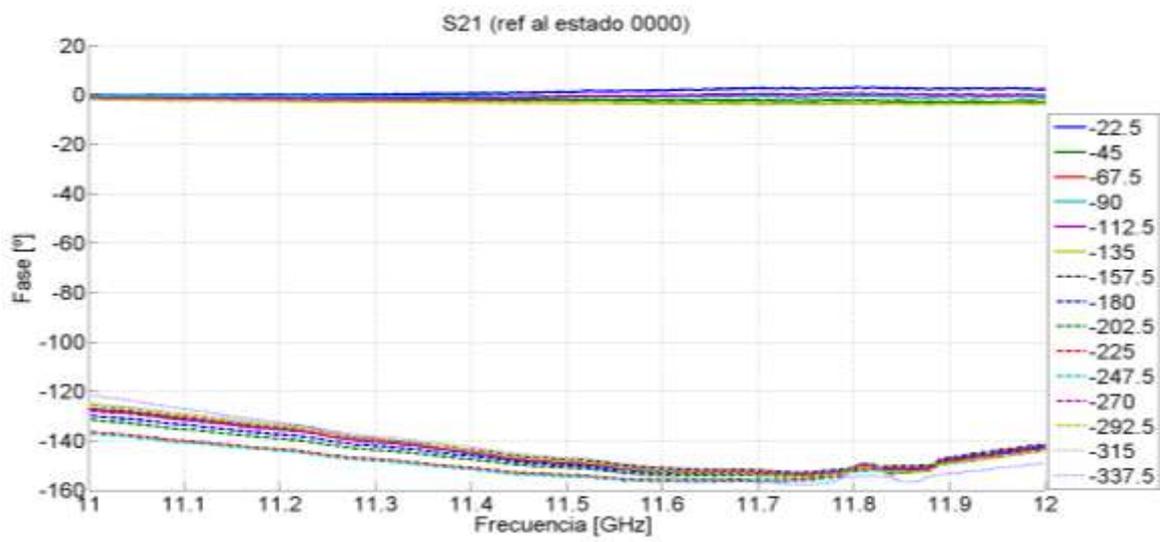


Figura 3.3 Parámetro  $S_{21}$  (fase). Modificación de la fase de la señal RF.

### 3.2.2 Pruebas de radiación mediante cámara anecoica

Una de las pruebas más importantes que se pueden realizar para verificar el funcionamiento del desfasador, es comprobar sus características de radiación uniendo los conectores del chasis metálico, que contiene un desfasador individual, a una antena parche (elemento radiante) de un array de tres parches y, probando sus características mediante medidas en la cámara anecoica del laboratorio, obtener los identificativos diagramas de radiación. En el proyecto previo, esta prueba solo se llevó a cabo utilizando el array compuesto por tres desfasadores, y no utilizando la placa de desfasador de evaluación.

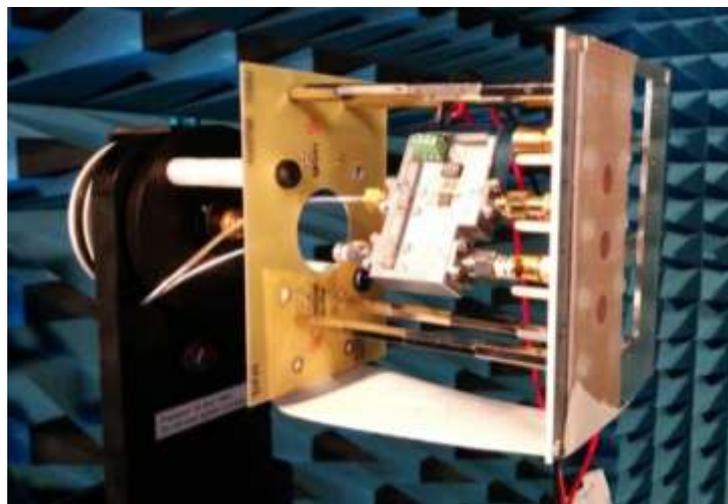
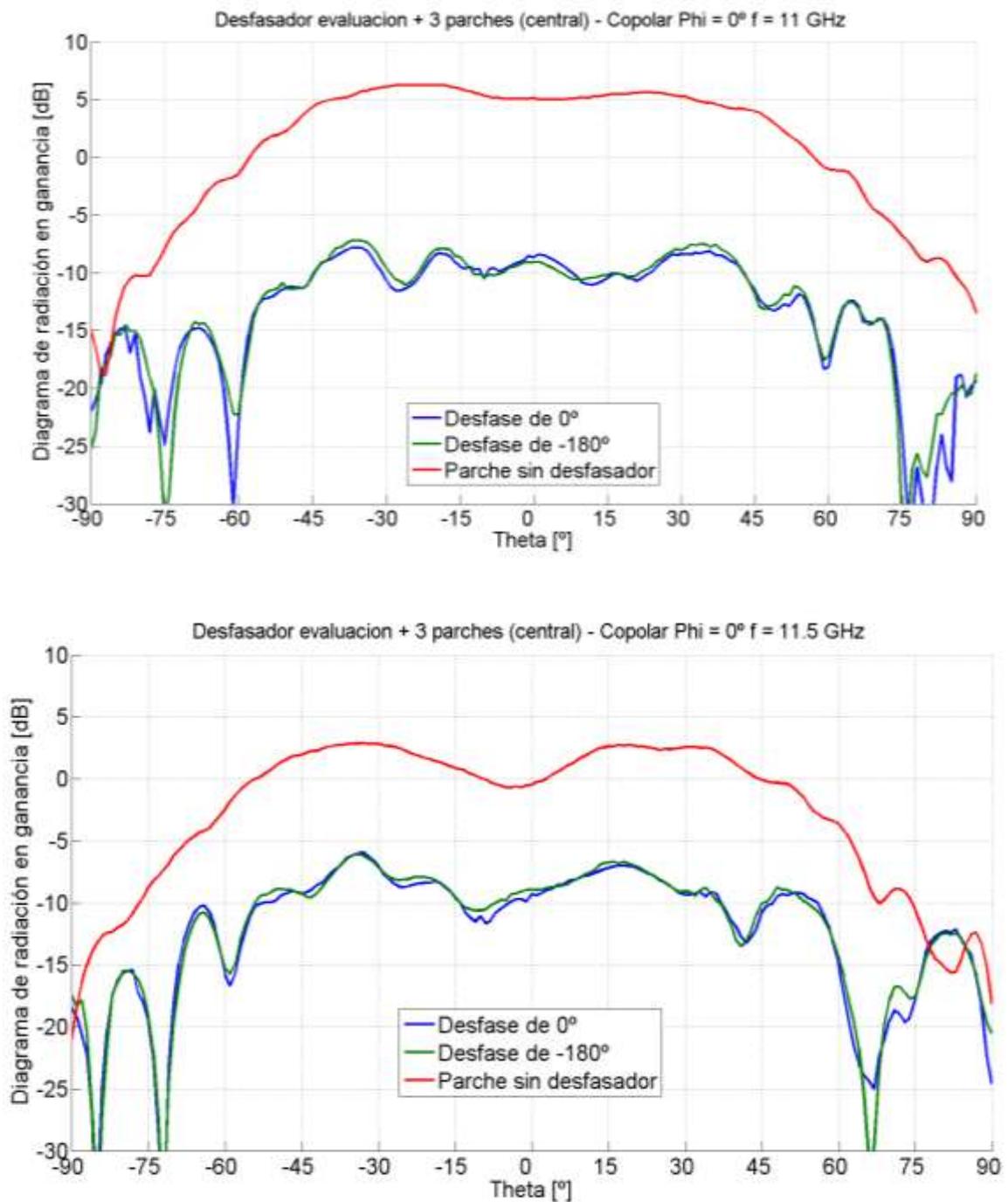


Figura 3.4 Montaje típico para medidas en la cámara anecoica

Durante este tipo de medidas se realizan barridos de  $-90$  a  $90$  grados del plano horizontal o azimut (debido a limitaciones en longitud de los cables de alimentación, no se podía realizar un giro mayor), cubriendo la parte frontal de radiación del parche.

Se realiza la medida para la frecuencia central de diseño y las dos frecuencias extremas, y para todos los estados de fase posible para el componente, pudiendo comparar de esta forma el cambio del diagrama de radiación y la potencia de señal en función del estado programado en el desfasador.



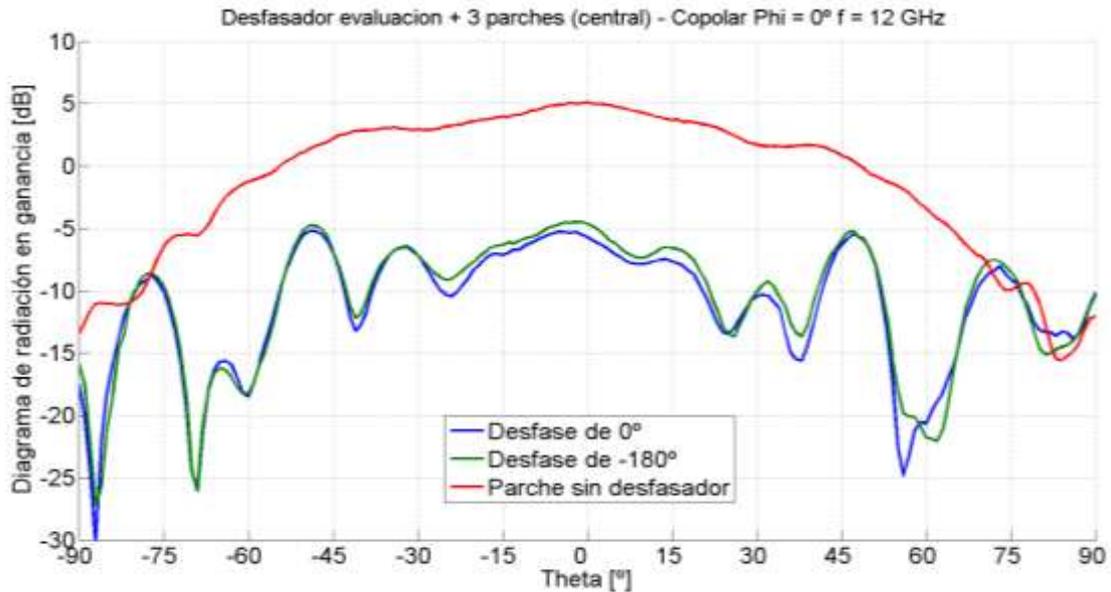


Figura 3.5 Diagramas de radiación del desfasador de evaluación

Como ya se había observado en las anteriores pruebas, el nivel de señal que se detecta en el diagrama de radiación es considerablemente inferior al que tendría una antena de parche por sí sola, sin incluir el desfasador. La mera inserción de éste en el circuito genera una gran atenuación, con respecto a los valores presentados en su hoja de componente, y distorsiona bastante la forma que adopta el diagrama de radiación, haciéndolo diferir del original con la aparición de diversos nulos, en algunos casos. También cabe destacar que esta “deformación” de la radiación se ve acentuada a medida que se aumenta la frecuencia de trabajo, debido a que se acerca más al extremo máximo de funcionamiento del componente.

### 3.2.3 Comprobación de estado final

Debido al mal funcionamiento encontrado durante las pruebas anteriores, se decide realizar una valoración exhaustiva de los componentes que conforman el sistema de desfasador de evaluación. Estas comprobaciones se llevan a cabo tanto para observar el estado físico como eléctrico del circuito.

Las primeras pruebas que se realizaron permitieron averiguar el mal funcionamiento provocado por el switch biestado y la caída de potencia de la fuente de alimentación debida a un sobreconsumo (problemas explicados en la sección 3.2.1 del presente documento).

Debido a los niveles de señal tan bajos que se podían observar en las gráficas de los diagramas de radiación, se decidió investigar que podía ocasionarlos; descubriendo rápidamente, al medir las alimentaciones del desfasador con un multímetro, que uno de los condensadores colocados en las alimentación de  $\pm 5$  no se comportaba correctamente, lo que podía hacer que el desfasador no estuviera alimentado de la forma necesaria.



Figura 3.6 Imagen ampliada de los componentes de la placa de evaluación

### 3.3 Circuito conjunto de tres desfasadores

La etapa siguiente del proyecto predecesor fue la construcción de un circuito conjunto que contuviera a tres desfasadores, con el objetivo de comprobar los efectos cruzados que podían tener entre ellos.

Para este diseño, se tuvo que realizar una estructura metálica que soportara la placa de circuito impreso y donde se pudieran conectar y atornillar todos los conectores SMA, además de alojar la circuitería necesaria.

#### 3.3.1 Comprobación de estado

Teniendo en cuenta los problemas encontrados al realizar las pruebas con la placa de evaluación, se decide realizar primero una comprobación del estado físico y eléctrico del circuito de tres desfasadores, antes de pasar a las mediciones o pruebas de radiofrecuencia como tal.

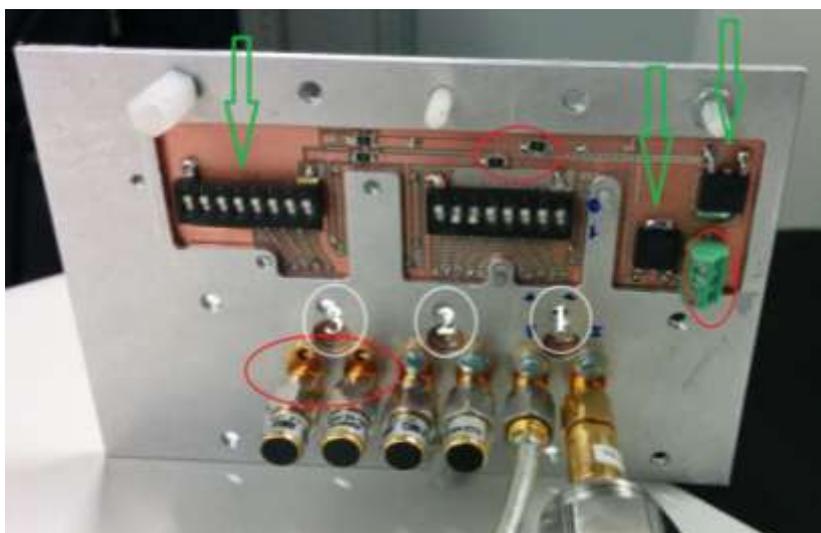


Figura 3.7 Circuito impreso de 3 desfasadores

Incluir los reguladores de tensión para las líneas de alimentación y el switch triestado (en caso de necesitar un '1' lógico, se conecta la pista a Vcc, y en caso de necesitar un '0' lógico, se conecta a GND internamente) garantizan una mejor alimentación de los desfasadores y las líneas de control.

Debido al prolongado uso y la tracción ejercida por los cables de alimentación durante los montajes, las pistas que unen la clema de alimentación con el resto del circuito se habían levantado del sustrato, y aunque seguían ejerciendo el contacto suficiente para proporcionar alimentación al diseño, su seguridad se encontraba en un estado precario. De igual forma que los conectores del tercer desfasador (situado más a la izquierda de la *Figura 3.7*), sujetos únicamente por la soldadura del alma del conector a la placa de circuito impreso, debido a que los tornillos de sujeción que debían anclarlos a la estructura metálica, habían desaparecido.

Para poder montar y comprobar cada desfasador por separado, el proyecto precedente utilizó resistencias de  $0 \Omega$  para separar las alimentaciones en el momento del montaje, aunque se cree que un método mejor hubiera sido la utilización de "jumpers" debido a su menor posibilidad de error durante la soldadura.

### 3.3.2 Pruebas de desfase mediante analizador de redes

Al igual que con el desfasador de evaluación, se pretendía obtener los parámetros de dispersión que caracterizan el circuito y al desfasador y comprobar los niveles de potencia según el estado programado. En este caso, las pruebas se realizaron para los desfasadores '1' y '2' del array, dejando de lado al desfasador número '3' debido a los problemas de conexión que podían ocasionar sus conectores.

#### 3.3.2.1 Desfasador número uno

Mediante el montaje que se puede apreciar en la *Figura 3.7*, se miden los parámetros de dispersión de dicho desfasador, obteniendo los resultados que se muestran a continuación.

En la imagen a continuación se puede observar que el parámetros  $S_{11}$  presenta valores superiores a 0 dB, situación que no puede darse en la realidad. Esto se debe a un posible error cometido durante la calibración de los equipos, lo que implica un empeoramiento en la exactitud de los resultados. Aun con esta eventualidad, se puede comprobar el funcionamiento de la estructura medida, y por los resultados obtenidos, no se volvió a repetir dichas medidas

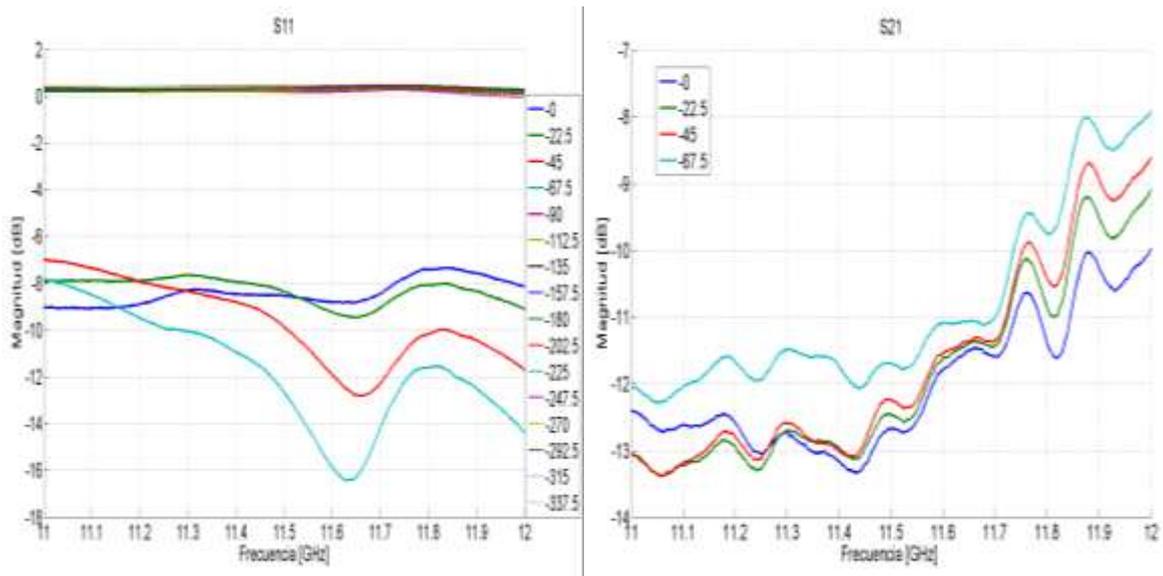


Figura 3.8 Parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  desfasador 1 del array de 3 elementos

Se observa claramente en los resultados un completo malfuncionamiento del circuito. No solo los niveles de señal son defectuosos y tienen una inestabilidad a lo largo de todo el ancho de banda de trabajo demasiado acentuada, sino que el desfasador deja de funcionar cuando se produce la activación del tercer bit más significativo de los bits de control.

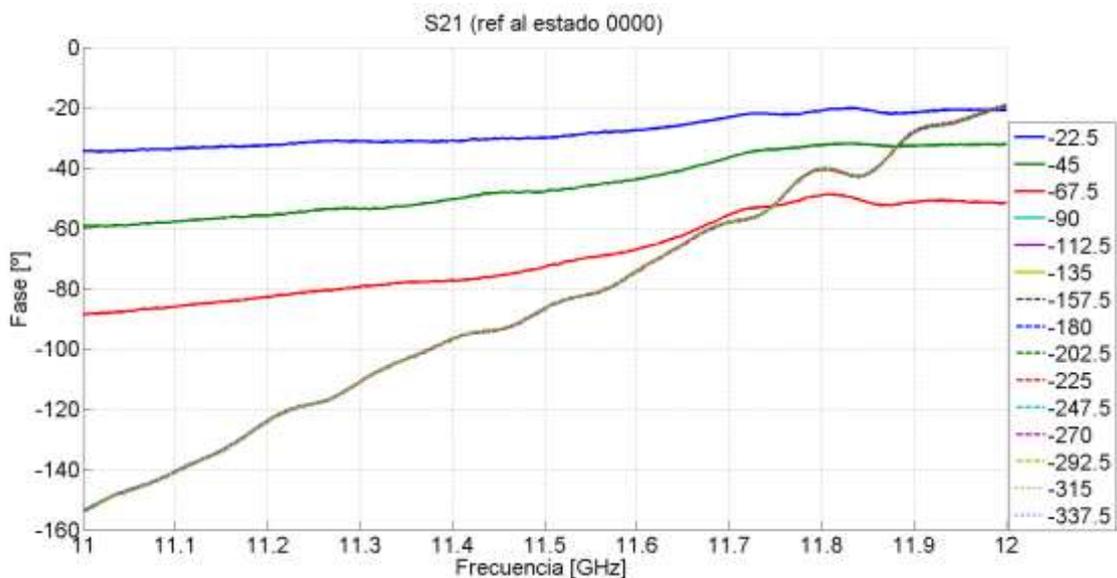


Figura 3.9 Parámetro  $S_{21}$ (fase). Desfasador 1 de array de tres

Teniendo presente los resultados de los parámetros de dispersión, y sabiendo que la alimentación del desfasador ha sido comprobada previamente, se puede concluir que el desfasador está estropeado.

### 3.3.2.2 Desfasador número dos

Realizadas las mismas mediciones que para el caso del primer desfasador, se obtienen los siguientes resultados de sus parámetros de dispersión.

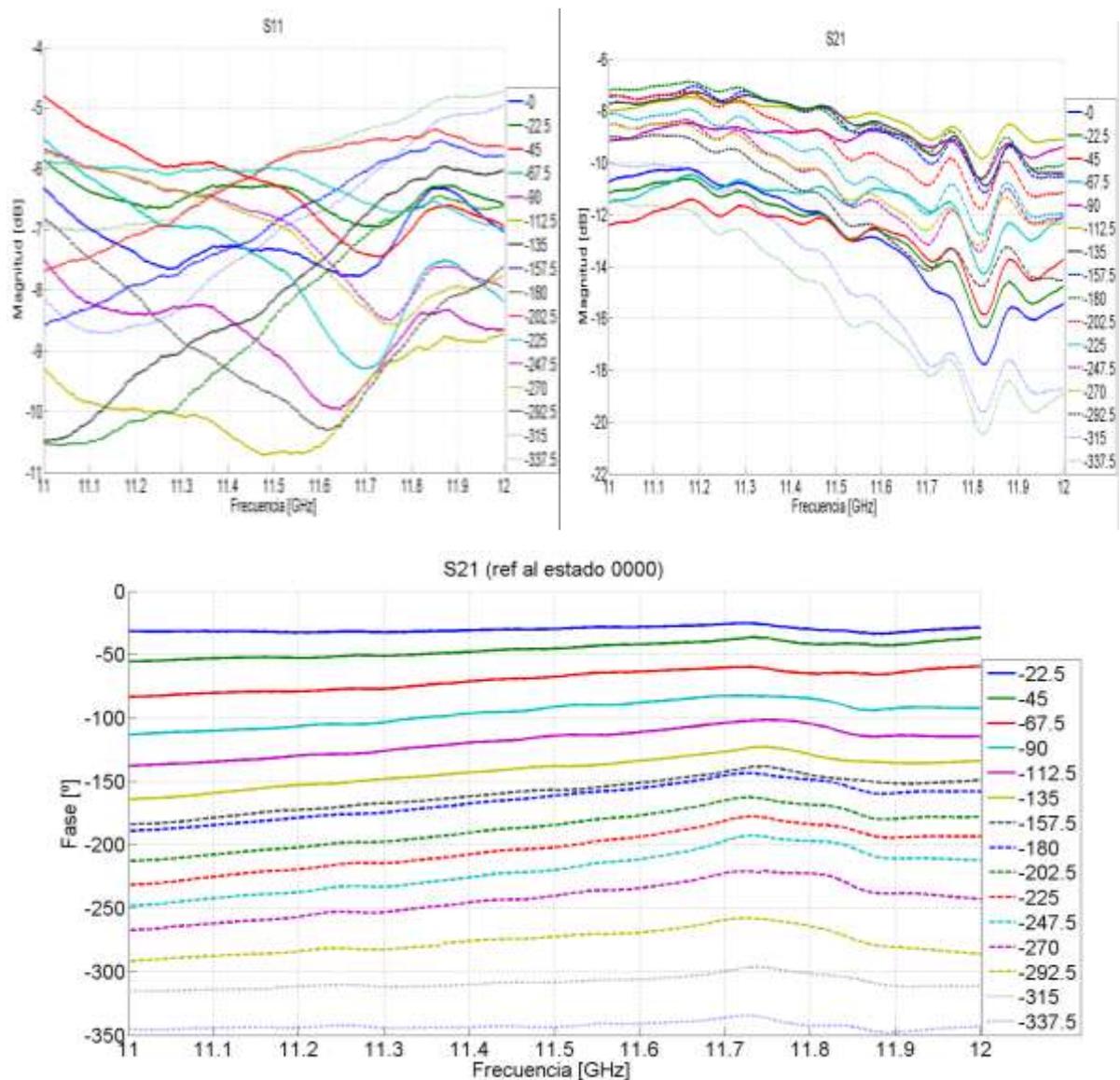


Figura 3.10 Parámetros S desfasador 1 array de tres

En este caso los resultados, en cuanto a nivel de potencia, se encuentran bajo los mismos rangos que los medidos durante las pruebas del proyecto previo. Para el caso de los estados de desfase, se puede observar una gran variabilidad en función de la frecuencia, lo que no coincide ni con los datos de la hoja del fabricante ni con las medidas tomadas en el proyecto anterior.

### 3.4 Conclusión

Debido al uso continuado llevado a cabo por el proyecto precedente y algunas imperfecciones encontradas en el diseño, las construcciones se hayan en bastante mal estado, no siendo útiles para la reutilización en este proyecto, aunque sí como modelos de estudio. Por consiguiente, se decide volver a fabricar los diseños anteriores, pero incluyendo las mejoras que solucionen los fallos previamente encontrados como el uso de switch triestados en lugar de biestados, y reguladores de tensión, así como adaptar estos diseños para la utilización del control mediante el puerto serie.

Aunque la peculiaridad que se muestra a continuación se descubrió bastante después de realizar estas pruebas preliminares con las construcciones, se ha decidido incluirla en esta sección dada su relevancia y la relación con los diseños del proyecto predecesor.

Teniendo en cuenta el funcionamiento de la cámara anecoica, donde se tomaron las medidas en radiación para los desfasadores del array de tres elementos (Sección A.B “Medidas en cámara anecoica de la EPS”) se observa una incorrección en el montaje que se realizó de los elementos que conforman el sistema, más específicamente, en cuanto al recorrido que realiza la señal de radiofrecuencia dentro del sistema.

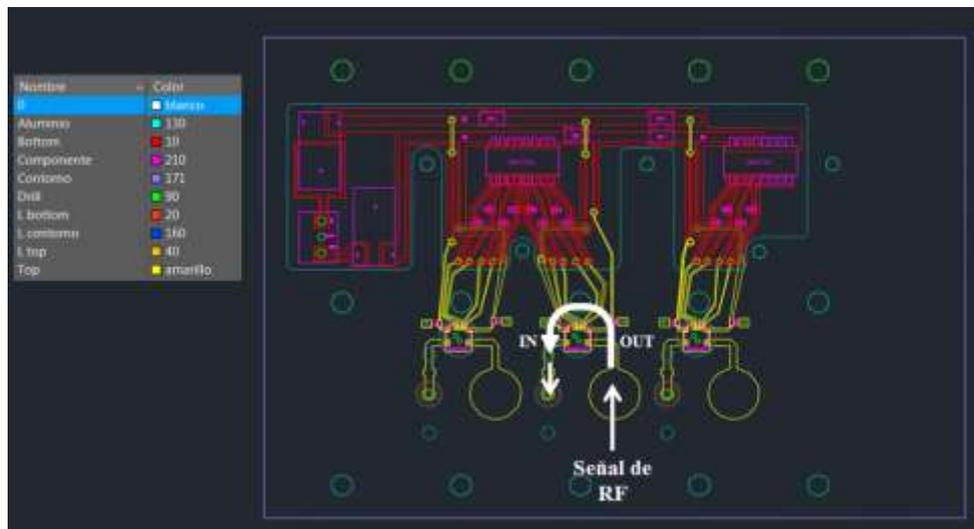


Figura 3.11 Circuito impreso conjunto de 3 desfasadores y 3 parches

Debido a que el sistema que se compone tiene como dispositivo receptor el diseño construido por el proyecto precedente (representado en la figura anterior), la potencia de radiofrecuencia estaría siendo emitida por el elemento transmisor, y se recibiría en los parches del array, de tal forma que el sentido de circulación de la señal (representado por la flecha curva) entraría por el puerto de salida del desfasador, en vez de por el puerto de entrada.

Este sentido “inverso” de circulación no supone ningún problema en cuanto a la modificación de la componente de fase de la señal, debido a que el desfasador funciona correctamente en ambas direcciones, y tampoco supone una diferencia considerable en cuanto al nivel de señal debido a que las características de reflexión y transmisión del dispositivo son muy similares en ambos sentidos de circulación.

Teniendo lo anteriormente expuesto, se decide modificar la colocación del dispositivo en los siguientes diseños implementados, para adecuar la circulación del flujo de potencia al recorrido entrada-salida mostrado en la hoja de datos del componente, haciendo coincidir la entrada de la señal de RF por el terminal de entrada, aunque se está construyendo una antena de recepción.



## 4 Diseño y caracterización de placa de evaluación

### 4.1 Introducción

En este capítulo se explican todos los procesos de diseño y fabricación llevados a cabo para obtener un circuito de evaluación mediante el cual poder comprobar el funcionamiento del elemento desfasador de manera individual.

A continuación se desarrollarán aquellos cambios o ajustes realizados sobre los diseños que ya se tenían del proyecto precedente, intentando incluir diversas mejoras en los mismos, y viendo cómo afectan estos cambios al funcionamiento del circuito, mediante la realización de una serie de pruebas y medidas y el análisis de los resultados derivados de las mismas.

### 4.2 Diseño y fabricación

La fabricación se ha realizado íntegramente en el taller de circuitos impresos de la EPS con el material necesario para ello (Sección A.A “*Taller de circuitos impresos de la EPS*”) .A continuación, se describe tanto las herramientas, componentes y materiales necesarios al efecto como los procedimientos seguidos para la construcción.

#### 4.2.1 Diseño de los circuitos impresos

Teniendo en cuenta los diseños realizados por el PFC predecesor, se dispone de una serie de pautas y materiales a partir de los cuales trabajar. Debido a esto, todos los diseños y las modificaciones que puedan hacerse a los mismos serán coherentes con las decisiones tomadas con anterioridad, intentando aprovechar al máximo los estudios realizados; pero introduciendo, en la medida de lo posible, las mejoras que se consideren oportunas.

La idea inicial para construir el circuito de evaluación era comprobar el comportamiento de un único desfasador y familiarizarse con el funcionamiento y las características del mismo bajo las condiciones concretas de prueba del laboratorio.

Debido a que el circuito impreso realizado por el proyecto precedente no se encontraba operativo, se decide replicar estos diseños y construir una nueva placa de evaluación, pero teniendo presente la posibilidad de incluir un tipo de control distinto utilizando el puerto serie del componente, y la evolución de estos diseños implementando las mejoras que se propusieron en la sección anterior.

El primer paso a seguir, es reconocer el tipo de material sobre el cual se va a trabajar. El sustrato utilizado para este proyecto proviene del elegido por un proyecto anterior, con vistas a la integración conjunta de ambos.

El proyecto “*Diseño de un array lineal de parches sobre guía rectangular para banda Ku*” de Sergio Casas Olmedo, utilizaba un sustrato RF-35 de Taconic, con las características recogidas en la tabla:

RF-35 Taconic	
Características	$\epsilon_r = 3.5$ $\delta = 0.0001$
	H (mm) = 0.508

Tabla 4—I Características de sustrato utilizado

Los diferentes diseños que se van a presentar a continuación se realizaron íntegramente utilizando AutoCAD. Este software ofrece la posibilidad de diseñar cualquier pista de transmisión dentro del circuito arista a arista, permitiendo una máxima resolución y control sobre la forma que adoptara dicha pista. Estas prestaciones son de especial importancia a la hora de dibujar las líneas de RF y los *pad* de conexión, debido a que se debe tener en cuenta las limitaciones del taller de circuitos impresos a la hora de diseñar los circuitos.

Se barajó durante un tiempo realizar los circuitos en Altium, debido a su dilatada utilización para el diseño de circuitos impresos, pero su comodidad a la hora de rutar las pistas eléctricas de control se veía eclipsado por la complicaciones que presentaba a la hora de dibujar las líneas de RF.

Debido a esto, se utilizó únicamente Altium para el diseño de algunos circuitos que solo contenían electrónica de corriente continua.

#### 4.2.1.1 Circuito de evaluación sobre chasis. Versión 1

Este diseño es el primero en el que se pensó para el circuito de evaluación del desfasador. A grandes rasgos se asemeja mucho al diseño ideado por el proyecto precedente, pero incorpora algunas modificaciones que se esperaba ayudarán tanto a mejorar el funcionamiento así como facilitar los procesos de construcción.

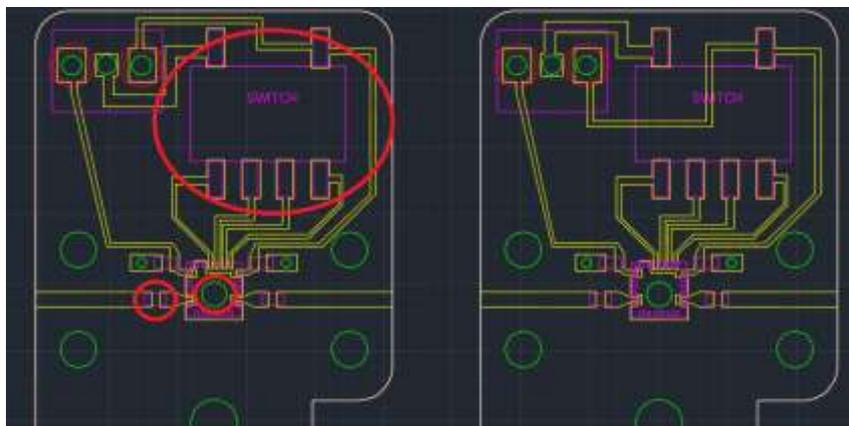


Figura 4.1 Circuito de evaluación. Versión 1

En la anterior ilustración podemos ver los tres cambios implementados para esta primera versión del circuito, resaltados con círculos rojos:

- **Switch tri-estado:** la primera modificación surgió debido a las pruebas que se realizaron con las placas heredadas del proyecto precedente, y supuso la utilización de un switch tri-estado en lugar de uno de dos estados con resistencias de pull down. Aunque en el documento de *datasheet* se encontraban los planos de un switch de 4 bits, los distribuidores habituales del grupo de investigación no disponían de él; por lo tanto, se tuvo que cambiar por uno de 8 bits, notablemente más grande, y que no entraba dentro del espacio previsto del chasis metálico, lo cual suponía *a priori* la necesidad de fabricar un nuevo soporte de aluminio.
- **Filtro de Señal:** se pensó en la instalación de unos condensadores a la entrada y la salida del desfasador, con la intención de que filtraran cualquier tipo de interferencia que se pudiera producir dentro de las líneas de RF. Debido a una documentación insuficiente, no fue hasta la medida del primer circuito construido (como se comentara en la sección dedicada a este propósito) cuando se descubrió que dichos desfasadores eran incapaces de funcionar a la frecuencia de diseño del circuito de radiofrecuencia.
- **Taladro central:** el taladro central del circuito, que tiene como finalidad permitir conectar correctamente la masa del desfasador, se aumentó de tamaño notablemente con el objetivo de implementar otro tipo de conexionado distinto a la unión con vías realizado por el proyecto precedente. Este nuevo procedimiento se explica con mayor detenimiento en la sección correspondiente de este capítulo, dedicado a la fabricación y montaje de los circuitos impresos.

También se puede observar, que en estos diseños iniciales no se tuvo en cuenta el control serie alternativo que se quería implementar, y se decidió que para dicho control sería necesario diseñar una placa distinta con el rutado adecuado.

#### 4.2.1.2 Circuito de evaluación sobre chasis. Versión 3

Este diseño surgió debido a la limitación de espacio provocada por la necesidad de utilizar un switch de control de 8 bits. En un principio se empezó a diseñar una placa de mayor tamaño (con su respectivo chasis metálico de aluminio) donde colocar toda la electrónica de control necesario, incluyendo nuevos elementos como reguladores de tensión y condensadores de rectificación. Todo esto dio como resultado la versión 2 del circuito, de la cual no se ha mantenido ningún plano, pero tras meditar un poco los costes de producción y la dificultad que derivaba de este tipo de diseño se tomó una nueva dirección en cuanto al diseño de las placas.

La idea que surgió fue la de separar el diseño en dos placas distintas, una con la circuitería de corriente continua, y otra con los componentes de radiofrecuencia, unidas mediante una clema de conexión y una cinta de cables.

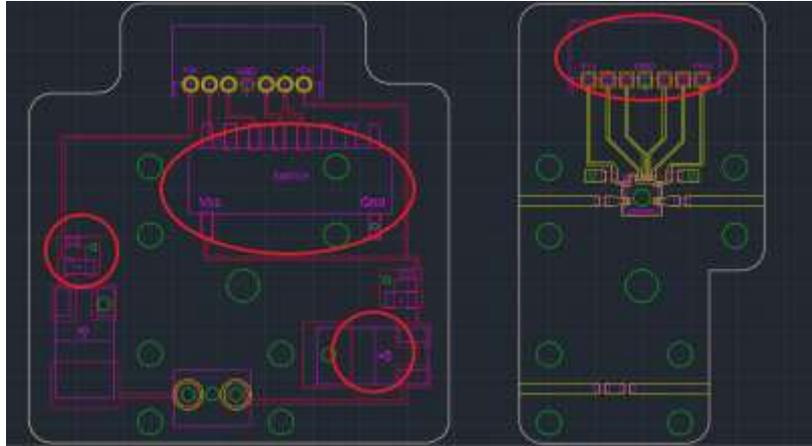


Figura 4.2 Circuito de evaluación. Versión 3. Placa de control (Izq.) y placa de RF (Dcha.)

Resultados, mediante círculos rojos, se muestran las modificaciones más representativas de este diseño con respecto a los diseños anteriores:

- **Clema de datos y cinta de conexión:** utilizando una clema de conexión de la familia Molex y una cinta de cables crimpados, se podrían realizar dos circuitos totalmente separados y controlar el funcionamiento del desfasador asegurándonos que la parte DC y RF no se “molestaran” entre sí al no encontrarse físicamente en el mismo sustrato, y que no se tiene limitaciones de espacio en el circuito de control.
- **Switch tri-estado de 8 bits:** como ya se ha comentado anteriormente, esto era una necesidad más que una modificación intencionada, y como se puede apreciar por la figura, solo se utilizan la mitad de las posiciones totales del componente.
- **Reguladores de tensión:** para mejorar la alimentación del desfasador y debido a que ya no se tiene ninguna limitación de espacio, se incluyen en este diseño un regulador para cada una de las dos alimentaciones necesarias de  $\pm 5$ , los cuales ya se utilizaban en el array de 3 elementos del proyecto precedente, aunque no en el circuito de evaluación).
- **Circuito de acondicionamiento de los reguladores:** como se indica en la hoja de datos de los reguladores, si no se desea utilizar dicho componente como un regulador de tensión variable; es necesario incluir a la salida del integrado un condensador de 100nF y un tántalo de 10 $\mu$ F. Aunque el PFC previo ya utilizaba los reguladores de tensión, no incluía en ninguno de los diseños este circuito de acondicionamiento.

La idea original de montaje era colocar la placa que contiene el desfasador con su plano de masa enfrentado al plano de masa de la placa de control paralelo, como puede observarse en los taladros mostrados en verde en la figura 4.2, con el objetivo de crear una única pieza conjunta. Debido a que también se estaban haciendo pruebas para implementar en control mediante el puerto serie, y debido a los problemas que estaba dando montar el desfasador; se pensó en realizar un rutado de pistas del circuito del desfasador, que permitiera integrar ambos controles minimizando los cambios, sobre todo de cara a realizar un único (y correcto) montaje de desfasador.

#### 4.2.1.3 Circuito de evaluación sobre chasis. Versión 5 y versión 7

Como se ha comentado anteriormente, estas versiones del circuito de evaluación son las primeras en tener el cuanta la utilización de ambos controles (control mediante el puerto serie, o control serie, y control mediante switch o control paralelo).

Debido a que se esperaba realizar bastantes modificaciones antes de llegar a un diseño final en las placas de control, los circuitos implementados hasta ahora para el control paralelo en AutoCAD se “importaron” manualmente a Altium y se utilizó este mismo programa para el diseño de la placa puente del circuito de control serie.

En un principio, ambos controles iban a estar implementados sobre la misma placa, permitiendo acceso a uno u otro mediante la colocación de una serie de “jumpers”. Esta idea se desechó tras algunas investigaciones, debido a que la placa de control serie en realidad era más bien una placa “puente” entre el circuito del desfasador y el circuito que contiene el microcontrolador de Atmel que se iba a utilizar.

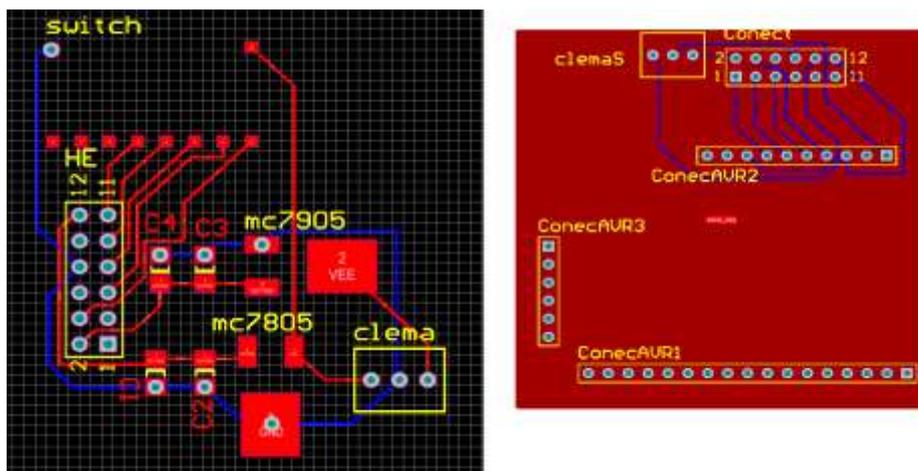


Figura 4.3 Circuitos de control para versión 5 y 7 en Altium. Control paralelo (Izq.) y control serie, placa puente (Dcha.)

A continuación, se muestran las últimas dos versiones del circuito de evaluación del desfasador, con sus modificaciones más relevantes señaladas con círculos rojos:

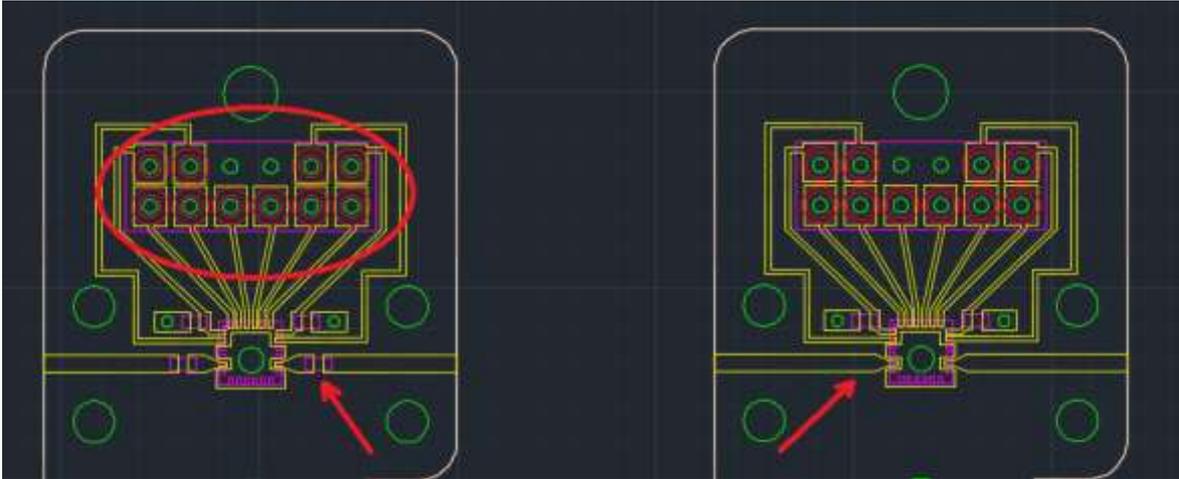


Figura 4.4 Circuito de evaluación. Versión 5 (Izq.) y versión 7 (Dcha.)

- **Clema de pines verticales 2x6:** En lugar de los conectores de la familia Molex que se barajaron en diseños anteriores, se optó por un componente mucho más simple y de coste reducido (indicado mediante el círculo de color rojo). Se realizó un rutado de todas las conexiones necesarias para el control mediante ambos sistemas (control paralelo y serie) y gracias al ya citado componente, de un tamaño bastante reducido en comparación con los anteriores, se podían comunicar dichas pintas con un header de una cinta de cables.
- **Condensadores de filtrado:** Como ya se había explicado anteriormente (sección 4.2.1.1), estos elementos a la entrada y salida de las líneas de RF no eran adecuados para el circuito; aunque su funcionamiento erróneo solo se descubrió tras bastantes medidas, debido a que se pensaba que era el desfase el elemento que estaba fallando (al ser un elemento más crítico en el circuito). La única diferencia entre la versión 5 y la 7, es la eliminación de estos elementos, aunque debido a su importancia y las mejoras que generaron, se decidieron incluir en un diseño individual para remarcar este hecho.

La versión 5 del circuito de evaluación fue el primer diseño construido y medido, y aunque los resultados no fueron nada satisfactorios, permitió descubrir algunos errores de diseño y mejorar las técnicas que se utilizaban para el montaje de las construcciones. La versión 7 fue el primer diseño en funcionar de manera ligeramente satisfactoria.

#### 4.2.2 Componentes utilizados

Para la realización de este proyecto se disponía de una cantidad considerable de componentes ya disponibles del proyecto anterior, en consecuencia solo fue necesario adquirir los condensadores tipo tántalo para el circuito de acondicionamiento de los

reguladores de tensión del control paralelo y reponer algunos otros de los cuales se consideraba poca cantidad la disponible.

No se adquirieron ni conectores SMA nuevos, ni nuevos desfasadores, debido a que con los disponibles en el inventario y aquellos que se pudieron reutilizar de las placas del proyecto predecesor se estimó cubierta la necesidad.

#### 4.2.2.1 Chasis de soporte de aluminio

La utilización de un chasis es totalmente necesaria debido al uso de los conectores SMA que alimentan las líneas microstrip de RF y para aportar rigidez y consistencia a la placa que contiene el desfasador, dado que el sustrato utilizado únicamente tiene un espesor de 0.508 mm y es muy débil para soportar la estructura, que tendería a combarse con demasiada facilidad.

Gracias a los cambios introducidos durante la versión 3 del diseño (separación en dos placas individuales) es posible reutilizar el chasis metálico diseñado y construido por el proyecto previo, únicamente realizando un par de pequeñas modificaciones para adaptar la forma del chasis a las nuevas necesidades. Estas modificaciones se detallan a continuación:

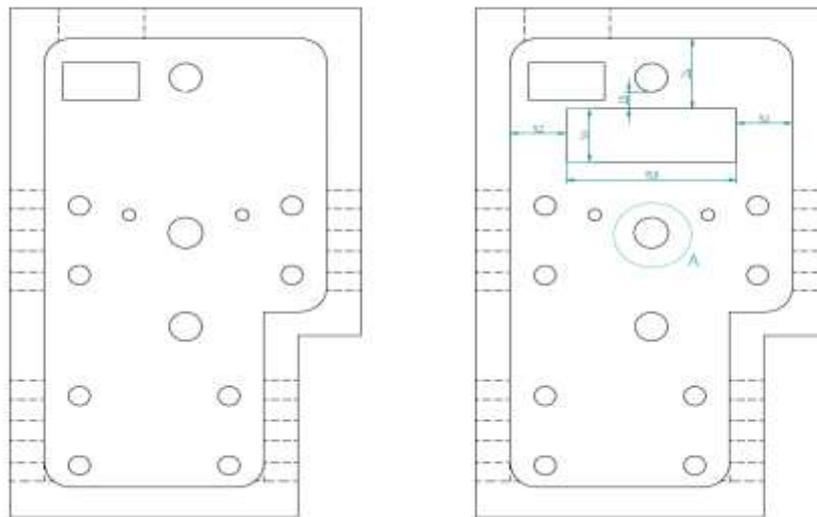


Figura 4.5 Modificaciones del chasis metálico. Antes (Izq.) y después (Dcha.)

Como se puede observar en la figura, las dos modificaciones realizadas sobre el chasis metálico se referían a un rebaje del fondo plano de la construcción. El rebaje superior, con forma rectangular, tiene la función de acoger los pines y soldaduras de la clema de alimentación de 2x6 (función similar al rebaje original realizado en la parte superior izquierda), mientras que el rebaje inferior se realizó para evitar doblar la placa al introducirla en el chasis debido al saliente de la vía que se utiliza para conectar la masa (nuevo tipo de montaje que se explicara en la sección 4.2.3.2 más adelante).

Ambas modificaciones, con una profundidad de 1.5 mm, se realizaron de forma exitosa y sin ningún problema en el taller de mecanizado de la Escuela Politécnica Superior. La reducción de costes fue significativa, no fue necesario construir un nuevo soporte y, además, las modificaciones se realizaron internamente en la universidad.

#### 4.2.2.2 Desfasador digital

A continuación se explicarán las características y diferentes funcionamientos del desfasador digital utilizado para la realización de este proyecto.

La función principal del desfasador digital es la de proporcionar 16 estados de fase RF desde 0° hasta 337.5°, con una resolución de 22.5°/estado, dentro de la banda Ku de 8 a 12 GHz de funcionamiento. Una de las ventajas fundamentales de este integrado es su montaje eléctrico. Tan solo necesita dos tensiones de alimentación de 5V y -5V, así como su encapsulado PQFN que proporciona unas dimensiones mínimas, aunque dificulta bastante el montaje del componente. Este componente permite dos tipos de control distintos, serie y paralelo, los cuales se explican a continuación:

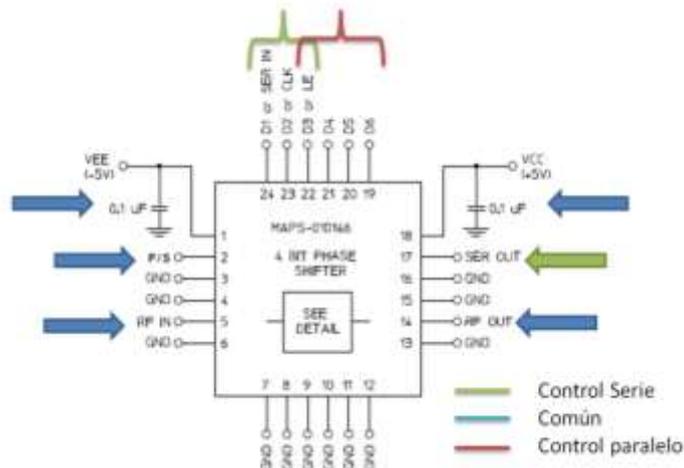


Figura 4.6 Dibujo esquemático del desfasador y pines críticos.

- **Control Paralelo:** cuando el bit de control P/S se encuentra en estado bajo ('0' lógico), el control del desfasador se realiza mediante los bits 'D3', 'D4', 'D5' y 'D6', quedando 'D1' y 'D2' deshabilitados, así como el pin de salida serie.

Para programar un estado en el desfasador, es necesario mantener una tensión estable durante todo el tiempo que se quiera modificar la componente en fase de la señal de entrada del puerto 'RF IN'.

Para modificar el estado actual, simplemente es necesario modificar el estado del bit de control necesario. La configuración de estados se muestra en la tabla a continuación, extraída del *datasheet* del componente.

Truth Table (Digital Phase Shifter) <sup>10</sup>

D6	D5	D4	D3	D2	D1	Phase Shift
0	0	0	0	X	X	Reference Phase
0	0	0	1	X	X	22.5 deg
0	0	1	0	X	X	45 deg
0	1	0	0	X	X	90 deg
1	0	0	0	X	X	180 deg
1	1	1	1	X	X	337.5 deg

10. 0 = CMOS Low; 1 = CMOS High, X is CMOS Low or High

Figura 4.7 Tabla de verdad del desfasador digital

- **Control Serie:** cuando el bit de control P/S se encuentra en estado alto ('1' lógico), el control del desfasador se realiza mediante los bits del interfaz de control serie ('D1' como puerto de entrada serie, 'D2' como reloj y 'D3' como *enable*), quedando los bits 'D4', 'D5' y 'D6' inhabilitados.

Para programar un estado en el desfasador, es necesario transmitir la palabra de control de 6 bits más significativos (MSB) mediante el puerto de entrada serie, con la misma tabla de verdad que el control paralelo, pero rellenando con '0' los estados 'D2' y 'D1' y, a continuación, producir un flanco ascendente en la señal de control de *enable*, que permanecerá activa el tiempo que se quiera modificar la componente en fase de la señal de entrada del puerto 'RF IN'. Pasados 6 ciclos de reloj, la palabra introducida por el puerto de entrada serie se recogerá en el puerto de salida serie, en el mismo orden en el que fue introducida.

Todo este funcionamiento puede verse reflejado en el esquema de tiempos representado a continuación, y extraído del *datasheet* del componente.

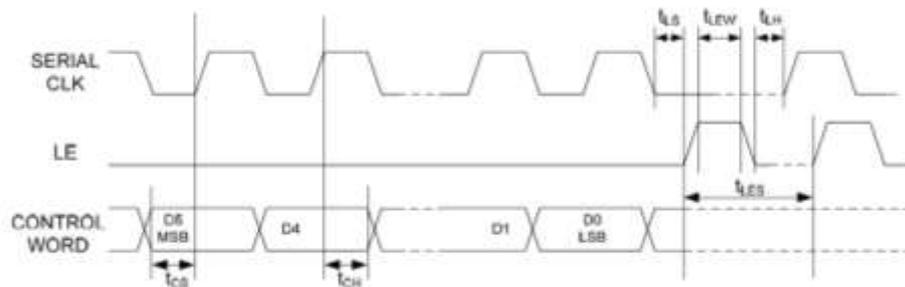


Figura 4.8 Esquema de tiempos del funcionamiento serie

#### 4.2.2.3 Programador para la familia MegaAVR de Atmel

Para conseguir el control serie, se utiliza como elemento principal el microcontrolador ATMega32u4, cuya placa está diseñada y construida para extraer las funcionalidades necesarias para conseguir el control de la antena. Se utiliza el protocolo de comunicación serie (SPI), mediante un dispositivo programador AVR, para cargar el programa de control junto con todas las librerías necesarias.

Este elemento ha sido diseñado y construido en el HTClab, para un proyecto anterior.

#### 4.2.2.4 Circuitería de corriente continua

Como ya se comentó anteriormente, la mayoría de la electrónica necesaria para este primer circuito ya se encontraba en inventario, y solo fue necesario comprar algunos elementos. De todas formas, a continuación se muestra un listado de componentes:

Componente	Descripción	Código compra	Precio unidad (€)
Reg. Tensión +5	MC7805CDT6 Dpak	RS 463-650	0.442 €
Reg. Tensión -5	MC79M05BDTG Dpak	RS 785-7143	0.48 €
Cond. Cerámico	100nF 10v VJ0603-Y-104-K-N-Q-A-O	RS 751-2014	0.386 €
Cond. Tántalo	10uF 6.3v 0603 [1608]	RS 801-5401	0.086 €
Switch 3-state	S3S Serie TIM-R	Farnell 1522015	0.997 €
Desfasador	Map 4 bits 8-12GHz	Mauser 937-MAPS-010146-T5	26.61 €
Clema alimentación	3x1 filas thru hole	RS 220-4276	0.946 €
Clema de pines	6x2 filas thru hole	RS 767-0928	1.04 €

Tabla 4—II Componentes para circuito de evaluación

Exceptuando las clemas de alimentación de las placas de evaluación, el resto de componentes fue elegido de montaje superficial (SMD), y de un tamaño lo suficientemente grande para que pudieran ser soldados a mano, pero que permitieran realizar unas construcciones lo más reducidas posibles en tamaño: Encapsulado 0603 para los condensadores, 369C para ambos reguladores, y TII-08 para el switch tri-estado.

#### 4.2.3 Montaje: fabricación, soldadura, y conexionado

Una vez terminado el diseño del circuito final, y escogidos los componentes adecuados, es necesario transformar los diseños realizados en AutoCAD (formato .dxf o .dwg), a ficheros de tipo GERBER (formato .gbr). Estos ficheros contienen las coordenadas necesarias para que la maquinaria de producción de circuitos impresos realice los movimientos y el posicionamiento adecuado de los taladros y cortes, y se construya la placa final para su posterior montaje.

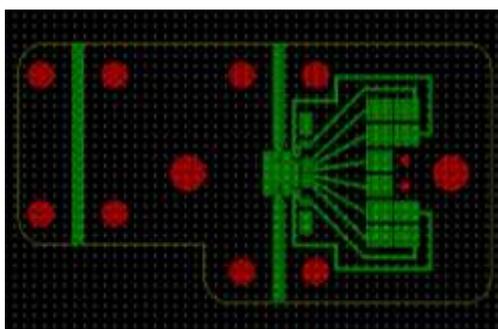


Figura 4.9 Interfaz de ADS para obtención de gerbers

Para el proceso de conversión se utiliza el software ADS, que permite convertir los ficheros de AutoCAD, y realizar cualquier modificación en caso de que fuera necesario. La construcción de un circuito impreso requiere de la producción de una determinada cantidad de archivos .gbr, como se explica a continuación:

<i>Nombre de la capa / fichero gerber</i>	<i>Descripción</i>
<i>Taladros.gbr</i>	Posición y diámetro de taladros no metalizados
<i>Contorno.gbr</i>	Contorno que delimita el PCB completo
<i>Top.gbr*</i>	Cara superior del PCB (pista de control DC y conexiones RF)
<i>Bottom.gbr*</i>	Cara inferior del PCB (plano de masa y vaciados necesarios)
*NOTA: En caso de realizar un diseño con un número mayor de capas, es necesario un .gbr por capa	

Tabla 4—III Archivos gerbers necesarios para una construcción de circuito impreso

Debido a que no se dispone de las herramientas químicas necesarias para metalizar los taladros realizados en el taller de circuitos impresos, es necesario realizar el conexionado de las dos capas, Top y Bottom, del circuito de forma manual, utilizando vías metálicas cilíndricas de pequeño tamaño.

#### 4.2.3.1 Vías tradicionales

Generalmente, este proceso se realiza mediante un metalizado interno de los taladros, a través de un proceso químico directo. En lugar de esta opción, existe la posibilidad de utilizar remaches cilíndricos de precisión de 0.6 mm, y 0.4 mm, y una remachadora de precisión, compuesta por cabezales, inferiores y superiores, intercambiables de distintos tamaños.



Figura 4.10 Remachadora y remaches/vías

Aunque este proceso es muy sencillo, existe cierta dificultad a la hora de realizarlo. Debido al delgado espesor del sustrato utilizado, una presión excesiva al realizar el remachado de la vía puede provocar que la placa se combe, o incluso que llegue a partirse el *pad* en cuestión

#### 4.2.3.2 Vías para el plano de masa del desfasador.

Durante la realización del proyecto previo, se detectaron numerosos problemas con la soldadura del desfasador al circuito impreso. La mayor parte de estos problemas se debían a la realización previa de dos vías, debajo del desfasador, para conectar el plano de masa del componente al de la placa de circuito impreso. Al realizar estas dos taladros y remachar las dos vías utilizadas, las cabezas de las vías quedaban sobresaliendo ligeramente por encima del nivel del sustrato; esto provocaba que la colocación del componente encima de su isleta no fuera del todo precisa, y que el componente cabeceara a la hora de soldarlo, dificultando enormemente el alineamiento de las pistas con los *pad* de soldadura.

Después de algunas pruebas previas realizadas soldando desfasadores viejos sobre placas de prueba, se obtuvo una solución al problema antes citado. En vez de los dos taladros con sus respectivas vías, se pasó a un único taladro de una dimensión notablemente mayor (diámetro centrado de 1.6 mm en lugar de dos taladros de diámetro 0.7 mm) y se invirtió el proceso completo de soldadura; realizando primero el conexionado del desfasador, y después soldando la masa del componente por medio del taladro antes citado. El proceso completo, con los pasos críticos y una figura explicativa del nuevo sistema para colocar las vías se detallan a continuación:

1. Construcción del circuito completo en el taller de la EPS.
2. Soldadura de las patas de control y de RF del perímetro del desfasador.
3. Mediante un uso abundante de flux sobre el taladro central de 1.6 mm, se coloca una pequeña capa de estaño sobre el plano de masa del desfasador, dentro del orificio del taladro.
4. A través del orificio del taladro, se introduce la cabeza de una vía de 0.4 mm de diámetro, y calentándola, se derrite el estaño inferior; para que la cabeza de la misma quede en contacto (y rodeada por estaño) con el plano de masa del componente.
5. Recubriendo la sección más estrecha de la vía, se consigue realizar la conexión entre el plano de masa del circuito con la misma, y por consiguiente, con el plano de masa del componente. Con un alicate de corte, se secciona el cilindro de vía sobrante, dejando el conjunto soldado lo más cercano al nivel del sustrato
6. Utilizando vías de 0.6 mm mediante el remachador de precisión, se crean las conexiones entre el plano de masa y las isletas de los dos condensadores de las alimentación. Aplicando una pequeña capa de estaño en ambos caras del circuito para asegurar la conexión de la vía.
7. La clema de conexionado se suelda con normalidad a las pistas de conexión y la masa del circuito, y también se secciona la parte sobrante para acercarla al nivel del sustrato.

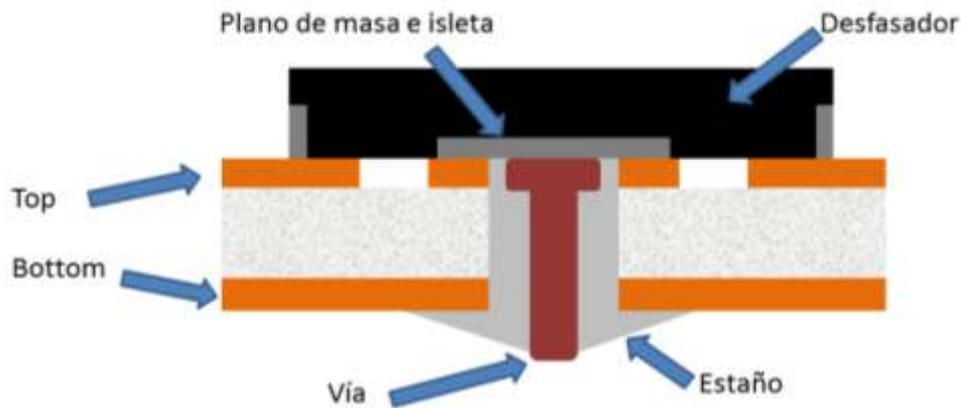


Figura 4.11 Esquema de montaje para el plano de masa del desfasador

Aunque este procedimiento puede parecer enormemente simple, existe algunos errores que se producen con regularidad: al calentar el estaño de la vía se descoloca; no se consigue introducir suficiente estaño en el orificio y la conexión entre vía y plano de masa es débil; debido a la capilaridad el estaño fluye fuera del orificio al calentarlo, etc. Si estos errores no se detectan a tiempo pueden ocasionar una soldadura errónea.

### 4.3 Comprobaciones y medidas.

La masa común del circuito y su correcta unión con el plano de masa del componente es un elemento crítico del montaje del circuito. Por desgracia, es la unión más difícil de comprobar de toda la construcción, debido a que el propio desfasador realiza algún tipo de unión interna entre las líneas de entrada y salida de RF con el plano de masa común, lo que hace imposible la comprobación de conexiones mediante un multímetro para verificar la correcta colocación de las vías.

Aunque notablemente menos crítico para el circuito, pero igualmente importante, la correcta unión de los pines de control y de alimentación si puede ser comprobada mediante un multímetro, observando si las conexiones son correctas y si no se han producido cortocircuitos entre las pista o la isleta de masa del componente.

Todo lo anteriormente explicado hace referencia a la parte de control en corriente continua pero, evidentemente, el buen funcionamiento de las construcciones también se debía verificar en cuanto a la parte de radiofrecuencia.

Esta funcionalidad se comprobaba de dos maneras distintas (procesos ya vistos en la sección 3) mediante el analizador de redes para observar los parámetros de dispersión del circuito, y en la cámara anecoica para generar los característicos diagramas de radiación.

El primer diseño en implementarse físicamente fue el correspondiente a la versión 5 del “circuito de evaluación sobre chasis”, así como sus correspondientes placas de control serie y paralelo.

Se montaron un total de cuatro circuitos de prueba para el desfasador (construyendo tres placas distintas en el taller de circuitos impresos), y se tuvieron que montar dos placas distintas para cada uno de los controles, debido a algunos problemas que se describen a continuación.

#### *4.3.1 Comprobaciones eléctricas*

Como se ha comentado con anterioridad, estas pruebas comprobaban la correcta unión de las conexiones de los distintos circuitos mediante un multímetro.

##### *4.3.1.1 Circuito de control paralelo*

Una vez construido y montado este circuito se pasó a verificar las tensiones de alimentación de cada uno de los terminales, descubriendo un rutado incorrecto en el regulador de +5V. Para que los reguladores de tensión proporcionaran un voltaje correcto de  $\pm 5V$  (tensión que también debía utilizarse para alimentar el switch de control), era necesario alimentarlos mediante una tensión cercana a los  $\pm 7.5V$ , y debido a un rutado paralelo al regulador, el switch de control era alimentado con esta misma tensión. En definitiva, se disponía de los reguladores alimentados a  $\pm 7.5V$  (que proporcionaban una tensión de salida de  $\pm 5V$ ), pero el switch también estaba alimentado con esta misma tensión, por lo que tendríamos una alimentación del desfasador de  $\pm 5V$ , pero un control de estado mediante  $+7.5V$ .

Mediante un pequeño cable y un corte en la pista correspondiente se solventó este problema, aunque posteriormente se construyó una placa nueva con las correcciones necesarias.

##### *4.3.1.2 Circuito de control serie. Placa puente*

Debido a un cambio de la configuración de los pines de control de la placa AVR fue necesario realizar un nuevo rutado en la placa intermedia de conexión debido a que las señales de control ya no se encontraban distribuidas correctamente.

##### *4.3.1.3 Circuito de evaluación sobre chasis. Placa 1*

Al comprobar las conexiones de este circuito con el multímetro, se detectaron algunas irregularidades. Dos de las pistas de control digital se encontraban cortocircuitadas, lo que provocaba el malfuncionamiento del sistema; y además, la pista de alimentación a  $-5V$ , se encontraba conectada erróneamente con la isleta de masa debido a una fina fibra sobrante del mecanizado del sustrato.

Estos errores provocaron que al conectar el control paralelo, la fuente de alimentación se limitara para no estropearse. Debido a esto, se cree que el desfasador podía haberse

dañado, y en consecuencia, se decidió montar un desfasador nuevo, para lo cual era necesario desmantelar la placa completamente.

#### 4.3.1.4 Circuito de evaluación sobre chasis. Placa 2, 3 y 4

Por las razones antes comentadas se decidió montar la placa número 2, en la cual no se observaron problemas a nivel eléctrico. Debido a los problemas que se detallarán más adelante, fue necesario realizar el montaje de los circuitos P3 y P4, en los cuales no se encontraron problemas durante las comprobaciones eléctricas.

#### 4.3.2 Medidas mediante analizador de redes

Una vez construidas las placas posteriores, y cuando su funcionamiento eléctrico ha sido correctamente verificado, se procede a realizar las primeras pruebas en radiofrecuencia, para observar cómo se produce el cambio en la componente en fase de la señal RF, y cómo se comporta el sistema a través de sus parámetros de dispersión.

Mediante una herramienta conocida como “*Universal Text Fixture*” de Anritsu, adquirida por el laboratorio, se pudo conectar el circuito de evaluación al analizador sin necesidad de soldar conectores al sustrato de la placa. Esta herramienta, parecida a un banco de trabajo, está compuesta por dos conectores con puntas de RF de precisión para líneas microstrip y coplanar con su respectiva conversión a línea coaxial, junto con unas mordazas de sujeción mediante resorte para la colocación correcta del circuito.

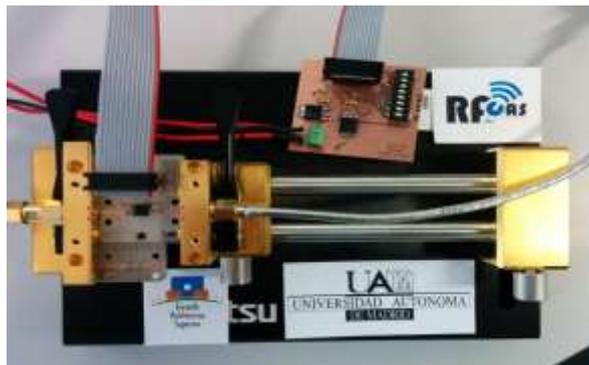


Figura 4.12 Circuito de evaluación con control paralelo sobre Universal Text Fixture

Por razones de precisión y veracidad de los datos que se iban a obtener, debido a la introducción de esta herramienta de soporte que hace imposible calibrar el equipo con los kits de calibración de los que se dispone en el laboratorio, es necesario caracterizar y construir un kit TRL (*Through, Reflect, Line*) específico para este sistema. Este kit de calibración se diseñó conforme a las especificaciones indicadas dentro de la

documentación del propio analizador de redes, y sus características se programaron para ser utilizados por el aparato.

El kit TRL generado está compuesto por tres elementos: una línea de transmisión como la utilizada en el circuito (*Through*), una línea terminada en circuito abierto (*Reflect*) y una línea de transmisión como la utilizada en el circuito y de mayor longitud que la definida por el *Through* (*Line*).

Gracias a las características diseñadas para estos elementos, y la calibración que realizan en el analizador de redes; los datos que se obtienen del funcionamiento del desfasador se pueden tomar justo al borde de sus terminales de RF, sin incluir las líneas de conexión ni ningún elemento previo.

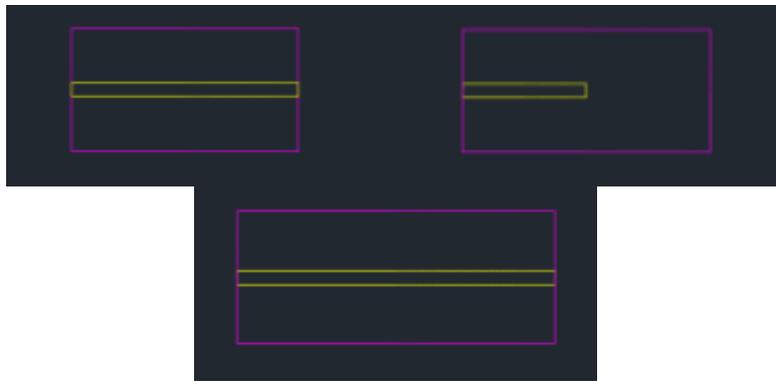


Figura 4.13 Kit TRL creado para el diseño 7, y utilizado en la placa 3

Debido a la eliminación de los condensadores en las líneas de RF del desfasadores fue preciso realizar dos kits TRL distintos al pasar del diseño 5 al 7.

Las pruebas realizadas mediante el control paralelo se repiten para todos los diseños construidos, con objeto de comparar los dos juegos de resultados obtenidos, y evaluar las ventajas e inconvenientes de cada uno de los controles.

#### 4.3.2.1 Circuito de evaluación sobre chasis. Placa 2

Una vez solventados los errores eléctricos cometidos durante el montaje de la primera placa, se pasó a conectar esta nueva construcción al analizador de redes para poder comprobar su comportamiento.

Al realizar las primeras medidas, enseguida se observó que la placa que se estaba probando no funcionaba como se esperaba, como puede observarse en la siguiente figura. En ella se muestra el parámetro  $S_{21}$ , el cual aporta información sobre la transferencia de potencia tanto en módulo como en fase, una vez realizado el proceso de desfase. Este desfase tampoco se producía correctamente, creando una modificación en la fase demasiado dependiente de la frecuencia además de incorrectos.

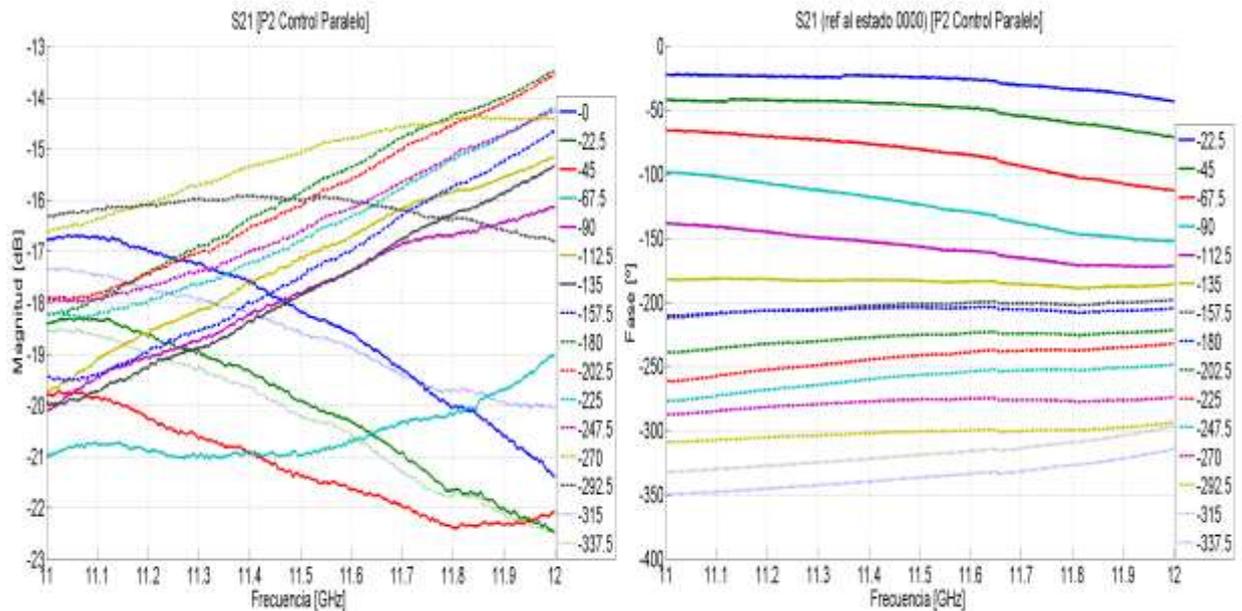


Figura 4.14 Parámetros  $S_{21}$  Placa 2 con control paralelo

En la figura anterior puede observarse con claridad la acentuada variabilidad de la fase, cuyo valor de desfase cambia considerablemente en función de la frecuencia elegida. Resultados que no coinciden de ninguna manera con los esperados, ni con los proporcionados por el fabricante. Además, la transmisión de potencia que genera el integrado es muy reducida, manteniéndose siempre por debajo de -13 dB para toda la banda de trabajo (esto supone una transferencia de potencia del 5% de la emitida).

Pese a los pésimos resultados antes mostrados, se repitieron las medidas utilizando el control serie, para verificar que este funcionamiento incorrecto no se debía al tipo de control utilizado. Durante estas medidas se produjeron algunos problemas con el protocolo de comunicación programado en el AVR de control serie, que se debía solventar antes de proseguir con las medidas.

La palabra de datos que se enviaba para controlar el desfasador no provocaba el cambio de estados correcto debido a dos efectos distintos: asincronismo de la señal del reloj “CLK” con la señal “serialIN” de entrada, y desfase de la señal de *enable*, que además no permanecía en estado alto el tiempo suficiente.

Para solventar estos errores (y previamente, descubrir de que se trataban) se tuvo que utilizar un osciloscopio especial del grupo HTClab, así como la ayuda de uno de los proyectando de este grupo de investigación, que analizó las señales de control que se estaban enviando al desfasador y realizó los cambios necesarios en el código de programación del dispositivo de control para solucionar la comunicación entre las construcciones.

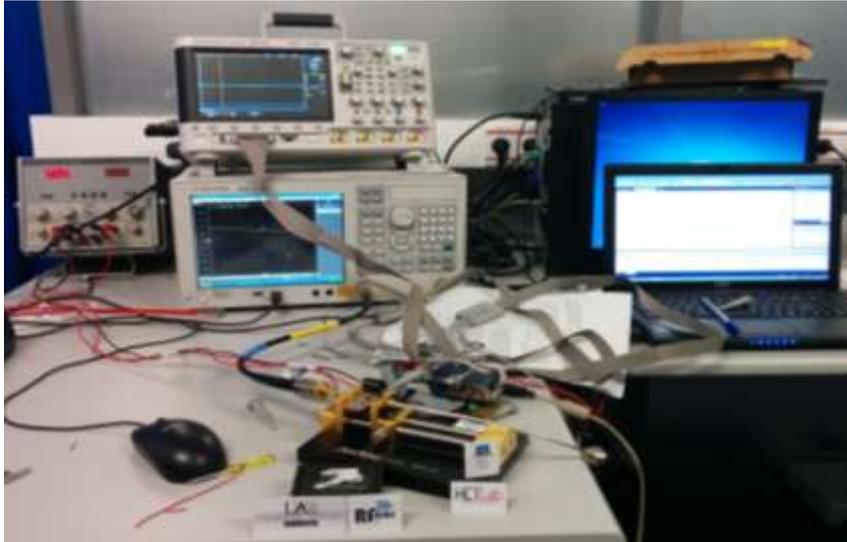


Figura 4.15 Despliegue de equipos para verificación del control serie

Los resultados obtenidos en radiofrecuencia para el circuito de prueba del desfasador utilizando el tipo de control serie ya correctamente implementado no presentó unos resultados nada satisfactorios, obteniendo unas medidas muy parecidas a las anteriormente mostradas para el control paralelo.

Durante bastante tiempo se realizaron diversas pruebas para intentar explicar este comportamiento, ninguna de las cuales aportó información relevante. Se sospechó de la inserción de los condensadores a la entrada y salida de las líneas de RF, y se realizaron algunas medidas montando ambos elementos sobre una línea de transmisión y midiendo sus características.

Según los resultados de estas pruebas, los condensadores por si solos no generaban el empeoramiento de la transmisión visto anteriormente pero al combinarlos con el comportamiento del desfasador, se producían los efectos anteriormente vistos. Se tardó bastante en descubrir y verificar este error, lo que provocó un retraso considerable en el proceso total de realización de este PFC.

#### 4.3.2.2 Circuito de evaluación sobre chasis. Placa 3

Al descubrir el malfuncionamiento que provocaban los condensadores, se modificaron los diseños del circuito de evaluación, dando lugar a la creación y posterior utilización del diseño 7, y la primera placa en implementarlo, la placa número 3.

Una vez construida, montada, y verificada eléctricamente, la placa número 3 se prueba mediante el analizador de redes para comprobar si se han solucionado los problemas de funcionamiento. Los resultados obtenidos en módulo se muestran a continuación, para ambos tipos de control:

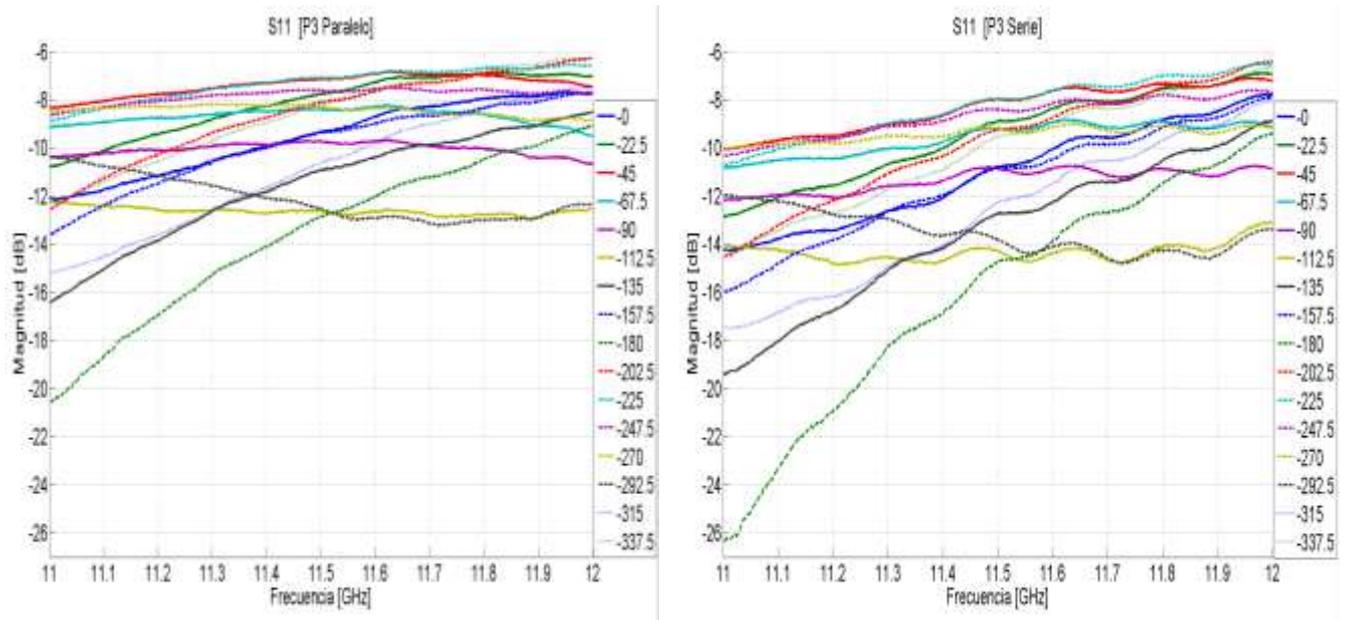


Figura 4.16 Parámetros  $S_{11}$  Módulo. Placa 3, ambos controles.

Es fácil observar el gran parecido que existe entre los resultados obtenidos para ambos controles, encontrando la adaptación del sistema siempre por debajo de los -6.5 dB, y produciéndose la mejor adaptación posible para la parte baja del estado 15 (desfase de -337.5°). Un comportamiento destacable del circuito global es la tendencia, a empeorar su adaptación a medida que se aumenta la frecuencia de trabajo.

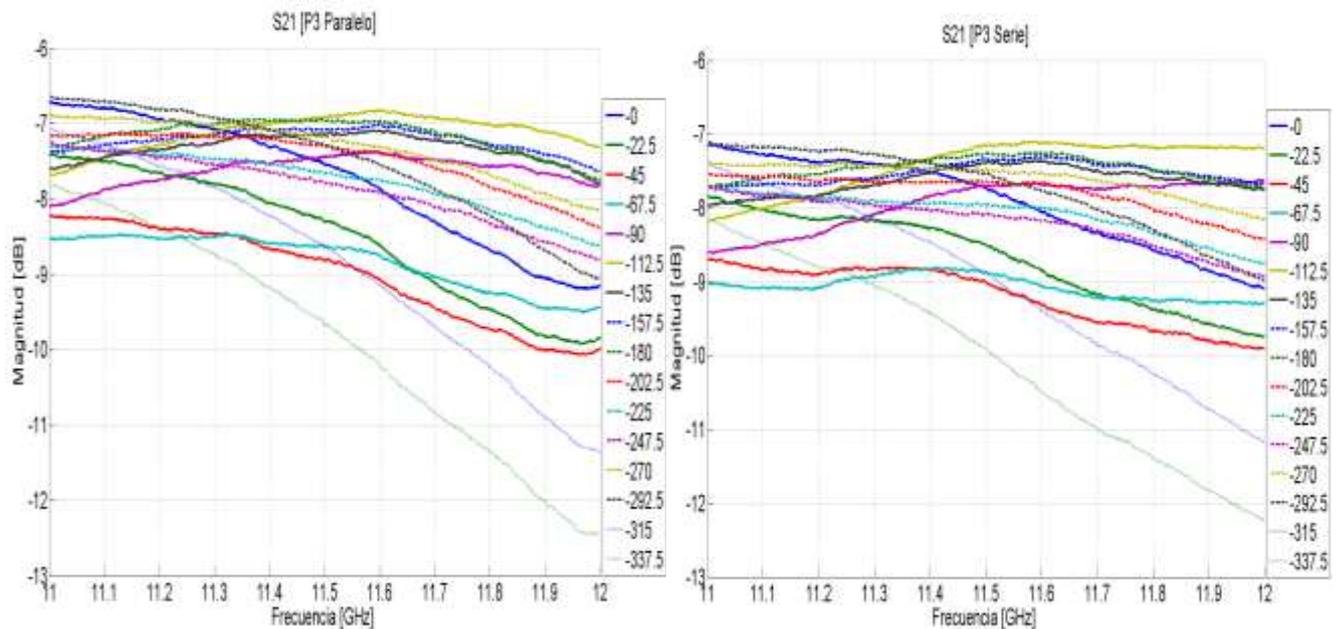


Figura 4.17 Parámetros  $S_{21}$  módulo. Placa 3, ambos controles

Al contrario que las graficas mostradas para el circuito de evaluación de la placa 2, los resultados mostrados anteriormente evalúan un comportamiento más aceptable en

cuanto a la transmisión de potencia. Se puede contar con un mínimo de transmisión siempre por encima de los -13 dB's, valores de pico que se producen para los estados 15 (-337.5°) y 14 (-315°). Sin tener en cuenta estos estados, la transmisión se encontraría por encima de los -10 dB's, y sería un poco más estable en frecuencia, además de bastante más parecida a la mostrada en las hojas de datos del componente. Un punto negativo a resaltar es que la transmisión en ningún momento supera los 6.5 dB's de pérdidas (transferencia de menos del 25% de la potencia emitida).

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la fase del parámetro  $S_{21}$  obtenido mediante el control serie. No se muestran también las medidas propias del control paralelo debido a su similitud con el control serie.

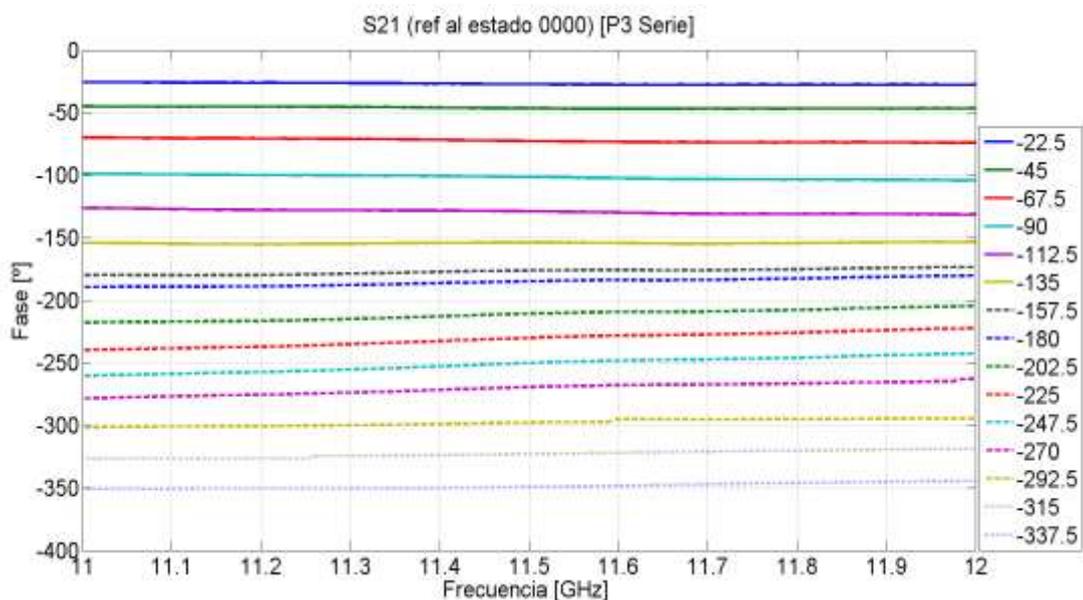


Figura 4.18 Parámetros  $S_{21}$  fase. Placa 3, control Serie

La variabilidad de estos resultados con la frecuencia, es notablemente inferior que los obtenidos para la placa 2, y solo se acrecienta ligeramente con la activación del bit de control más significativo (desfase de -180°).

#### 4.3.2.3 Circuito de evaluación sobre chasis. Placa 4

La placa número 4, correspondiente al segundo montaje realizado dentro del diseño 7, se llevó a cabo debido a los imprevistos surgidos durante la medida de los diagramas de radiación que se explican en la subsección siguiente, que hicieron que la placa 3 quedara inutilizada para seguir investigando sobre ella.

Aunque las medidas con el analizador de redes de la placa número 4 se realizaron de manera posterior a los diagramas de radiación de la placa 3, se incluirán en esta sección

para mantener la coherencia con la distribución de temática de las distintas secciones de este proyecto.

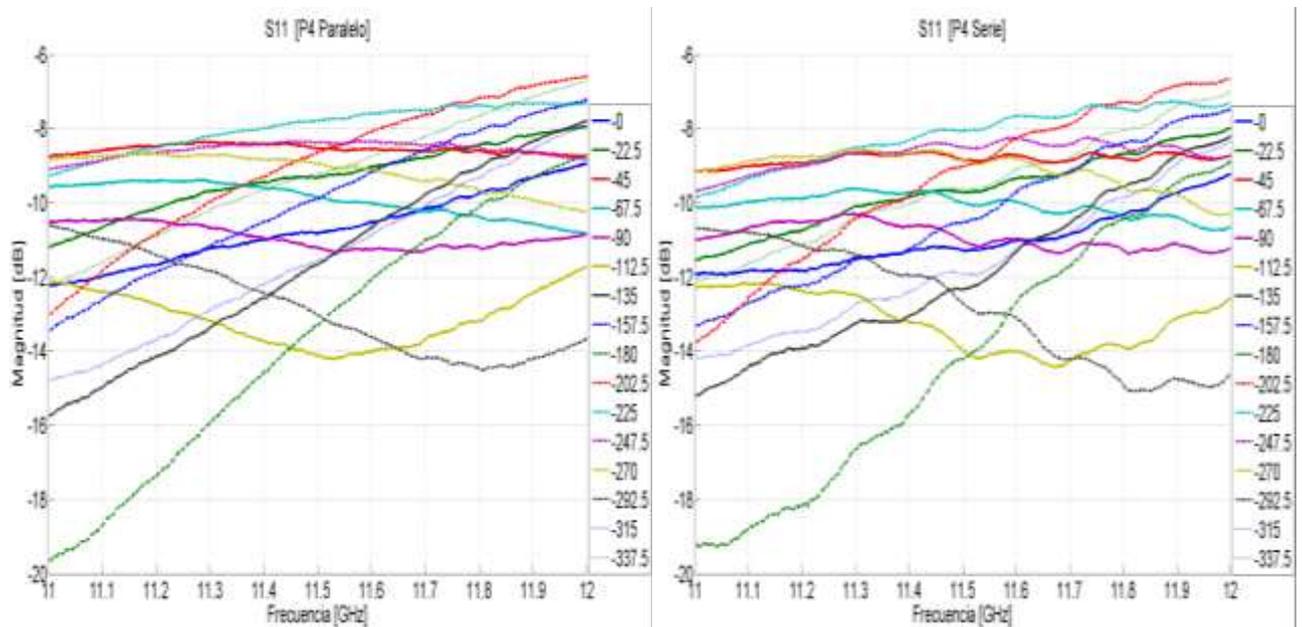


Figura 4.19 Parámetros  $S_{11}$  módulo. Placa 4, ambos controles

Como ocurría para la placa número 3, para toda la banda se consigue un valor de adaptación mínimo de -6.5 dB, y se reconoce un pico de adaptación para la banda baja del estado 15 (-337.5°) cercano a los -20 dB. Existe un cierto rizado entre las medidas tomadas para cada uno de los dos tipos de control, que aunque ya se apreciaba ligeramente en las medidas tomadas para la placa 3, se encuentra bastante más acentuada para estas pruebas.

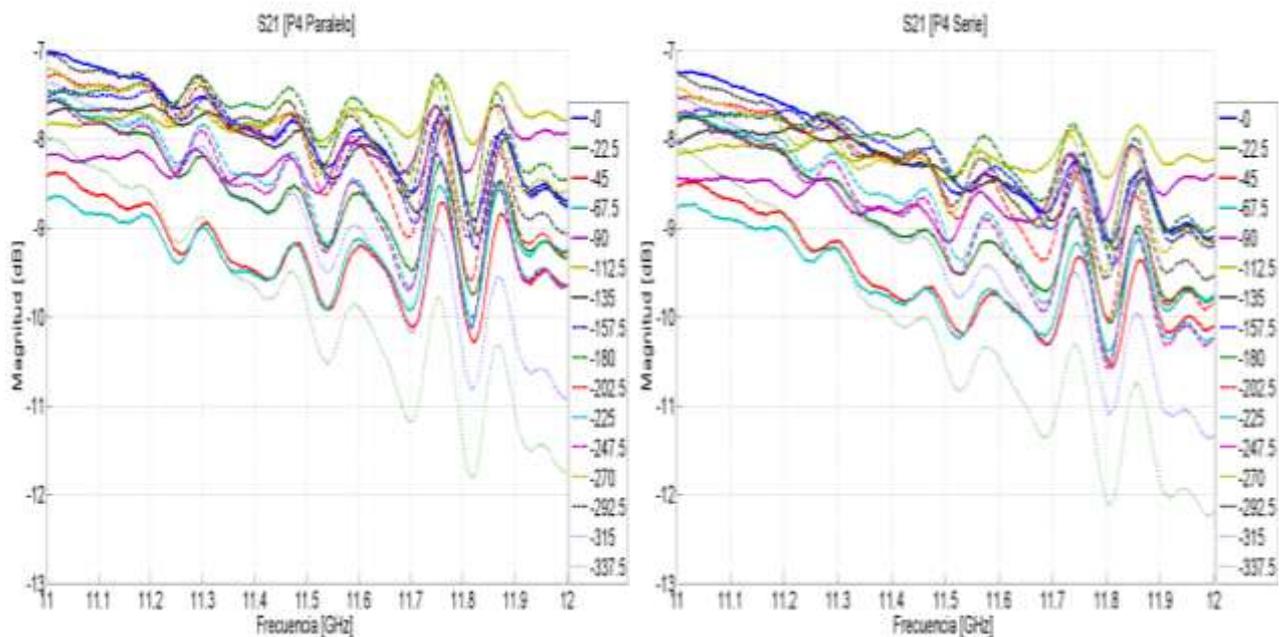


Figura 4.20 Parámetros  $S_{21}$  módulo. Placa 4, ambos controles

Antes de pasar a analizar los resultados mostrados en la Figura anterior, es importante destacar que este circuito de evaluación no se midió utilizando la herramienta “*Universal Text Fixture*”, si no que se montó sobre el chasis de aluminio mecanizado durante la realización del proyecto precedente, y lógicamente, el analizador de redes fue calibrado de distinta manera, y no mediante el kit TRL construido, por lo que estos resultados muestran también los efectos de las líneas de transmisión, conectores, y chasis.

Teniendo en cuenta lo anteriormente citado, lo primero que se puede apreciar en la figura previa es el acentuado rizado de los resultados, llegando incluso a convertirse en una oscilación realmente destacada a frecuencias cercanas a los 11.8 GHz, que se reproduce independientemente del control utilizado.

En este caso la transmisión de potencia en ningún momento llega a superar la barrera de los -7.5 dB's (0.5 dB's peor que la obtenida para las pruebas de la placa 3, donde se utilizaba el “*Universal Text Fixture*”), y los estados con la peor transmisión posible siguen siendo 14 (-315°) y 15 (-337.5°), cuyo valor de transmisión es muy similar al de las anteriores pruebas.

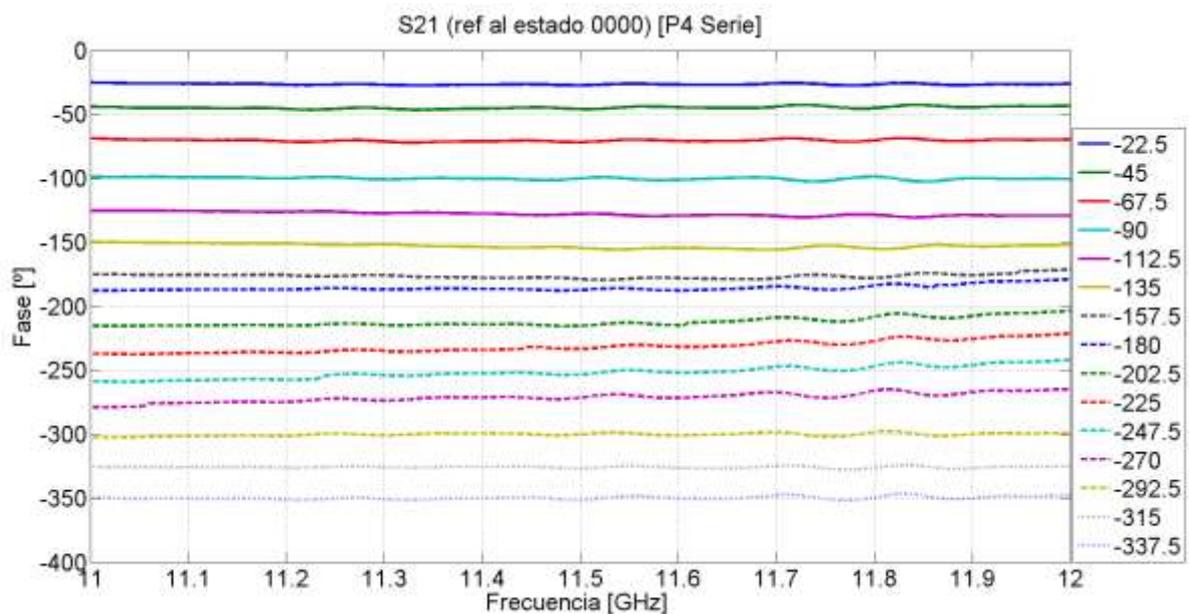


Figura 4.21 Parámetros S21 fase. Placa 4, control serie

Aunque los resultados en fase son muy parecidos a los anteriores, se observa la presencia del chasis metálico de soporte y el rizado que provoca en las frecuencias cercanas a los 11.8 GHz, así como el efecto de la activación del 4° bit de control.

Durante las pruebas realizadas por el proyecto predecesor ya se observó el efecto de la activación del bit de control más significativo, y se pensaba que al pasar a utilizar el control serie y no existir una conmutación eléctrica dentro del circuito, este efecto se solucionaría. Observando las pruebas realizadas, se puede concluir que este efecto es intrínseco del componente.

### 4.3.3 Medidas de radiación en la cámara anecoica

Aquellos diseños cuyos resultados son satisfactorios en las pruebas realizadas y explicadas anteriormente, pasan a la siguiente fase de comprobación.

Como medidas finales para verificar las características de funcionamiento de los diseños y las placas construidas, se montan dichas placas sobre el chasis metálico de soporte, realizado por el proyecto predecesor, y que permite soldar dos conectores SMA coaxial a las líneas microstrip de entrada y salida de radiofrecuencia.

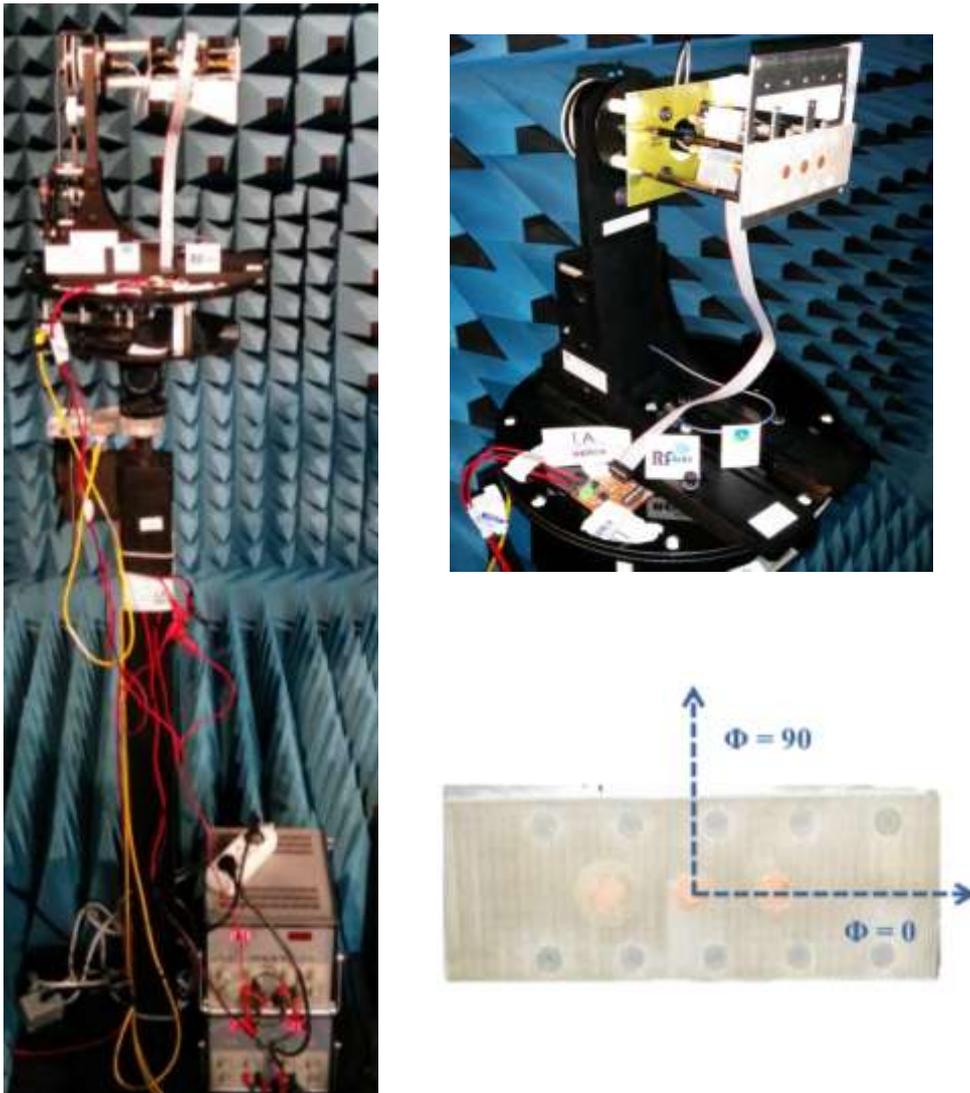


Figura 4.22 Montaje típico para medida en radiación en cámara anecoica

Con objeto de minimizar los gastos producidos durante la realización del proyecto y reducir el número de mecanizados y construcciones en el taller de circuitos impresos, se decide utilizar una array de parches ya construido (mismo array de tres parches utilizado durante las mediciones previas de la sección 3 “Mediciones previas”), conectando el

circuito de evaluación al parche central de array por medio de una transición macho-macho.

Lógicamente, para estos montajes se corrigió el error descrito en la sección de medidas previas, que hacía referencia al incorrecto flujo de potencia y la colocación inversas del desfasador teniendo en cuenta el funcionamiento de la cámara anecoica.

Debido a la longitud de los cables de alimentación y control de las distintas construcciones, se debe limitar el barrido de medida a tan solo  $180^\circ$ , realizándose barridos desde  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$  del plano de azimut y tomando muestras de la señal recibida con una resolución de  $1^\circ$ . Además, de cara a observar el comportamiento en radiación en función de la frecuencia de funcionamiento, se programan tres frecuencias distintas para la toma de datos, fijando la frecuencia central de diseño (11.5 GHz), y las dos limitantes de la banda de trabajo (11 y 12 GHz).

#### 4.3.3.1 Diagramas de radiación. Placa 3

Como se ha comentado anteriormente, después de las pruebas descritas en esta sección, realizadas sobre la primera placa del diseño 7, la construcción tuvo que ser desechada, en parte por los resultados obtenidos y en parte por la degradación de la misma durante las pruebas.

Los resultados siguientes, que muestran el nivel de señal obtenido directamente de la cámara anecoica, referentes al primer barrido de pruebas al conjunto desfasador-parche controlado mediante el circuito de control paralelo, muestran con claridad el importante problema con el que se encontró este proyecto:

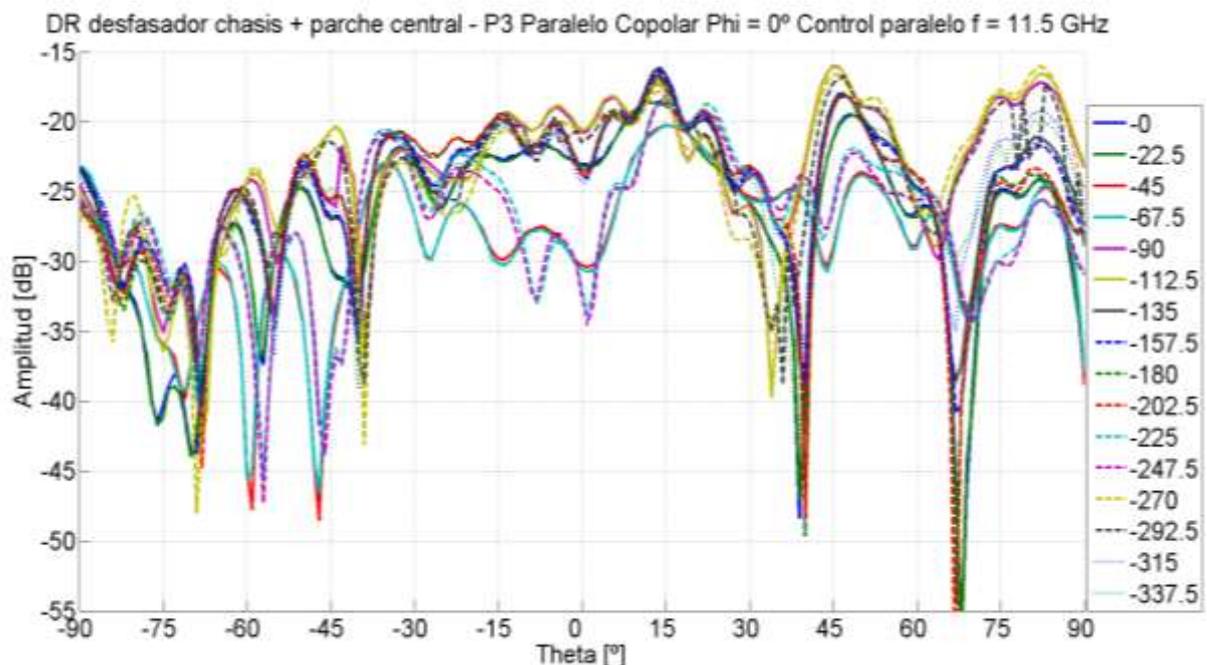


Figura 4.23 Diagramas de radiación. Placa 3 Control paralelo. Todos los estados

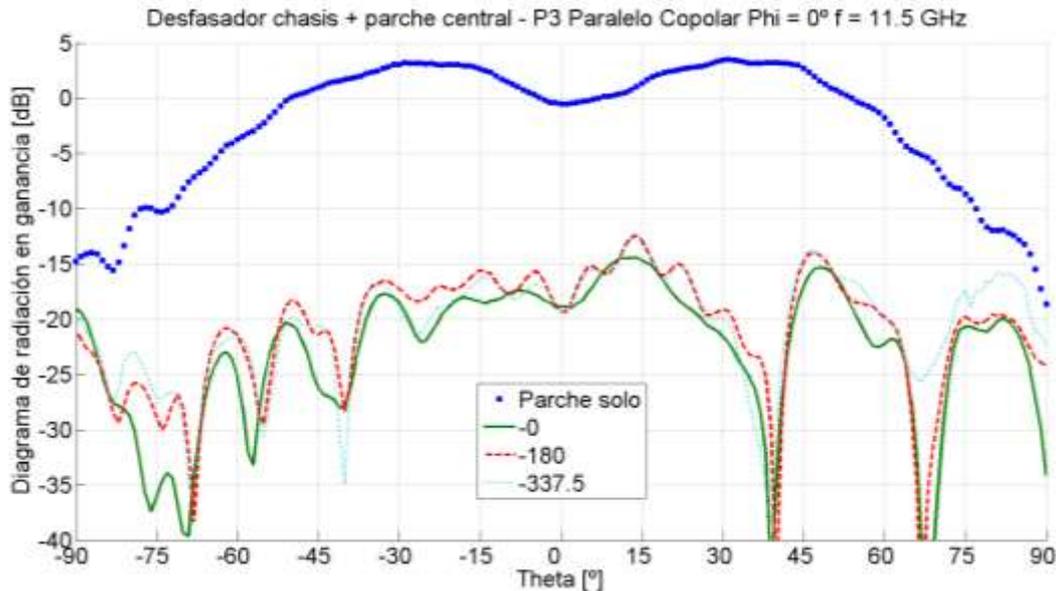


Figura 4.24 Diagramas de radiación. Placa 3 control paralelo. Estados significativos.

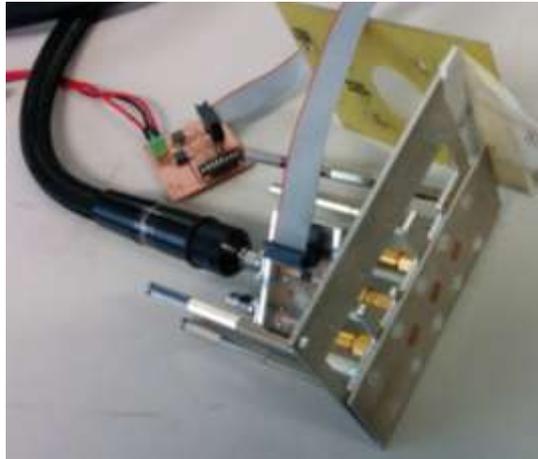
Las imágenes anteriores muestran los distintos diagramas de radiación para cada estado posible del desfasador, centrando el análisis en el plano E de la componente copolar del parche que nos permite comprobar los niveles de señal recibidos.

En la primera imagen se puede observar el comportamiento general de la construcción a 11.5 GHz, que destaca de forma relevante por su mal funcionamiento. El nivel de señal no supera los -15 dB's en el mejor de los casos, encontrándose la dirección de máximo apuntamiento del diagrama de radiación para todos los estados cercanos a los -22 dB's de media, lo que muestra unas pérdidas de inserción excesivas para las características del desfasador.

En la segunda imagen se puede observar mejor el peculiar comportamiento de este montaje. Lo que hace desechable estos resultados además del nivel generalizado de señal, es la aparición de una oscilación tan pronunciada, que en muchos casos se presenta simplemente como una aparición de nulos realmente pronunciados (llegando incluso a los -55 dB's), y debido a esta falta de nivel de señal, el diagrama de radiación característico de un parche (que se mostrara a continuación) se hace irreconocible.

Para intentar explicar este comportamiento, se realizaron una gran cantidad de pruebas con el circuito del desfasador: se repitieron las medidas anteriores por si se había producido algún problema durante la captura de datos pero los resultados no variaron significativamente; se comprobaron las alimentaciones del desfasador por creer que las grandes pérdidas se debía a desconexiones de la alimentación producidas de forma puntual y no controlable y, aunque no se pudo comprobar la alimentación durante todo el tiempo, no se encontraron indicios de que esta fuera la razón del fallo; se intentó simular el movimiento producido por el sistema completo una vez que se medía dentro de la cámara anecoica y se consiguió reproducir puntualmente la producción de algún nulo.

Las pruebas realizadas mediante el analizador de redes (sin utilizar la cámara anecoica) arrojaron algo de luz al problema que se estaba tratando. En estas pruebas se comprobaba la adaptación del circuito (parámetro  $S_{11}$ , el único que se podía medir con el analizador de redes una vez conectado el elemento radiante), y manualmente, se imitaba el movimiento rotatorio escalonado que debía sufrir el sistema dentro de la cámara anecoica.



*Figura 4.25 Ejemplo de montaje para pruebas experimentales realizadas con el analizador de redes sobre el conjunto desfasador sobre chasis – parche central.*

Monitorizando manualmente la alimentación del desfasador y la adaptación que se producía durante el movimiento del conjunto, se creyó detectar la aparición de caídas en el parámetro  $S_{11}$ , aunque esta situación tampoco se conseguía reproducir cuando se requería. Lógicamente, y por el carácter marcadamente experimental de estas pruebas, no se dispone de unos ficheros de datos que corroboren estos procesos ni resultados; la hipótesis que se planteó en su momento, y la cual no ha podido ser confirmada ni desmentida hasta el momento, es que la masa del integrado (proceso de soldadura bastante crítico como se vio en apartados anteriores) no se encontraba fijada con seguridad, y sufría desconexiones no controlables. Debido a estos sucesos, se concluyó que la mejor opción era volver a soldar el componente, prestando aun mayor atención a la conexión del plano de masa.

El funcionamiento antes mostrado se reproducía también utilizando el control serie, aunque con una variabilidad entre estado notablemente menor, lo cual se debía a un fallo, y al último imprevisto que podía soportar esta placa.

En algún momento del transcurso de la gran cantidad de pruebas que se tuvieron que realizar con la placa de evaluación del desfasador, se produjo una rotura en la pista de control correspondiente a la señal de reloj, lo que producía que el desfasador no se pudiera reprogramar una vez conectado el control serie; y por tanto siempre se recogían resultados sobre el primer estado de desfase, que únicamente cambiaban debido a las diferencias de medida por tener un nivel de señal excesivamente bajo. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

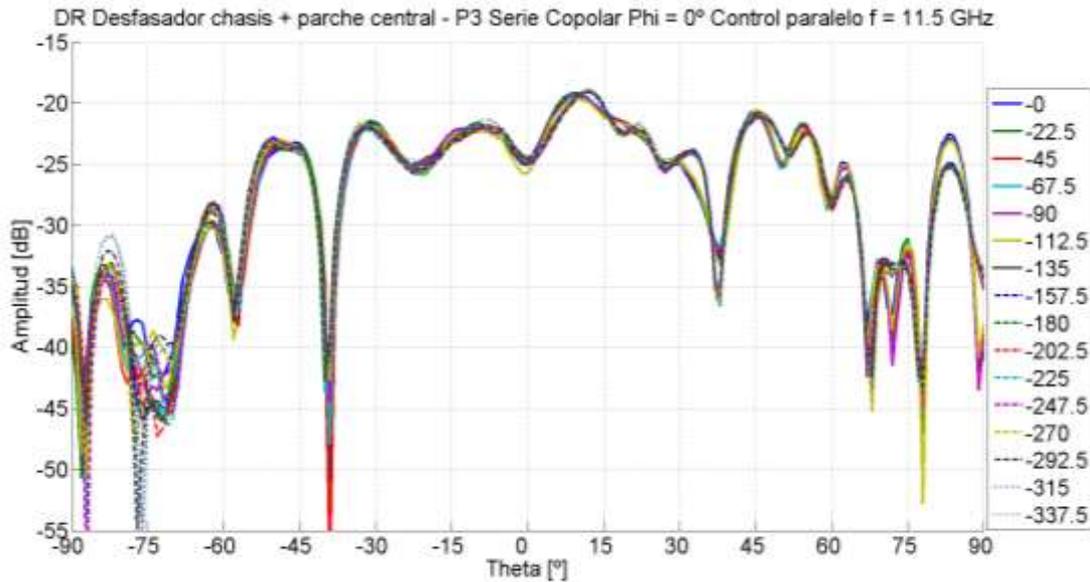


Figura 4.26 Diagramas de radiación. Placa 3 control serie. Todos los estados

Aparte de los efectos comentados anteriormente, se observa de nuevo el bajo nivel de señal así como la reproducción de los nulos y la deformación del diagrama de radiación del parche.

Debido a la tracción sufrida por las conexiones de la placa de evaluación durante las pruebas realizadas en la cámara anecoica, dos pistas de control, de la clema de alimentación colocada en el circuito que contiene al desfasador, se rompieron provocando un cortocircuito entre ellas. Aunque este error parecía poder solventarse fácilmente realizando un puente entre las conexiones con un pequeño cable, se optó por desechar el montaje y construir y montar desde cero (mecanización del sustrato en el taller de circuitos) un circuito de evaluación completo, debido también en gran medida, al hecho de que se creía que el error en los diagramas de radiación se debía a una incorrección al soldar la masa del componente.

#### 4.3.3.2 Diagramas de radiación. Placa 4

Una vez construida la placa número 4, la segunda placa correspondiente al diseño 7, y verificado su buen funcionamiento para todos los bancos de pruebas anteriores, se pasa a realizar las últimas pruebas, esta vez, habiendo realizado un montaje del plano de masa con una especial dedicación y cuidado.

No existe ninguna particularidad de montaje o construcción aplicada a esta placa que no se haya comentado anteriormente, por lo que en esta sección solamente se muestran los resultados de las mediciones en radiación y se comentan los aspectos más relevantes de las mismas. Dado que los resultados de esta construcción si son relevantes y correctos, se mostraran los elementos más característicos, medidos con ambos tipos de control.

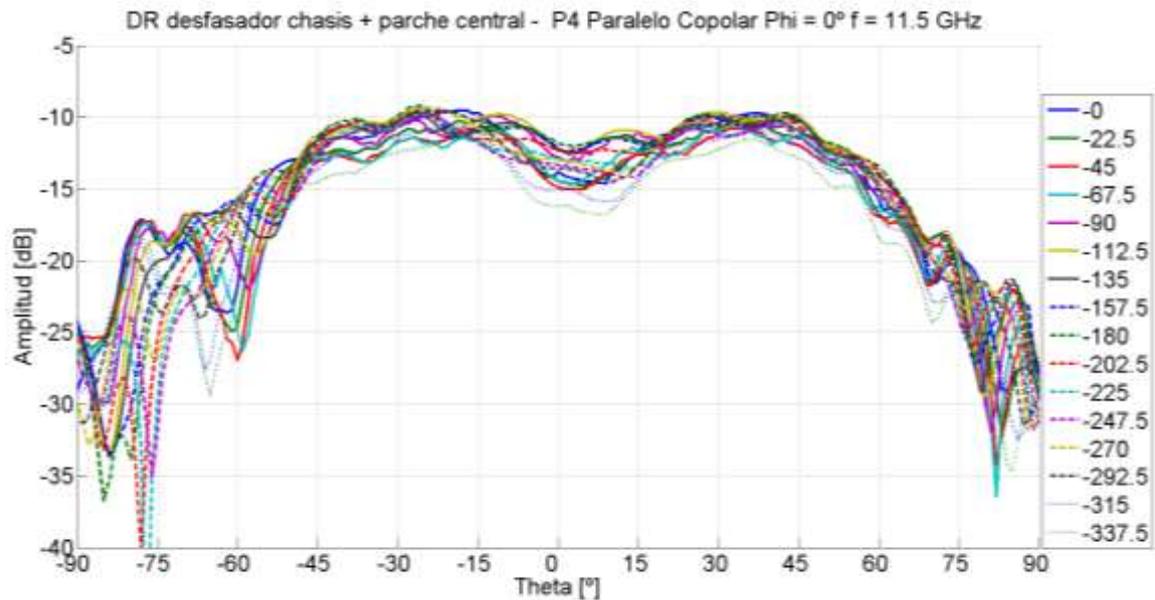


Figura 4.27 Diagramas de radiación. Placa 4 control paralelo. Todos los estados

La figura mostrada anteriormente se refiere al nivel de señal de los resultados obtenidos directamente de las medidas en la cámara anecoica.

Además de un considerable aumento del nivel de señal recibido, se superan los -10 dB's para los mejores casos, y de media, se obtienen resultados entre -10 y -15 dB. En la imagen anterior se puede observar una mayor agrupación de los resultados para todos los estados de desfase posible, no siendo estos resultados tan dependientes de este parámetro como para el caso de la placa número 3. Han desaparecido los nulos, lo cual puede deberse a un mejor montaje del plano de masa del componente; lo que también deriva en la aparición de la forma base del diagrama de radiación del parche, aunque modificada por la presencia del desfasador.

Con el objetivo de mostrar el comportamiento del dispositivo de una forma mucho más completa y visual, se presentan los resultados a las tres frecuencias características para los estados más significativos: estado 0 (0°, desfasador sin programar), estado 8 (-180°, activación del bit de control más significativo del desfasador) y estado 15 (-337.5°, activación de todos los bit de control a la vez).

Para una mayor claridad, y por la necesidad lógica de comparar el efecto del desfasador en el diagrama de radiación normal de un parche, también se representa junto a los resultados anteriores los datos obtenidos para el parche solo medido a las tres frecuencias antes nombradas.

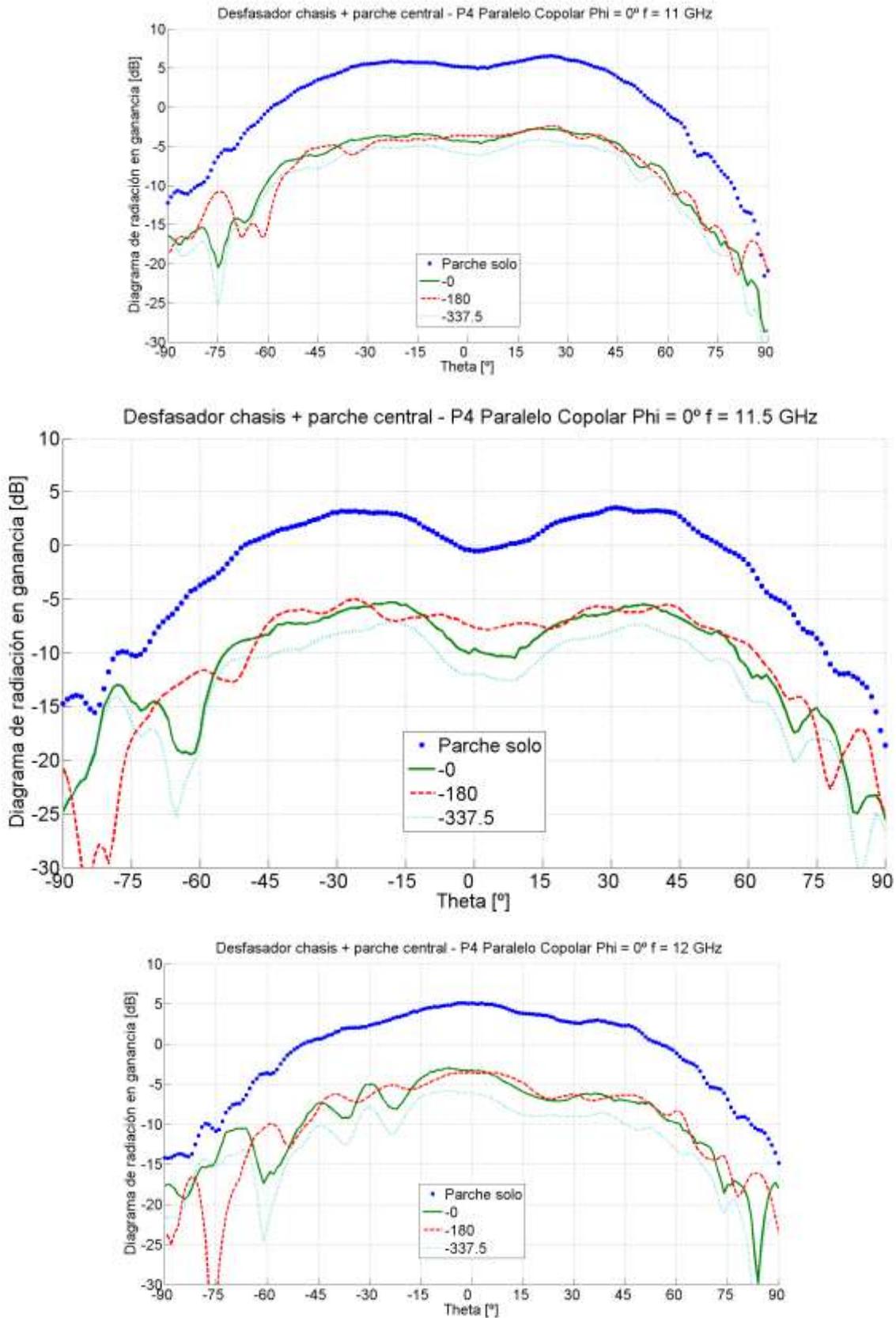


Figura 4.28 Diagramas de radiación. Placa 4 control paralelo. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz

En los tres diagramas de radiación anteriores destaca la marcada diferencia de comportamiento que presenta el sistema en función de la frecuencia. Se observa claramente los efectos de la inserción del desfasador en el diagrama de radiación, la diferencia del nivel de potencia que tendría el parche por sí solo, comparado con la obtenida al incluir el desfasador dentro de la medida detectando una caída de cerca de 10 dB's de media.

Las formas del diagrama de radiación del parche y del conjunto desfasador-parche, podrían haberse alineado para observar con mayor claridad sus semejanzas; aunque, debido al gran parecido de ambas, no parece necesario retocar estos datos. La forma base del diagrama de radiación del parche se mantiene de forma clara, aunque con la pérdida de nivel antes descrita y con la aparición de un rizado en las medidas realizadas.

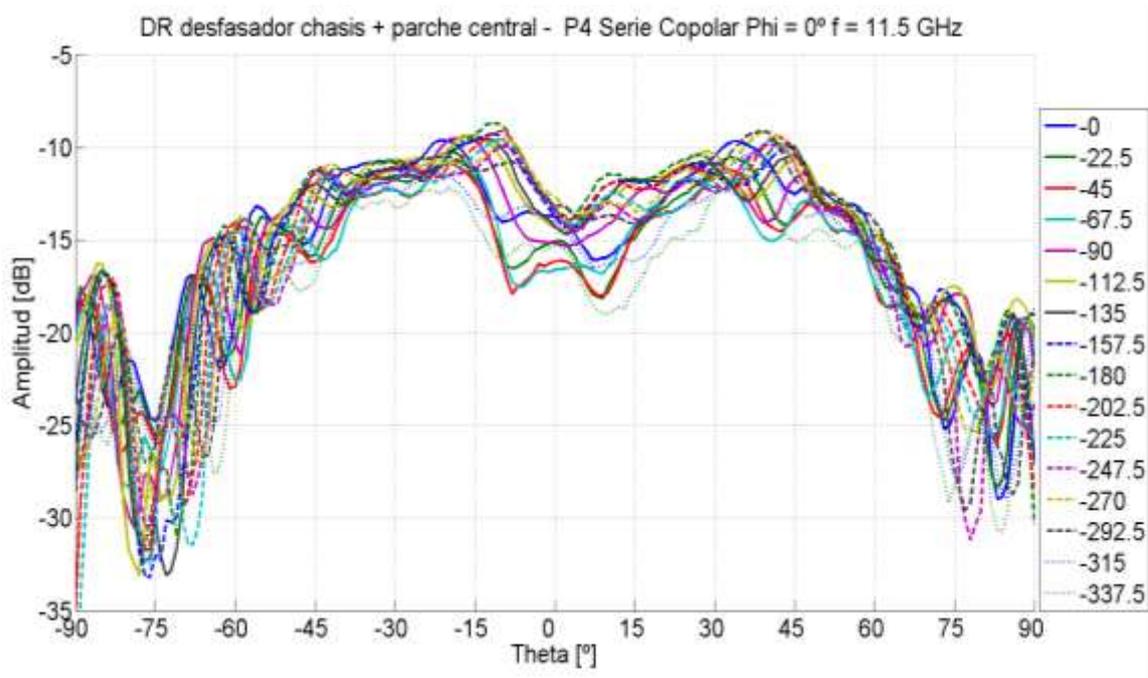


Figura 4.29 Diagramas de radiación. Placa 4 control serie. Todos los estados

En la gráfica anterior correspondiente al control serie, se observan algunas diferencias con respecto a la mostrada para el control paralelo. Estas diferencias son poco significativas, y se presentan como un mayor rizado de las medidas y una oscilación de resultados mayor a medida que no alejamos 40° del centro.

Los niveles de señal se encuentran en valores similares a los explicados para el control paralelo.

En las gráficas siguientes se vuelven a observar estas diferencias, que se cree podrían deberse a la producción de errores o imprecisiones durante la medida, o también a las consecuencias producidas por el rizado detectado durante las medidas mediante el analizador de redes, en la sección anterior.

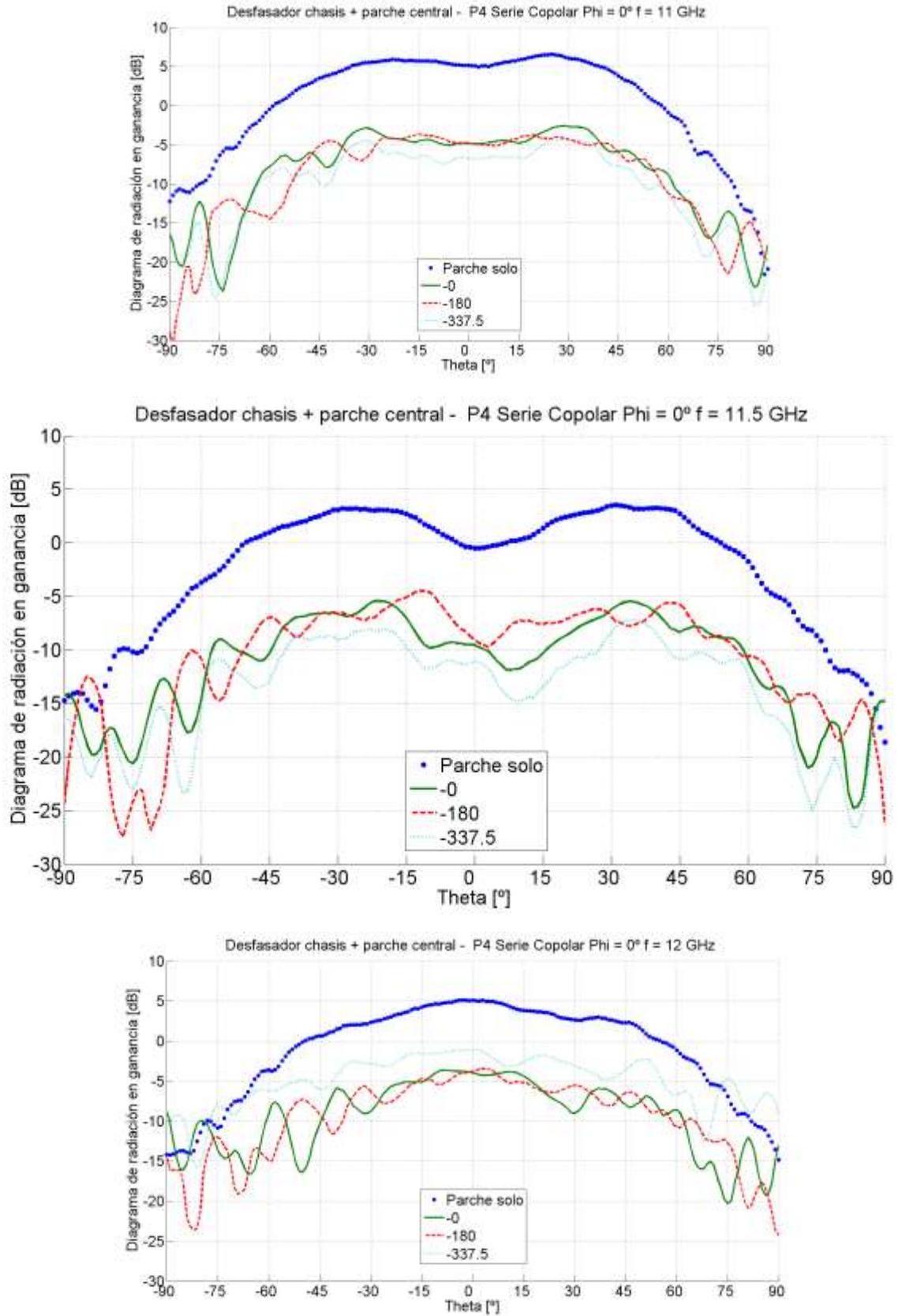


Figura 4.30 Diagramas de radiación. Placa 4 control serie. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz

Aunque esta hipótesis todavía no puede verificarse al haber realizado únicamente una prueba satisfactoria con el conjunto en la cámara anecoica, se cree que debido a alguna imprecisión durante la fabricación, los parches creados por el proyecto previo no disponen de una frecuencia de resonancia a 11.5 GHz, sino que esta frecuencia característica se encuentra a un valor ligeramente menor, lo que explicaría porque los parches (por sí solos, sin incluir el desfasador) presentan mejor funcionamiento a frecuencias menores que la de diseño (11.5 GHz).

Este suceso, unido a la creencia (tampoco contrastada) de que el desfasador empeora su funcionamiento al aumentar la frecuencia de trabajo, explicaría porque se obtienen unos resultados más estables a 11GHz. La banda total de funcionamiento del desfasador va desde los 8 GHz a los 12GHz, por lo tanto, al operar en la banda de trabajo de este PFC, se estaría haciendo trabajar al componente en la parte extrema de su banda de funcionamiento total.

#### *4.3.3.3 Reflexión de la estructura completa. Placa 4*

En el apartado anterior se han comprobado las características de radiación de la placa 4. Para terminar de caracterizar completamente la estructura completa formada por la placa 4 sobre el chasis de soporte y los elementos radiantes, se decide verificar las características de reflexión de dicha estructura.

Teniendo los ficheros de parámetros S medidos de forma separada para el elemento radiante y el desfasador, se decide hacer una estimación de la reflexión del conjunto desfasador en chasis + parche central, combinando los resultados de dichos ficheros mediante en software de simulación ADS. Posteriormente se comprobara la veracidad de estas estimaciones realizando las medidas reales de reflexión al conjunto antes citado, y comparando los resultados con los obtenidos en ADS.

A continuación se muestra los resultados de reflexión medida para los tres parches del array, con el objetivo de que se pueda comparar su comportamiento con el comportamiento de la estructura completa formada por el parche central y el desfasador digital unidos mediante una transición SMA.

La nomenclatura para denominar a los parches se corresponde con la posición que tendrían en el caso de estar observando el array de tres elementos desde detrás. Una nomenclatura habitual para este tipo de estructuras.

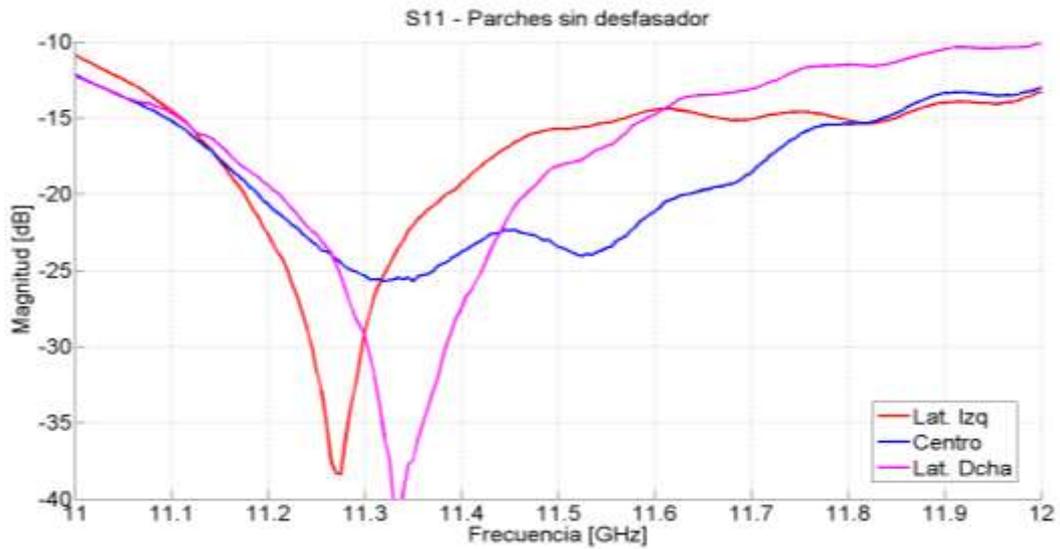


Figura 4.31 Parámetros  $S_{11}$  (reflexión) de los tres parches separados del desfasador

A continuación se muestra el esquema simulado en ADS que replica el montaje “desfasador en chasis + transición SMA + array de 3 parches (parche central)” utilizado para realizar las medidas de radiación en la cámara anecoica. Este montaje también se muestra en la imagen en la ilustración siguiente.

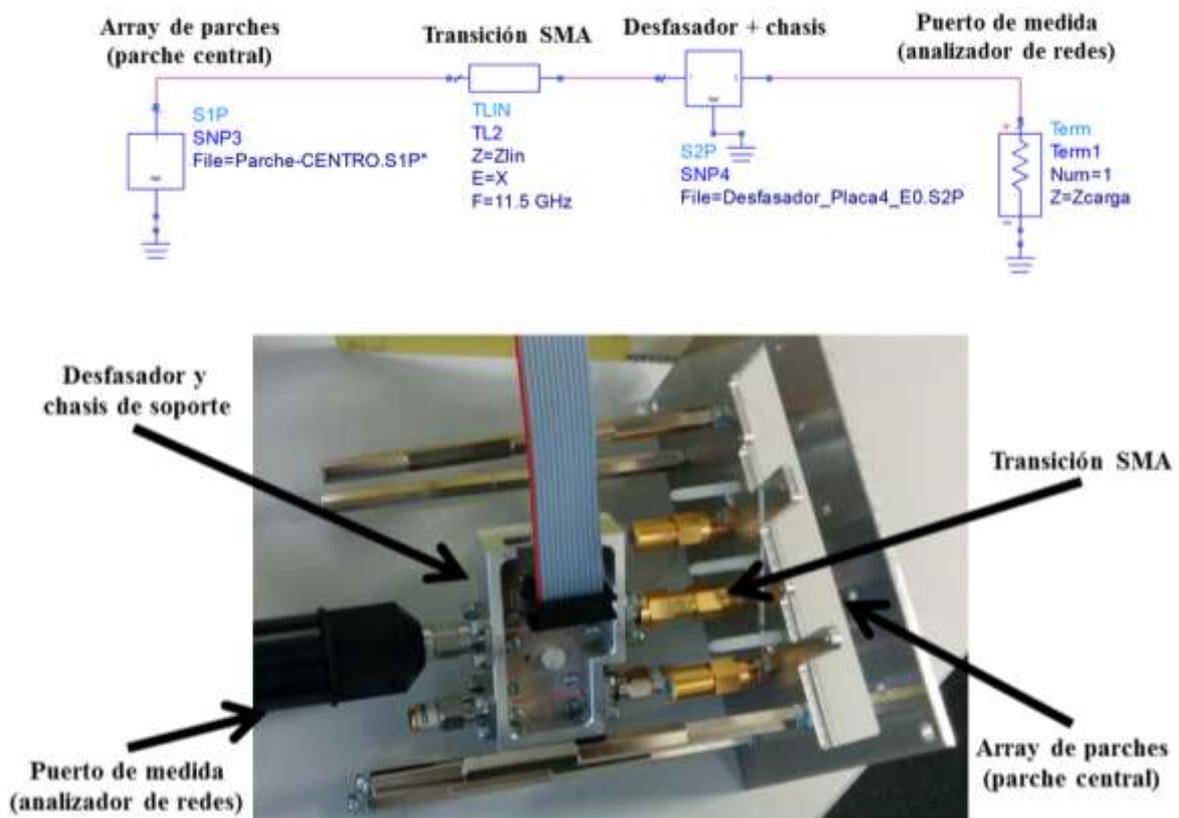


Figura 4.32 Esquema en ADS para estimación de reflexión (Sup.) y montaje típico para medida de reflexión real (Inf.)

A continuación se muestran los resultados tanto de la estimación en ADS como la medida real de la reflexión de la estructura.

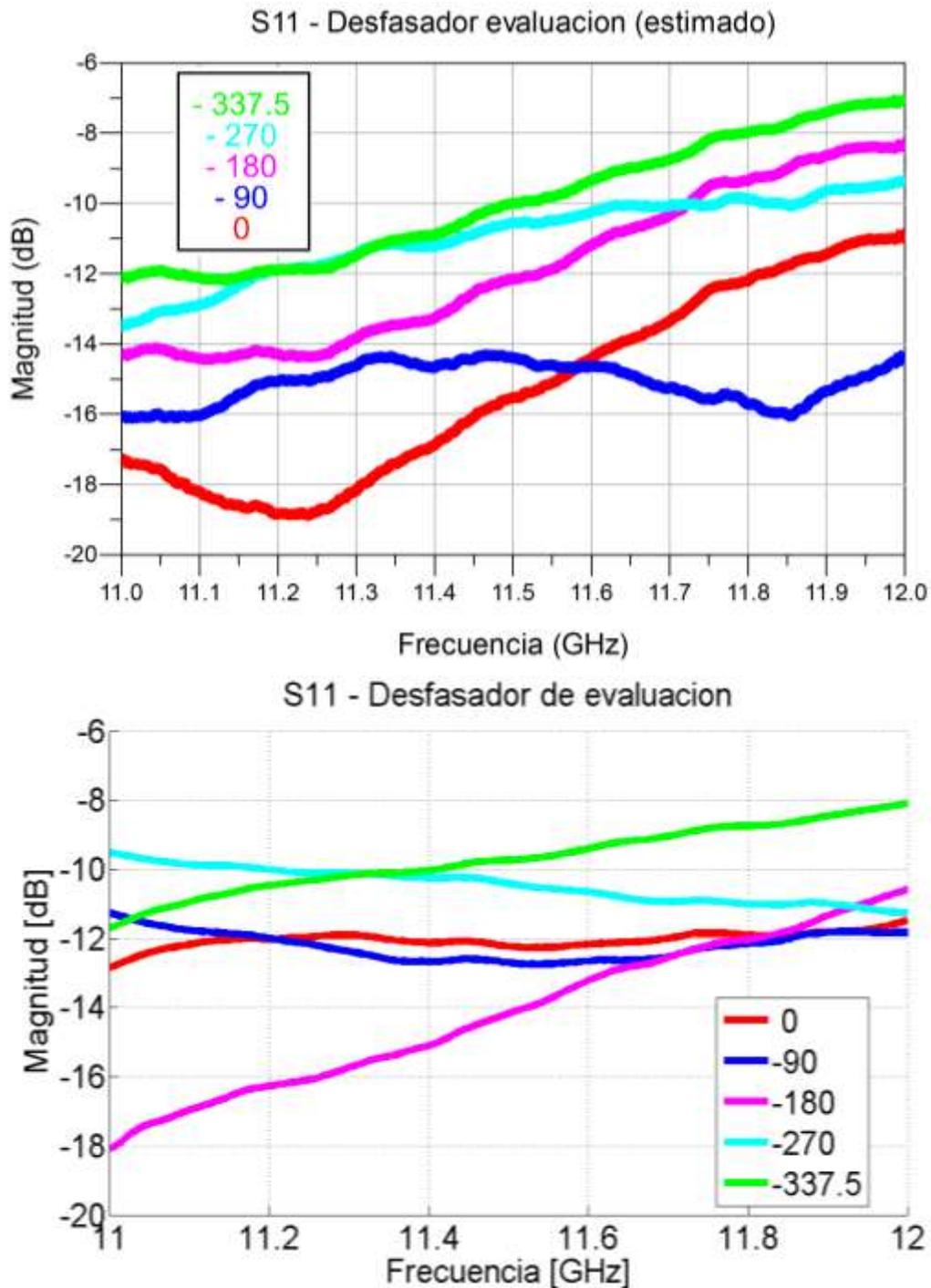


Figura 4.33 Parámetros  $S_{11}$  (reflexión). Estimación de reflexión en ADS (Sup.) y medida de reflexión real (Inf.)

Los resultados anteriores muestran un empeoramiento de la reflexión del conjunto en comparación con la obtenida para el parche individual debido a la inserción del desfasador y las características de reflexión de este.

Como ocurría para los resultados del desfasador, se obtiene una reflexión distinta para cada estado de desfase que se programe en el integrado.

La veracidad de las estimaciones realizadas con ADS queda confirmada mediante la comparativa con los resultados de las medidas reales, dado que se observa un rango de valores muy similar y una forma en la producción de la reflexión que guarda bastante relación con los resultados reales. Mediante una operativa similar se podría estimar el funcionamiento en reflexión de cualquier sistema que se desarrolle, siempre y cuando se tengan todos los ficheros de reflexión de los elementos individuales obtenidos de manera adecuada.

Se debe destacar que las estimaciones parecen ligeramente desplazadas en banda con respecto a las medidas.

#### 4.4 Conclusion

Gracias a los numerosos y variados diseños con los que se empezó a trabajar en un principio, se ha conseguido depurar la mayoría de la electrónica de control posible, necesario para un buen funcionamiento del circuito de evaluación del desfasador, llegando a la decisión final de separar los diseños en dos circuitos distinto esclavo-maestro, y realizando un diseño lo más modulable posible, lo que se espera que derive en un beneficio a la hora de intentar diseñar un array con un mayor número de elementos.

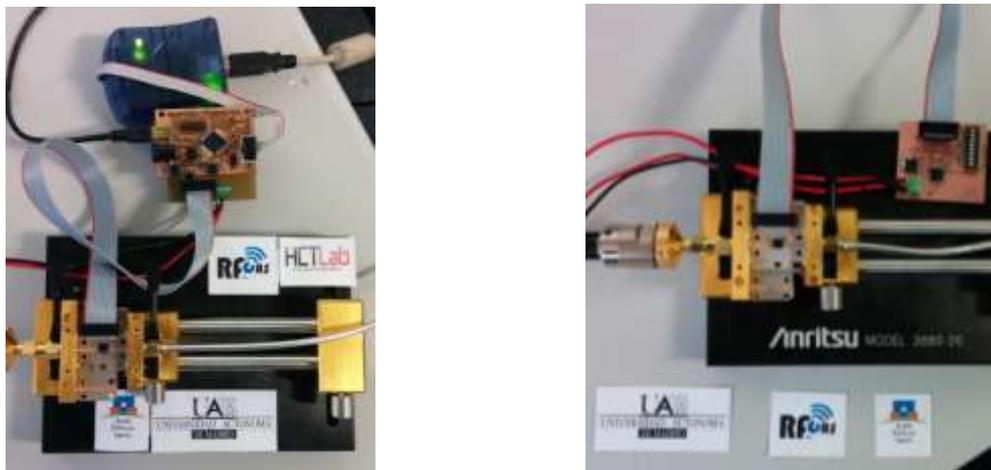


Figura 4.34 Montaje típico de circuito de evaluación. Control Serie (Izq.) y control paralelo (Dcha.)

Mediante una gran cantidad de pruebas experimentales, placas estropeadas y medidas fallidas, se ha podido redactar y verificar un procedimiento seguro de producción y montaje de circuitos, así como el orden de pruebas necesarias para verificar su correcto funcionamiento.

	<i>Comprobación eléctrica</i>	<i>Parámetros de dispersión</i>	<i>Diagramas de radiación</i>
<i>Placa 1</i>	Rotura de componente (cortocircuito entre pistas)		
<i>Placa 2</i>	CORRECTO	Pérdidas de potencia y desfase incorrecto (condensadores)	
<i>Placa 3</i>	CORRECTO	CORRECTO	Nivel de transmisión bajo, deformación del diagrama de radiación (plano de masa mal soldado)
<i>Placa 4</i>	CORRECTO	CORRECTO	CORRECTO

*Tabla 4—IV Resumen de procesos de verificación, y resultados*

Un estudio previo de las necesidades del integrado, y la correcta interpretación de las especificaciones necesarias ha permitido la utilización del controlador AVR de Atmel para programar de manera más sencilla los estados de desfase del componente.

Cabe destacar, que para el uso del control paralelo, es necesario que un operario manipule físicamente el control, lo cual es notablemente más difícil y propenso a errores que una modificación mediante software.

El máximo potencial del control serie todavía no se ha explotado adecuadamente, debido a que para las pruebas en la cámara anecoica, y teniendo en cuenta la limitación de la longitud de los cables, era preciso introducir, dentro del espacio de la cámara, un ordenador portátil con el software de control ejecutándose, accediendo al PC entre cada medida que se quería realizar para modificar el código de control. En un futuro se prevé poder utilizar unos cables más largos, lo que permitiría controlar el desfasador desde fuera de la estancia de medida de la cámara anecoica

Teniendo en cuenta la diferencia de resultados entre ambos controles, consistente en un ligero rizado de los resultados, se considera que el potencial del control serie es muchísimo mayor, y por lo tanto se prevé su utilización para diseños posteriores.

## **5 Diseño de array de tres desfasadores y tres parches independientes**

### **5.1 *Introducción***

En este capítulo se explican todos los procesos de diseño y fabricación llevados a cabo para obtener un circuito array de tres elementos, mediante el cual poder comprobar el funcionamiento de cada uno de ellos.

Todas las modificaciones realizadas y decisiones tomadas durante el capítulo previo se tendrán en consideración en este, intentando adaptarlas a los problemas que puedan surgir al aumentar el número de elementos necesarios.

Se estudiarán con detenimiento los resultados obtenidos, comparándolos entre sí para los elementos estudiados, y verificando su funcionamiento con respecto a los resultados obtenidos en el capítulo previo.

### **5.2 *Descripción de funcionamiento previsto***

Mediante el diseño del array de tres elementos, se pretende estudiar el comportamiento del desfasador en las cercanías de otro integrado homónimo. Por lo tanto, se decide implementar un circuito específico para tres componentes, de tal forma que cada uno permita estudiar un funcionamiento distinto: los dos desfasadores laterales mostrarán los efectos de comportamiento debido a la presentación de otro único elemento en sus cercanías, mientras que el desfasador central ilustrará los efectos de posicionar dos compañeros a ambos lados.

Mediante estos resultados, se puede obtener una idea de cómo funcionaría un array de mayor tamaño, al tener datos de comportamiento para los elementos “centrales” (aquellos con desfasadores a ambos lados), y “laterales” (con un único desfasador en sus cercanías).

Previamente, el control serie ha mostrado su potencial en cuanto a la comodidad de programación de los integrados, y aunque el montaje del sistema completo es considerablemente más complejo al necesitar un mayor número de placas y conexiones, se considera la mejor opción para operar el array de tres elementos.

Uno de los objetivos de esta construcción es poder medir el comportamiento de cada desfasador de la forma más completa posible; debido a esto, se decide implementar un sistema con dos partes bien diferenciadas, como ya se hizo durante la realización del proyecto precedente: una primera parte compuesta por una red de alimentación, donde se encuentran integrados los desfasadores; y otra parte donde se encuentran únicamente los elementos radiantes.

Esta separación permite medir el comportamiento de la red de alimentación mediante el analizador de redes, y una vez conectado los elementos radiantes, pasar a comprobar sus características de radiación dentro de la cámara anecoica.

### 5.3 Diseño y fabricación

La fabricación se ha realizado íntegramente en el taller de circuitos impresos de la EPS con el material necesario para ello. A continuación se describe tanto las herramientas, componentes y materiales necesarios a tal efecto, como los procedimientos seguidos para la construcción.

#### 5.3.1 Diseño de los circuitos impresos

Como punto de partida sobre el que basar los diseños que se presentan a continuación, se tomaron los realizados por el proyecto previo para el array de 3 elementos, pero eliminando toda la electrónica de control en corriente continua.

De los diseños completos del proyecto predecesor, se pudieron aprovechar lo referente a la sección de radiofrecuencia: los diseños de las líneas de conexión en microstrip y el diseño de los parches, los cuales ya habían sido simulados y optimizados durante la realización del proyecto anterior, y se consideraba innecesario volver a realizar estas simulaciones.

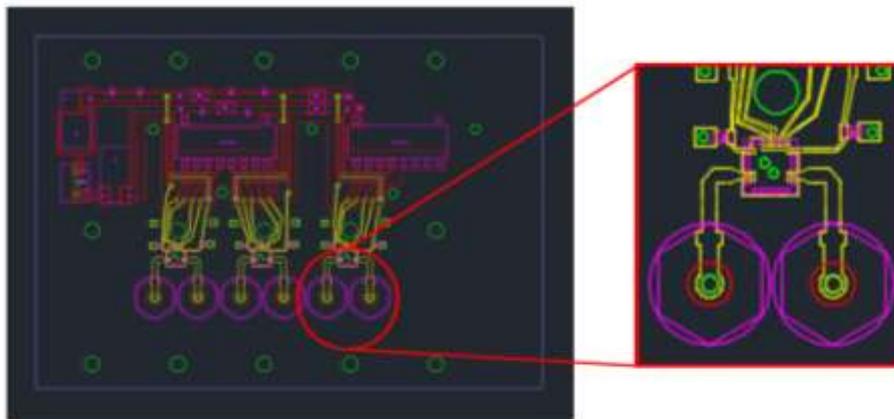
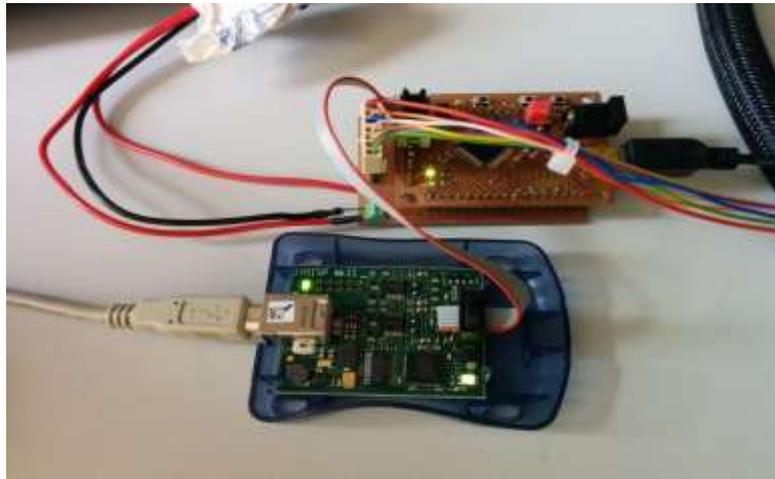


Figura 5.1 Array de tres elementos, proyecto previo. Vista general (Izq.) y elementos clave de radiofrecuencia (Dcha.)

En el diseño creado para la red de alimentación que integra los desfasadores solo se tuvo en cuenta la utilización del control mediante el puerto serie, debido a las ventajas mencionadas en apartados anteriores a esta memoria, y a la no necesidad de construir un nuevo circuito de control paralelo.

Debido a la utilización de una distribución de los puertos de salida distinta para el control serie dentro del sistema AVR, fue necesario realizar un nuevo circuito intermedio, que

permitiera conectar el controlador AVR (con la nueva distribución de pines), a dicho circuito, y posteriormente a la placa de la red de alimentación con los desfases.



*Figura 5.2 AVR y circuito de control serie montado sobre placa puente*

Como se explicaba en el capítulo anterior, todos los diseños y modificaciones realizadas sobre las placas que contienen a los elementos de radiofrecuencia se llevaron a cabo mediante el software de diseño AutoCAD, utilizando Altium únicamente para la creación de la placa puente del control serie.

AutoCAD también fue la herramienta utilizada para dar forma al diseño del chasis de aluminio que iba a soportar la estructura; aunque solo fuera una versión inicial, dado que posteriormente se precisaría este diseño mediante las herramientas de modelado 3D de CST, y la posterior creación de planos esquemáticos mediante Solid Edge.

#### *5.3.1.1 Circuito array de tres desfases*

El primer diseño en el que se pensó para dar forma a la red de alimentación de los desfases se ha seguido utilizando hasta la actualidad, únicamente realizando algunas pequeñas modificaciones, que ni siquiera se reflejaron con versiones distintas.

Se pretendía seguir al máximo posible el camino iniciado durante la creación de la placa de evaluación, pero rápidamente surgió el problema del espaciado entre elementos. Se disponía de una distancia entre desfases de 18.5 mm, lo que hacía necesario adaptar el circuito de evaluación a estas distancias.

Gran parte de este problema ya fue solventado por el proyecto precedente, realizando la adaptación de dos líneas de transmisión para los puertos de entrada y salida de RF mediante un giro de 90°, como puede observarse en la primera imagen de la subsección, y en las imágenes posteriores.

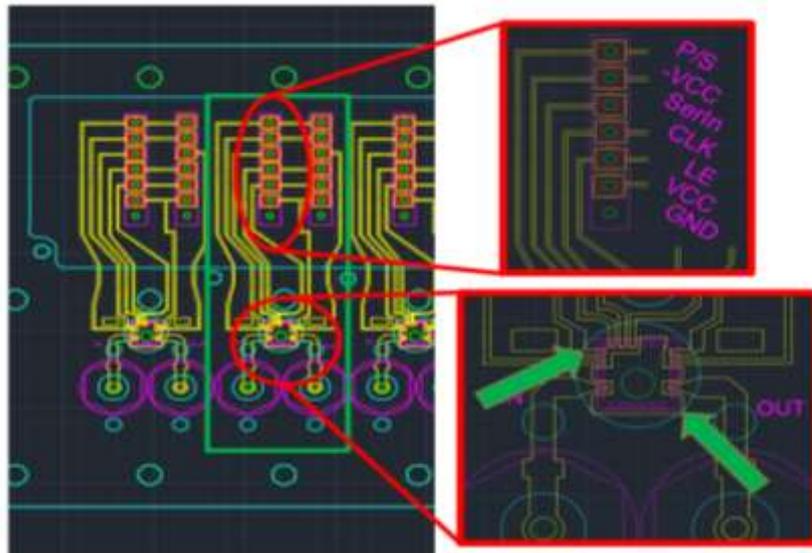


Figura 5.3 Circuito de array de 3 desfases. Zonas críticas.

En la anterior Figura pueden observarse los cambios más significativos implementados, con respecto al diseño creado por el proyecto precedente. A continuación, se procede a detallar más concretamente estas modificaciones:

- **Modularidad sobre elemento unitario:** la delimitación mostrada por el recuadro verde de la primera imagen, detalla el grado de modularidad con el que se ha realizado el diseño.

En el proyecto predecesor, los desfases estaban unidos por una única red de alimentación rutada directamente sobre el sustrato, no existiendo una separación eléctrica entre los desfases (compartían un switch de control para cada dos integrados), como se muestra en la *Figura 3.7 Circuito impreso de 3 desfases*.

Mediante un diseño con clemas de datos, parecidas a las utilizadas durante los circuitos de evaluación, se consigue aislar cada uno de los desfases, disponiendo una red de alimentación y de control individual para cada uno.

- **Diseño específico para control serie:** como se observa en el zoom inferior de la ilustración anterior, se ha modificado la isleta del plano de masa del integrado para incluir todos aquellos pines del control paralelo, que no se utilizan para este diseño, y se deben conectar a masa para producir un buen funcionamiento del dispositivo.

La flecha verde situada en la parte derecha de la imagen ampliada, llama la atención sobre la pista de control 'P/S' encargada de determinar qué tipo de control se está utilizando. Aunque ya se ha comentado que el único tipo de control elegido es el serie, y esta pista debería estar siempre conectada a 'Vcc', no se ha podido realizar de forma permanente en el circuito, debido a que la pista de alimentación

'Vcc' se encuentra en el lado opuesto del circuito y se tendría que atravesar todo el plano de masa, o realizar un rutado bastante más complejo.

- **Clema de datos 1x7:** siguiendo la estela de los diseños de evaluación, se utiliza una clema de datos para enviar toda la información necesaria de las señales de control al desfasador. En este elemento se encuentra la mayor parte de las modificaciones sufridas por el circuito, en comparación con los diseños del circuito de evaluación.

Como puede observarse por la imagen de zoom superior, este conector solamente utiliza siete pines de conexión, haciendo referencia a los necesarios únicamente para el control serie; además, y debido a una limitación del espacio entre los integrados, es necesario colocar este componente con un giro de 90° sobre sí mismo, para no invadir el espacio reservado para sus compañeros. En esta clema se rutan las señales de control detalladas en la leyenda de la Figura anterior.

Llama la atención la necesidad de dos clemas de datos diferentes para cada desfasador, que se utiliza como método para poder recolocar el orden de las señales de control. La repetición de algunas señales que podrían ser comunes (como la masa), se debe a la modularidad explicada anteriormente.

El control serie implementado para este circuito envía una trama con los bits de estado de todos los desfasadores; por lo tanto, el primer desfasador recibe la trama completa, y únicamente recoge los bits para su propia programación, enviando de nuevo la trama por su terminal de salida 'ser OUT'. Esta señal de control 'serOUT' se ruta a la posición 'serIN' de la segunda clema, y al transmitirse al siguiente desfasador, queda definida como su señal de entrada. Este proceso queda esquematizado mediante la figura siguiente:

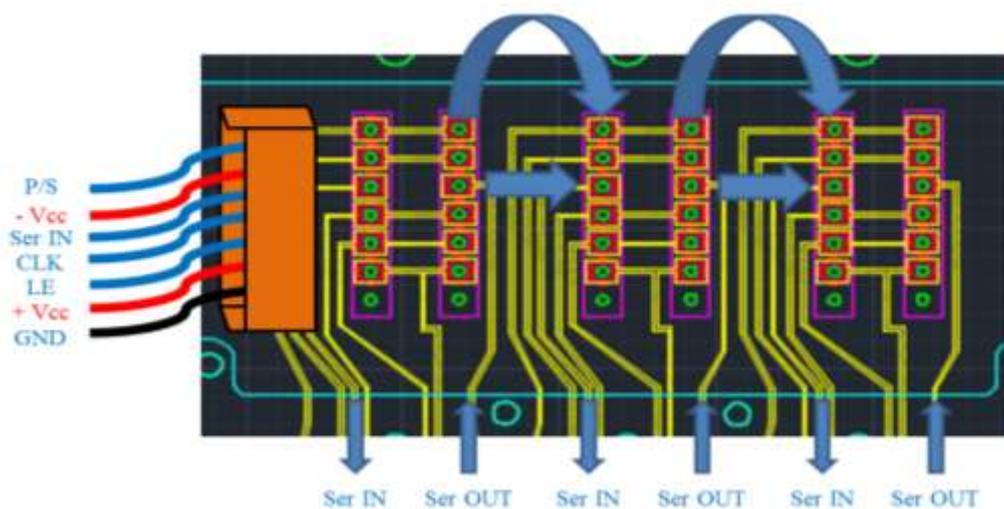


Figura 5.4 Circuito de array de 3 desfasadores. Esquema de conexión

El diseño de la distribución de las clemas presentado responde a una doble función: por un lado, permitir reordenar las señales de control de un desfasador a otro, y generar un funcionamiento en cadena; y por otro, si se cambiara la conexión del conector maestro, y en vez de anclarlo al primer desfasador se conectara con el segundo, todas las señales de control estarían presentes y el sistema podría seguir funcionando perfectamente con un integrado menos. Como se detallará más adelante, la segunda funcionalidad ha sido implementada de cara a facilitar la realización de las comprobaciones y medidas de los desfasadores, y su misión no es permitir reducir el número de elementos del array.

### 5.3.1.2 Circuito de control serie. Placa Puente.

Debido a todos los cambios realizados en la distribución de los distintos pines de control y alimentación del circuito de tres desfasadores, así como una nueva distribución de los puertos de salida programados en el AVR, es necesario diseñar una nueva placa intermedia que permita la correcta conexión del control serie con el circuito que contiene los desfasadores.

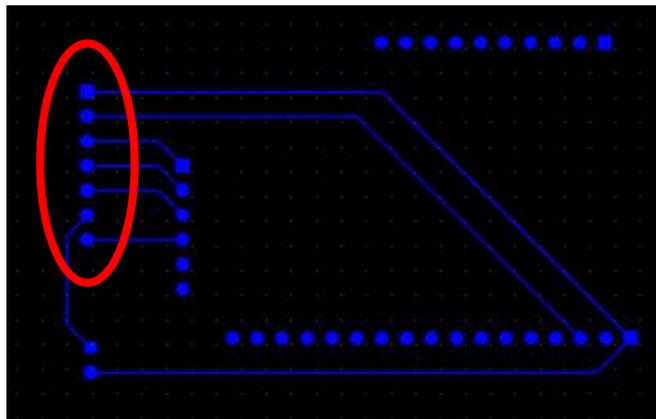


Figura 5.5 Control serie, placa puente modificada

En la imagen anterior se pueden observar claramente las modificaciones realizadas, que consisten en el cambio de clema de conexión a la utilizada para este diseño, y el rutado de las señales de control necesarias a los nuevos puertos seleccionados en el AVR.

### 5.3.2 Componentes utilizados

Aunque el circuito que contiene los tres desfasadores es notablemente más complejo que el realizado para la evaluación del integrado, requiere de una menor cantidad de componentes electrónicos, sobre todo al no necesitar de la construcción de una placa de control paralelo. A continuación se detallan los elementos más relevantes, necesarios para esta construcción.

### 5.3.2.1 Conectores y Universal Text Fixture

Debido al diseño realizado para el circuito que contiene a los tres desfasadores, se hace imposible acceder a las líneas microstrip de entrada y salida de radiofrecuencia del integrado mediante las sondas de las que dispone la herramienta “*Universal Text Fixture*”, dado que dichas líneas de transmisión no se encuentran en los extremos del circuito, sino en su parte central.

Debido a lo anteriormente comentado, para el caso de este diseño, se hace muchísimo más necesario que para el circuito de evaluación la inclusión de conectores SMA coaxiales verticales, que se incluirán antes de realizar las pruebas con el analizador de redes (a diferencia del circuito de evaluación, en el cual se incluían los conectores en el momento de realizar las pruebas en la cámara anecoica).

Debido al proceso de desmantelamiento de las construcciones del diseño precedente, se dispone de seis conectores coaxial SMA de alma cilíndrica y conexión vertical en buenas condiciones, y que serán utilizados para este nuevo montaje.

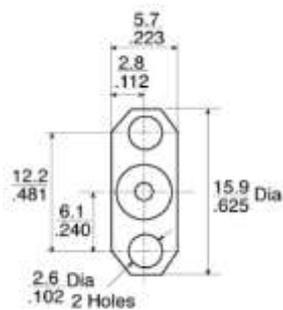


Figura 5.6 Conector vertical de alma cilíndrica.

Como se observa en la imagen anterior, la longitud del alma de este conector es excesiva para el circuito del que se dispone. Por suerte los conectores heredados han sido seccionados para adaptarlos al espesor conjunto de la placa de aluminio y del sustrato.

### 5.3.2.2 Chasis de soporte en aluminio

El material del que se compone la carcasa del conector explicado anteriormente hace imposible soldarlo al plano de masa del circuito que contiene los tres desfasadores; por lo tanto, se hace más necesario que para el circuito de evaluación la utilización de un chasis de soporte de aluminio, sobre el cual poder atornillar dichos conectores.

En un principio se pensaba en mandar a mecanizar una nueva construcción en aluminio para soportar y dar rigidez al sistema, incluso se realizaron los planos de esta estructura. Tras algunas medidas y el cambio de clema de alimentación utilizada, se presentó la

posibilidad de realizar un re-mecanizado del soporte en aluminio utilizado por el proyecto precedente, similar a la realizada durante las pruebas con el circuito de evaluación. Los cambios necesarios quedan contemplados en el siguiente diseño en AutoCAD

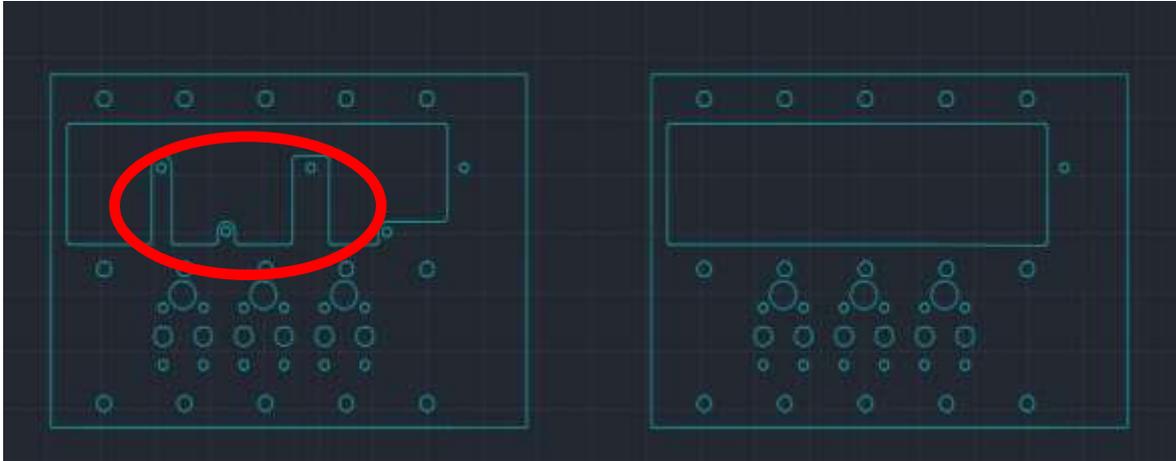


Figura 5.7 Diseño de soporte metálico para circuito de tres desfasadores. Diseño previo (Izq.) y resultado tras re-mecanizado (Dcha.)

El vaciado indicado por el círculo rojo en la imagen superior, realizado en el taller de mecanizado de la EPS, permite disponer de espacio suficiente para posicionar los componentes del nuevo diseño, pero sin afectar a la antigua funcionalidad de la estructura. Debido a que este mecanizado se realizó de forma interna en la universidad, el coste se minimizó al máximo.

### 5.3.2.3 Circuitería de corriente continua

Al no disponer en estos diseños, de un circuito de control paralelo, los componentes electrónicos se limitan únicamente a los necesarios para el acondicionamiento del desfasador; por lo tanto, la lista es bastante más reducida.

Componente	Descripción	Código compra	Precio unidad (€)
Cond. Cerámico	100nF 10v VJ0603-Y-104-K-N-Q-A-O	RS 751-2014	0.386 €
Desfasador	Map 4 bits 8-12GHz	Mauser 937-MAPS-010146-T5	26.61 €
Clema de pines	1x36 thru hole	RS 547-3166	0.65 €
Conectores	Con. Recto 2 taladros alma cilíndrica	RS 414-1357	7.29 €

Tabla 5—I Componentes para circuito de tres desfasadores.

Debido al material reutilizado y el disponible en almacén, no fue necesaria la compra de ningún elemento adicional.

### 5.3.3 Montaje: fabricación, soldadura, y conexionado

Una vez terminado el diseño del circuito final y escogidos los componentes adecuados, se obtienen los archivos gerbers (.gbr) necesarios para la fabricación del circuito impreso en la fresadora del taller de circuitos de la escuela.

El proceso de construcción y soldadura es casi idéntico que el realizado para el circuito de evaluación, y explicado en la sección 4.2.3 con la única peculiaridad de la soldadura en cadena de tres desfasadores en lugar de un único integrado. En realidad, esta diferencia es crítica, ya que la posibilidad de fallo al realizar la soldadura de los elementos importantes se multiplica, y esto deriva en una considerable mayor dificultad de conseguir un diseño operativo.

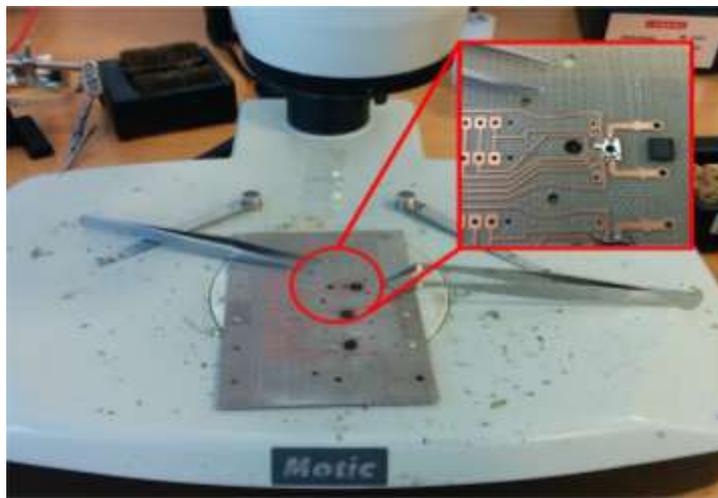


Figura 5.8 Soldadura de circuito de tres desfasadores mediante microscopio

Para el conexionado de los distintos elementos del circuito se siguen los procesos explicados y depurados en la sección anterior (soldadura del componente, colocación de vías, soldadura del plano de masa, etc.). Aunque existe un elemento en este nuevo diseño que requiere de una atención adicional, pues como se comentó en esta misma sección, dispone de dos funcionalidades distintas.

#### 5.3.3.1 Conexionado de las clemas de pines 1x7

Anteriormente se han explicado las dos funciones principales de este elemento (reorganización de las líneas de control, y facilitar las medidas individuales de cada desfasador). Teniendo esto en cuenta, se pueden realizar dos conexionados distintos para este elemento:

- **Configuración variable:** mediante la construcción de agrupaciones de siete cables, como los mostrados en la imagen a continuación, se puede realizar la conexión

entre la segunda clema de cualquier desfasador (que contiene la señal de control ‘SerOUT’ recolocada), y la primera clema del siguiente integrado (que requiere de la entrada de la señal de control ‘SerIN’), pero además permitiendo la desconexión y posterior reconfiguración para pruebas.



Figura 5.9 Agrupación de cables para conexionado entre desfasadores.

- **Configuración fija:** utilizando finos cables soldados sobre los terminales de la clema, se puede realizar la conexión de los mismos de manera permanente, no permitiendo su modificación accidental. Este tipo de configuración es perfecta, una vez que se ha probado el correcto funcionamiento de los elementos del array. Este tipo de conexionado se muestra en la imagen a continuación:

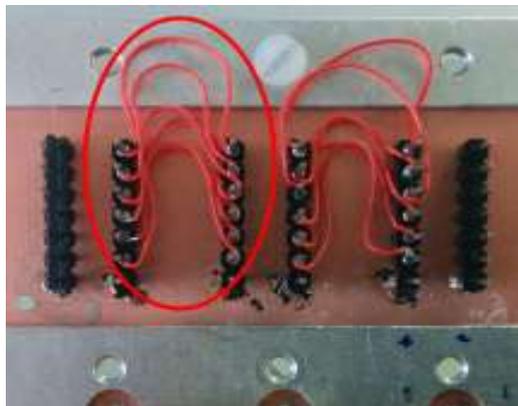


Figura 5.10 Conexionado permanente entre desfasadores.

## 5.4 Comprobaciones y medidas

Con objeto de verificar el funcionamiento de los circuitos diseñados, se siguen los procesos explicados en la sección correspondiente de pruebas para el circuito de evaluación; aunque esta vez, aplicado a un total de tres desfasadores, los cuales deben ser verificados de forma tanto independiente como conjunta. El funcionamiento incorrecto de cualquiera de los tres desfasadores puede suponer la necesidad de construir un circuito nuevo.

Las pruebas realizadas comprueban el estado eléctrico del circuito, para verificar todo lo posible el proceso de montaje; sus características de desfase mediante el analizador de redes, y sus características en radiación, mediante los diagramas de radiación obtenidos en la cámara anecoica.

Es muy importante destacar que los procesos de construcción ideados en la sección anterior del circuito de evaluación, han permitido reducir considerablemente la posibilidad de error al soldar los dispositivos; y que por lo tanto, la única (y primera) implementación física del circuito de tres desfasadores se realizó de forma totalmente correcta y pasó todos los procesos de verificación y medida posteriores.

#### *5.4.1 Comprobaciones eléctricas*

Estas pruebas comprobaban la correcta unión de las conexiones de los distintos circuitos mediante un multímetro. Con el objetivo de minimizar el proceso total de verificación, estas pruebas se realizaron simultáneamente a los procesos de soldadura y conexionado para la placa del array de tres desfasadores.

##### *5.4.1.1 Circuito array de tres desfasadores*

Simultáneamente a los procesos de soldadura, se comprobaron la correcta conexión de las pistas de control que unen las clemas de pines con los puertos correspondientes del integrado, verificando que las conexiones son estables, y que no existen cortocircuitos entre varios terminales.

Al igual que para el circuito de evaluación, se presentan numerosos problemas para verificar la correcta unión del plano de masa del circuito, con las isletas de masa de los componentes, así como la unión existente para la entrada y salida de radiofrecuencia.

##### *5.4.1.2 Circuito de control serie. Placa puente*

Primero se realiza una verificación ocular para comprobar que el rutado de las pistas es correcto, y posteriormente, se conecta el circuito de control serie a la placa puente; y se verifica, mediante un multímetro, que las señales y valores en cada uno de los pines de la clema de conexión son correctos.

El siguiente imprevisto surgió durante la realización de las pruebas con el analizador de redes, pero una vez que se habían conectado alimentación y control de los tres desfasadores mediante la “configuración fija” explicada en la sección 5.3.3.1 el correcto funcionamiento de los desfasadores ya estaba probado, se decide incluirlo en esta subsección al tener más relación con el sistema de control.

El problema provocaba que la palabra de datos (que contiene la información de control para los tres desfasadores) introducida al primer desfasador, solo provocara un cambio del desfase en ese componente, y no en los demás. Es decir, que la señal de datos no se estaba propagando de forma correcta de un desfasador a otro. La razón para este funcionamiento incorrecto podría deberse a un mal funcionamiento del desfasador, a un montaje incorrecto, o a un error de sincronía del protocolo serie.



Figura 5.11 Propagación de la “palabra” de control en un único desfasador

Después de comprobar la propagación de las señales de control mediante el osciloscopio de HCTlab, se realizaron ligeras modificaciones que permitieron conectar debidamente los tres desfasadores.



Figura 5.12 Propagación de la “palabra” de control para tres desfasadores.

#### 5.4.2 Medidas mediante analizador de redes

El objetivo de construir dos elementos separados, que contuvieran la red de alimentación por un lado, y los elementos radiantes por el otro, era poder verificar el

funcionamiento de la red de alimentación mediante el analizador de redes, lo cual es imposible si el elemento radiante ya se encuentra integrado.

Una vez construida la placa de la red de alimentación que contiene los tres desfasadores, y cuando su funcionamiento eléctrico ha sido correctamente verificado, se procede a realizar las primeras pruebas en radiofrecuencia, para observar cómo se produce el cambio en la componente en fase de la señal RF, y cómo se comporta el sistema a través de sus parámetros de dispersión.



*Figura 5.13 Montaje típico para pruebas, mediante analizador de redes, del circuito array de tres desfasadores. Medida sobre tercer desfasador*

Como ya se explicó anteriormente, es imposible utilizar la herramienta “*Universal Text Fixture*” para estas pruebas, debido a la situación de las pistas de entrada y salida de la señal de RF. Por lo tanto, se utilizan los conectores anclados a la placa de soporte de aluminio, y se calibra el equipo de análisis, sin necesidad de utilizar el kit TRL de calibración diseñado previamente. El montaje necesario para estas pruebas puede verse en la imagen anterior, además de la funcionalidad extra de las clemas de alimentación, que permiten verificar de forma individual cada desfasador (en el caso de la imagen anterior, el elemento número 3).

#### *5.4.2.1 Circuito array de tres desfasadores. Primer desfasador*

Antes de comenzar a presentar los resultados obtenidos, es preciso indicar la numeración elegida para cada desfasador.

Por coherencia con el flujo de las señales de control a través de los integrados, se elige como primer desfasador, el situado inmediatamente a continuación de la agrupación de cables de datos que llevan las señales de control, es decir, el primer desfasador es aquel que recibe las señales de control directamente desde la placa de control serie. Por

consiguiente, el tercer desfasador es aquel que recibe sus señales de control desde el desfasador central. Esto queda ilustrado mediante la imagen siguiente:

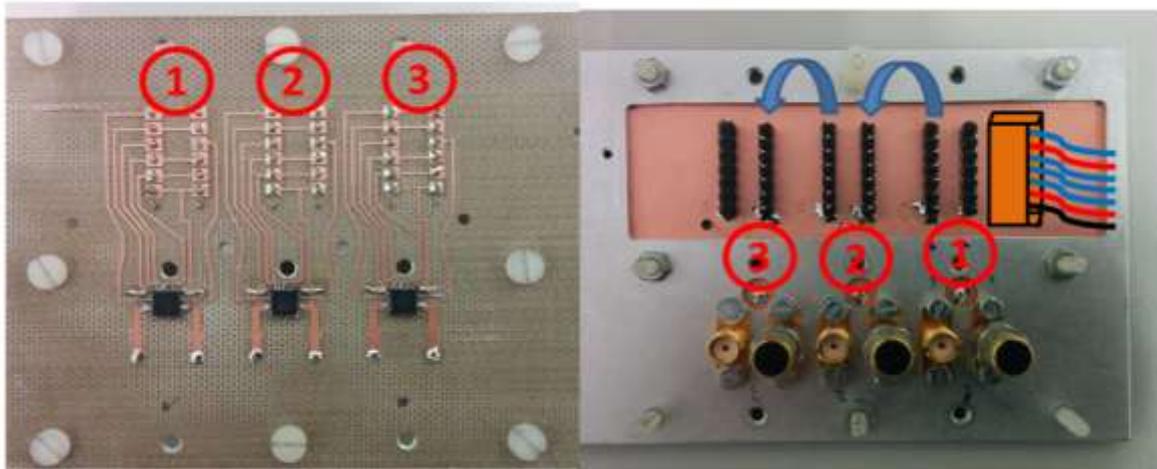


Figura 5.14 Circuito de array de tres desfasadores. Vista frontal y trasera.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el primer desfasador, o desfasador número 1, referente a sus parámetros de dispersión, tomados mediante el analizador de redes conectado a sus terminales de entrada y salida de radiofrecuencia.

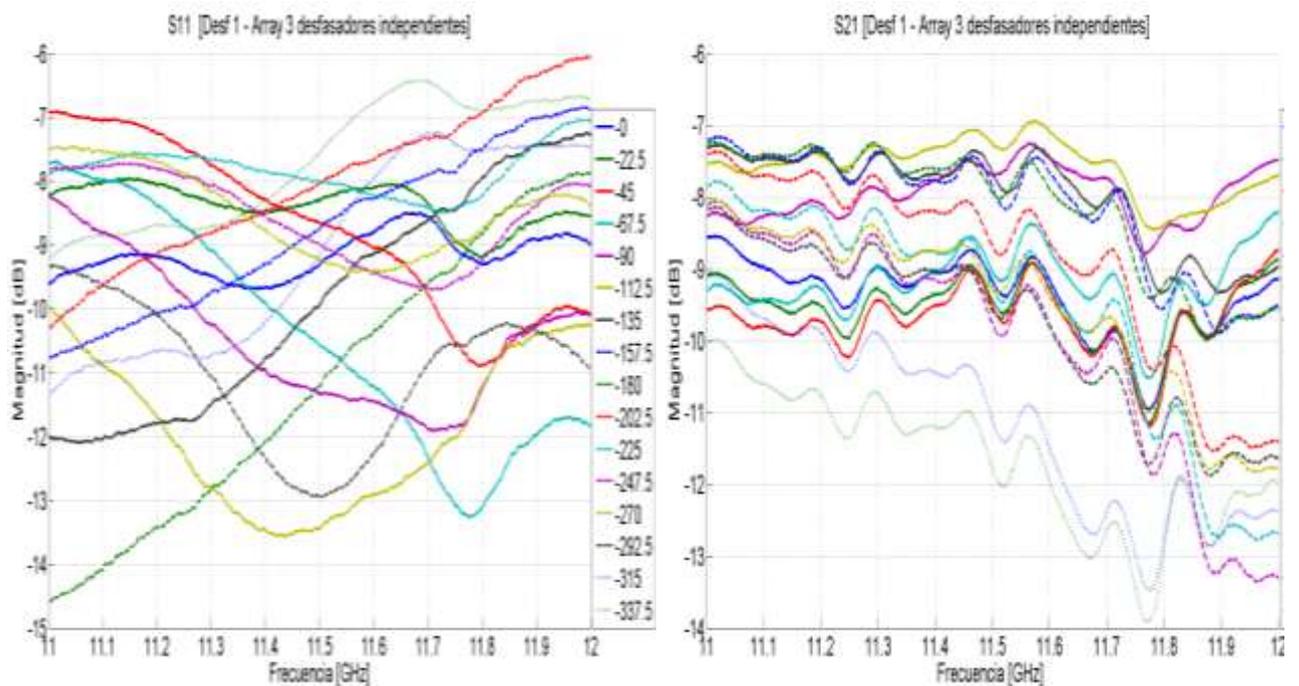


Figura 5.15 Parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  módulo. Desfasador 1. Array de tres desfasadores

Como ocurría para el circuito de evaluación, para toda la banda de consigue un valor de adaptación máximo cercano a los  $-6.5$  dB's, aunque en esta situación llama la atención una resonancia cercana a los  $11.5$  GHz mucho más marcada. Para la transmisión,



#### 5.4.2.2 Circuito array de tres desfasadores. Segundo desfasador (central)

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el segundo desfasador, o desfasador central, referente a sus parámetros de dispersión, tomados mediante el analizador de redes conectado a sus terminales de entrada y salida de radiofrecuencia. Las señales de control que llegan a este desfasador han debido pasar previamente por el primer desfasador. Para el caso de las alimentaciones y señales fijas, únicamente atraviesa la clema de alimentación, y para el caso de la palabra de datos de control el integrado en sí.

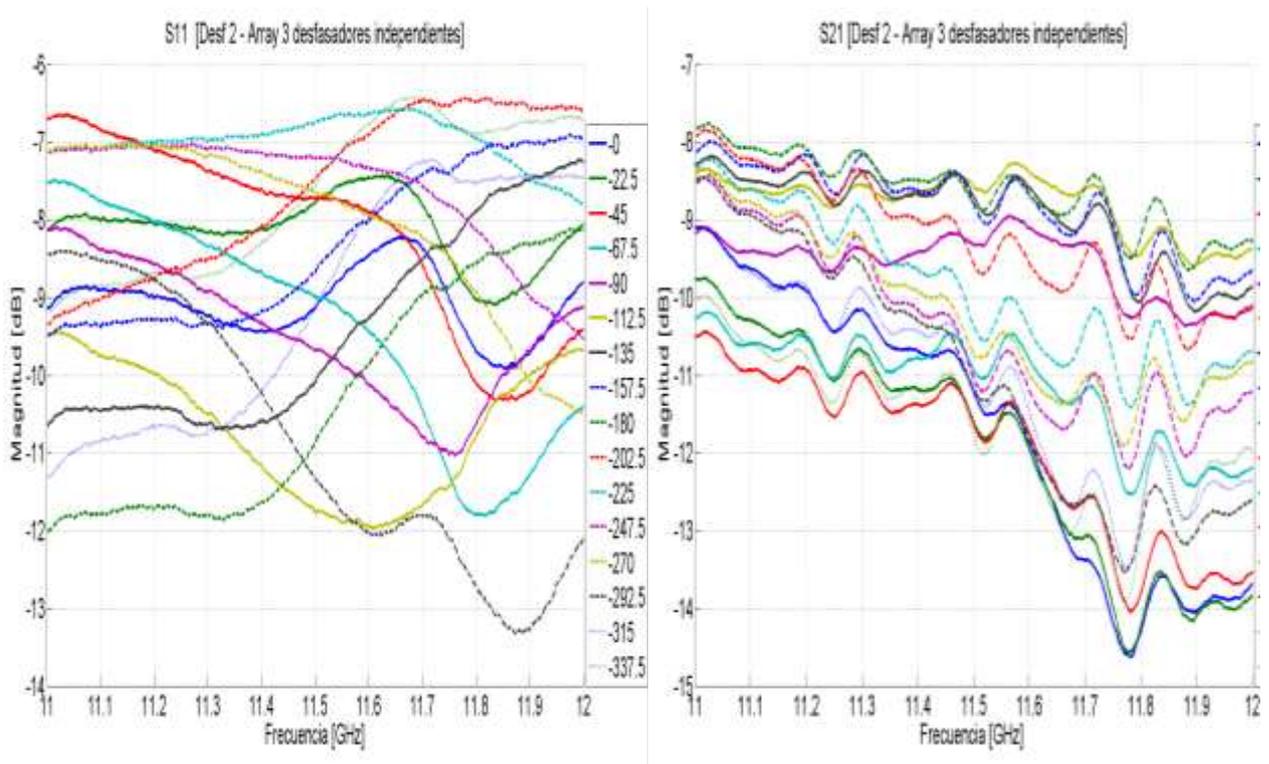


Figura 5.17 Parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  módulo. Desfasador 2. Array de tres desfasadores

Como ocurría para el circuito el desfasador anterior, para toda la banda de consigue un valor de adaptación máximo cercano a los  $-6.5$  dB's, y una adaptación máxima medida para las frecuencias más alta del estado 13 ( $-292.5^\circ$ ), que no coincide con los resultados obtenidos hasta el momento, en los que la adaptación máxima siempre se daba en la banda inferior del estado 15 ( $-337.5^\circ$ ).

La transmisión, para el caso de este desfasador, es ligeramente peor, dado que solo se llega a superar de manera marginal los  $-8$  dB's, y se vuelve a producir el prolongado rizado cercano a los  $11.8$  GHz. Estos resultados destacan nuevamente, debido a que los estados que generan la peor transmisión son los dos primeros ( $-22.5^\circ$  y  $-45^\circ$ ), en lugar de los dos últimos, como solía ser habitual.

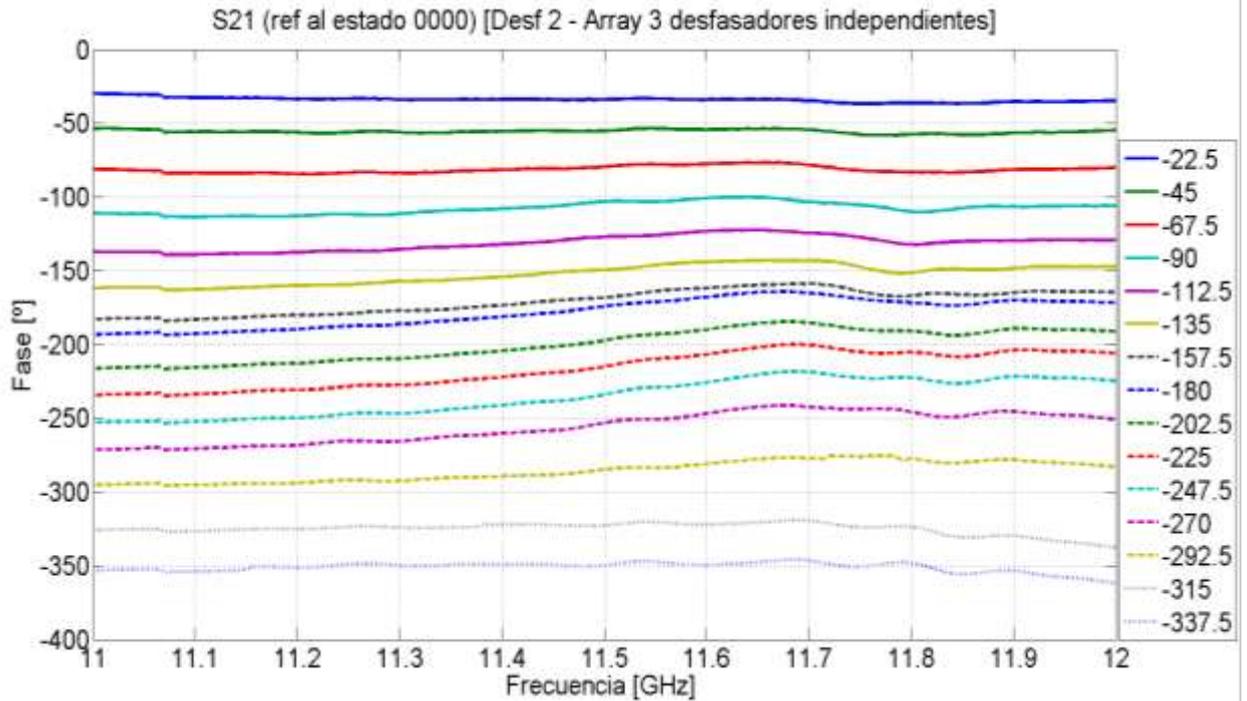


Figura 5.18 Parámetro  $S_{21}$  fase. Desfasador 2. Array de tres desfasadores

Los resultados de desfase no son tan estables como los anteriores en cuanto a la variación de la frecuencia de funcionamiento, y se observa la ondulación cercana a los 11.8 GHz bastante más marcada, y a una frecuencia ligeramente inferior.

<b><i>Desfase teórico (°)</i></b>	<b><u>-22.5</u></b>	<b><u>-45</u></b>	<b><u>-67.5</u></b>	<b><u>-90</u></b>	<b><u>-112.5</u></b>	<b><u>-135</u></b>	<b><u>-157.5</u></b>
<b>Desfase medido (°)</b>	-31.8	-55.18	-79.36	-103.1	-127	-149.4	-168.3
	<b><u>-180</u></b>	<b><u>-202.5</u></b>	<b><u>-225</u></b>	<b><u>-247.5</u></b>	<b><u>-270</u></b>	<b><u>-292.5</u></b>	<b><u>-315</u></b>
	-174.2	-197.6	-215.1	-234.2	-253.2	-284.9	-322.7
							<b><u>-337.5</u></b>
							-349

Tabla 5—III Desfase teórico y medido. Array de tres desfasadores. Desfasador 2

Debido a los resultados que se acaban de presentar, y en comparación con los obtenidos para el primer desfasador, y el desfasador de evaluación, pudiera ser el caso que el desfasador central no estuviera operando de la mejor forma posible, aunque sí dentro de unos límites aceptables.

### 5.4.2.3 Circuito array de tres desfasadores. Tercer desfasador

Solo uno de los desfasadores medidos hasta el momento asemeja sus resultados lo suficiente a los resultados obtenidos por el desfasador utilizado para evaluación. Las medidas del último desfasador nos permitirán aventurar si el comportamiento general de un desfasador en las cercanías de otro tiende a ser similar a las del desfasador de evaluación, o al medido como segundo desfasador.

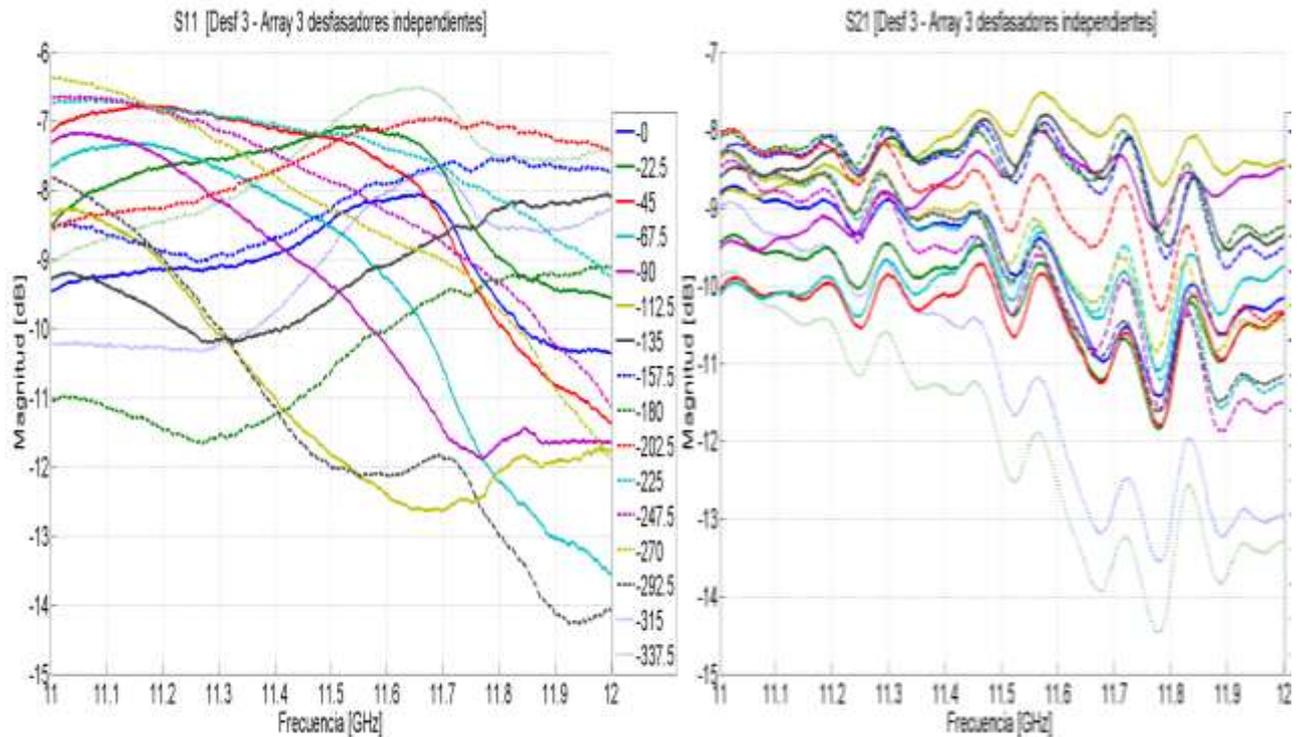


Figura 5.19 Parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  módulo. Desfasador 3. Array de tres desfasadores

Como ocurría para el circuito del desfasador central, para toda la banda de consigue un valor de adaptación máximo cercano a los -6.5 dB's, y una adaptación mínima medida para la frecuencia más alta del estado 13 (-292.5°). Por lo tanto, el tercer desfasador asemeja su funcionamiento al desfasador central, en cuanto a la adaptación presentada.

El caso de la transmisión es diferente. Se llegan a conseguir transmisiones por encima de los -8 dB's, aunque en ningún momento se alcanzan los -7 dB's del primer desfasador. Se encuentra de nuevo el rizado centrado sobre los 11.8 GHz, y la peor transmisión se produce en la banda alta de los estados 14 y 15, como en el primer desfasador y el desfasador de evaluación.

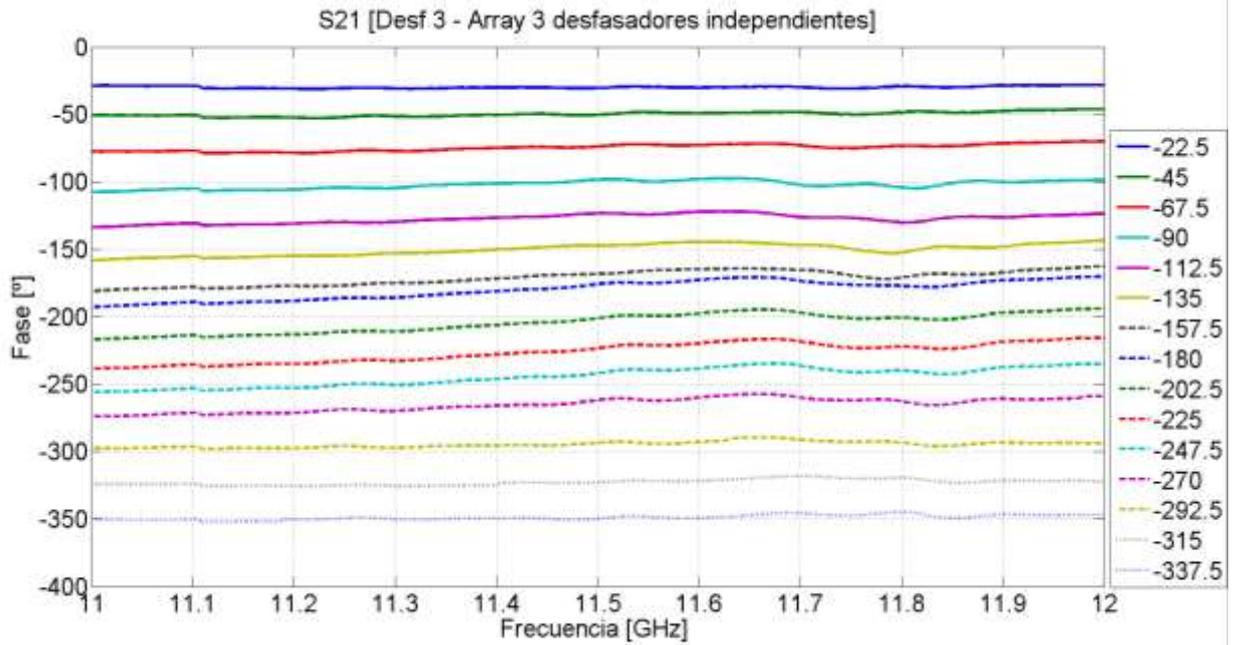


Figura 5.20 Parámetro  $S_{21}$  fase. Desfasador 3. Array de tres desfasadores

Los resultados de desfase son mucho más estables que los vistos en el segundo desfasador, aunque se sigue observando la ondulación cercana a los 11.8 GHz. Como se comprobará por los resultados reflejados en la siguiente tabla, este desfasador se comporta de manera distinta a los otros dos.

<b>Desfase teórico (°)</b>	<b><u>-22.5</u></b>	<b><u>-45</u></b>	<b><u>-67.5</u></b>	<b><u>-90</u></b>	<b><u>-112.5</u></b>	<b><u>-135</u></b>	<b><u>-157.5</u></b>
<b>Desfase medido (°)</b>	-30.2	-50.24	-73.85	-98.27	-123.3	-147.2	-168.2
<b><u>-180</u></b>	<b><u>-202.5</u></b>	<b><u>-225</u></b>	<b><u>-247.5</u></b>	<b><u>-270</u></b>	<b><u>-292.5</u></b>	<b><u>-315</u></b>	<b><u>-337.5</u></b>
-175.9	-201.1	-223.3	-241.8	-261.8	-293.4	-322.8	-349.7

Tabla 5—IV Desfase teórico y medido. Array de tres desfasadores. Desfasador 3

#### 5.4.2.4 Comparativa de desfasadores

Las diferencias de comportamiento entre los tres desfasadores integrados en el diseño, tanto las vistas entre ellos mismos, como las percibidas con respecto al desfasador de evaluación describen la variabilidad y dependencia del sistema de los procesos seguidos para su construcción.

Con objeto de mostrar de una mejor forma las diferencias entre los elementos, y facilitar su comparativa, a continuación se presentan una agrupación de los resultados ya mostrados, pero en este caso mostrando el mismo estado en los distintos desfasadores, considerado más ilustrativo para poder apreciar correctamente la variación de los mismos.

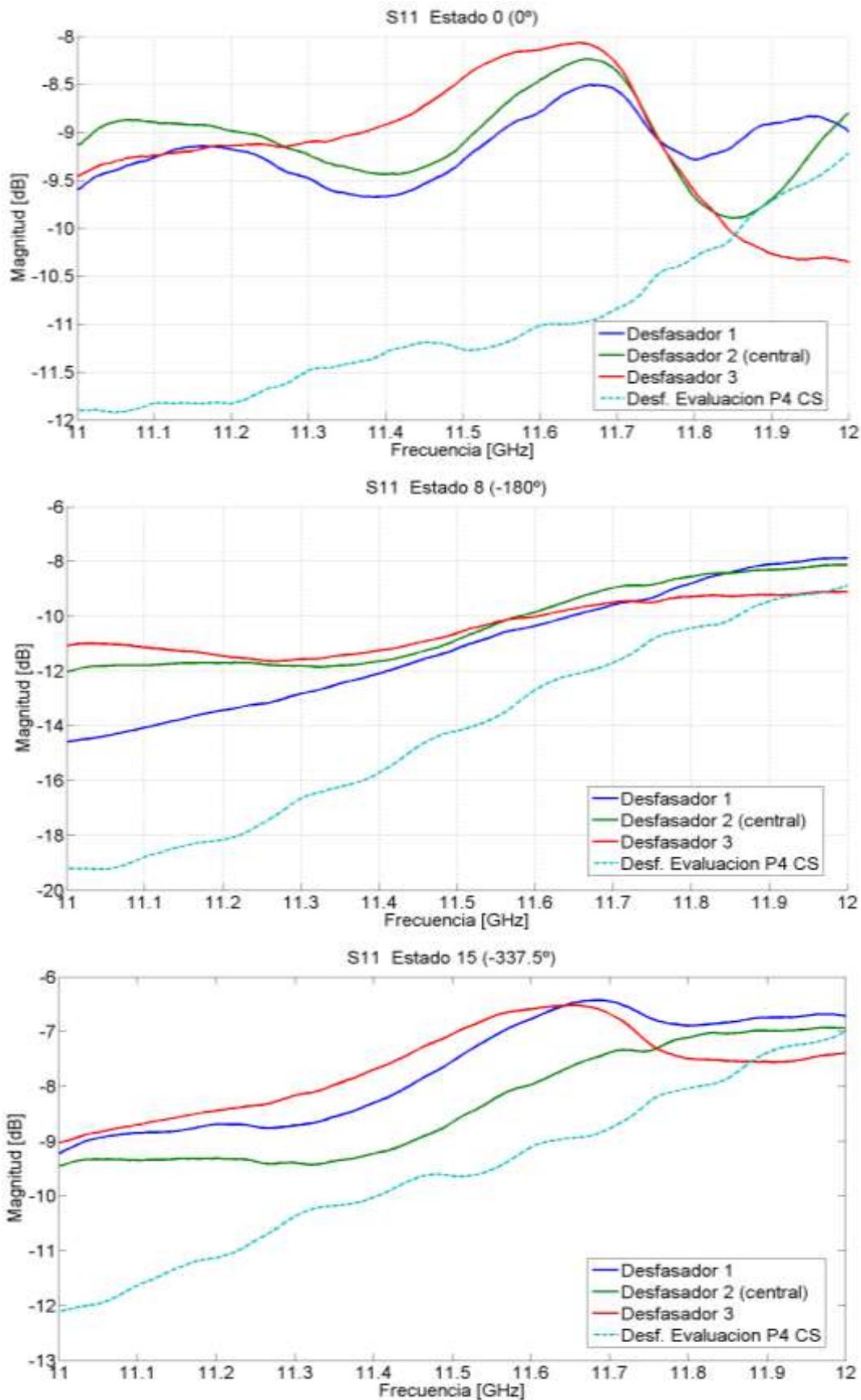


Figura 5.21 Parámetros  $S_{11}$  módulo. Comparativa. Estados críticos

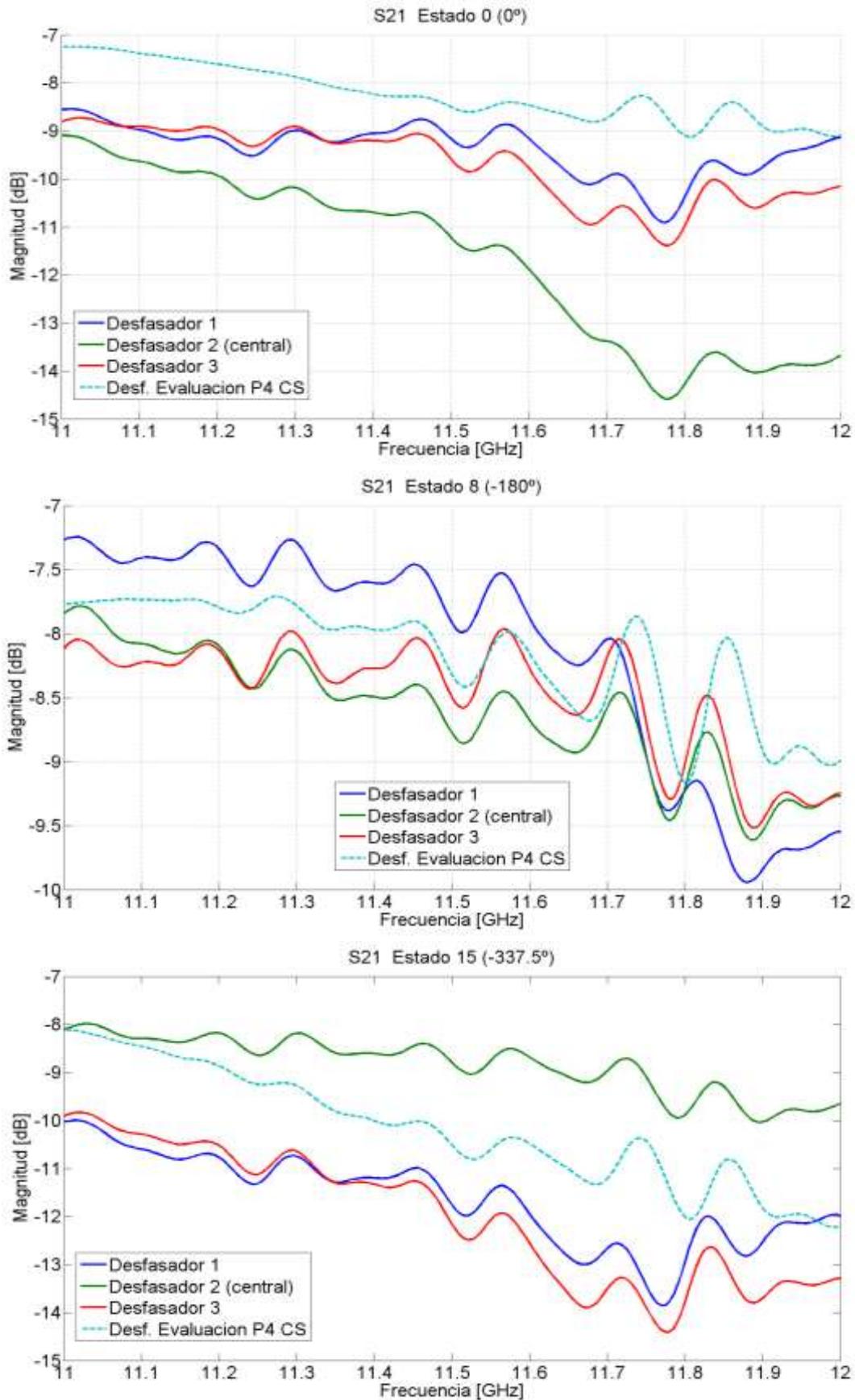


Figura 5.22 Parámetros  $S_{21}$  módulo. Comparativa. Estados críticos

Las gráficas anteriores no solo sirven para realizar una comparativa entre el comportamiento de cada uno de los desfasadores, sino que también permiten ilustrar de manera más clara el comportamiento que tienen estos elementos en función del estado programado, y los cambios que este cambio ocasiona para los tres estados más significativos.

<u>Desfase teórico (°)</u>	<u>-22.5</u>	<u>-45</u>	<u>-67.5</u>	<u>-90</u>	<u>-112.5</u>	<u>-135</u>	<u>-157.5</u>
Desfasador número 1	-27.6	-47.43	-72.7	-97.3	-122	-144.6	-164.9
Desfasador número 2	-31.8	-55.18	-79.36	-103.1	-127	-149.4	-168.3
Desfasador número 3	-30.2	-50.24	-73.85	-98.27	-123.3	-147.2	-168.2
Desf. Eva P4 CS	-27.1	-45.74	-71.74	-99.89	-127.7	-154.2	-178.2
	<u>-180</u>	<u>-202.5</u>	<u>-225</u>	<u>-247.5</u>	<u>-270</u>	<u>-292.5</u>	<u>-315</u>
	-172.3	-197.2	-217.7	-239.6	-260.4	-293.3	-322.1
	-174.2	-197.6	-215.1	-234.2	-253.2	-284.9	-322.7
	-175.9	-201.1	-223.3	-241.8	-261.8	-293.4	-322.8
	-187.2	-215.2	-233.1	-253.3	-271.3	-299.8	-326.5

Tabla 5—V Comparativa de desfases medidos, y teórico. Array de tres desfasadores.

#### 5.4.3 Medidas de radiación en la cámara anecoica

Una vez que los tres desfasadores han obtenido unos resultados aceptables en el resto de verificaciones previas, es momento de realizar las últimas pruebas pertinentes en la cámara anecoica, para verificar sus características de radiación.

Para llevar cabo estas pruebas, es necesario unir la red de alimentación que contiene los desfasadores, con el elemento radiante. Nuevamente, como se había realizado con anterioridad para el desfasador de evaluación, se utiliza un array de antenas de parches como elemento radiante, ya teniéndolo construido del proyecto precedente.

Ambos elementos se conectan a través de tres transiciones macho-macho (indicadas por la flecha azul situada más a la izquierda, en la siguiente imagen), alineando correctamente la entrada de radiofrecuencia de cada desfasador, con la salida de señal del array de tres parches, cuidando no cometer el mismo error de montaje del proyecto precedente, descrito en la sección 3.

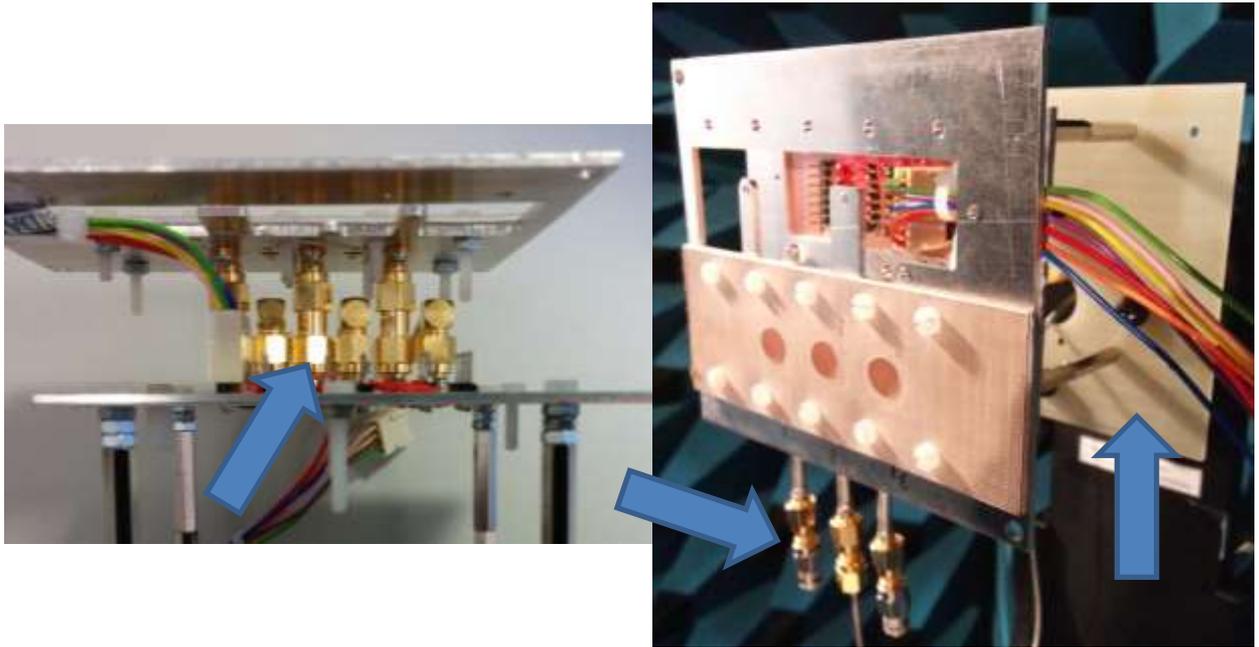


Figura 5.23 Montaje típico para medida en cámara anecoica del array de tres parches + circuito de tres desfases

En la imagen anterior se observa todo el conjunto conexionado correctamente, y colocado sobre el mástil móvil de soporte de la cámara anecoica (ilustración de la derecha).

La construcción de una nueva placa de soporte para todo el conjunto (flecha azul más a la derecha de la ilustración anterior), que aunque diseñada para este propósito, no generaba toda la estabilidad necesaria debido al gran peso del conjunto, lo que hacía que este vibrara en gran medida durante la realización de las pruebas.

También hay que destacar la utilización de cables de alimentación con conectores acodados a  $90^\circ$  (marcados mediante la flecha central en la figura anterior), que permiten transmitir la señal de radiofrecuencia al sistema de una manera más cómoda a la utilizada por el proyecto precedente, que se trataba de unos latiguillos de cable coaxial fino, doblados para caber en el estrecho hueco de apenas 30 mm, entre placa y placa.



Figura 5.24 Latiguillos normales (Superior), y acodados a  $90^\circ$  (Inferior).

Pese a estas nuevas modificaciones, y debido a la limitación de conexionado de la cámara anecoica, es imposible alimentar con señal de radiofrecuencia los tres desfasadores a la vez; por lo tanto, se tuvieron que ir midiendo uno a uno, de cara a poder utilizar estos datos para realizar un estudio de un array completo.

Un suceso que vale la pena señalar es que durante la realización de estas pruebas, uno de los amplificadores, que se incorporan a la cámara anecoica para facilitar las medidas, se degradó hasta dejar de funcionar correctamente. Este suceso, al producirse durante la realización de un banco de pruebas de uno de los desfasadores, contaminó todo el proceso seguido, y fue necesario repetir todas las medidas de nuevo una vez solventado el problema.

Las características de las medidas realizadas son exactamente las mismas que las descritas anteriormente para las pruebas del circuito de evaluación de la sección 4.3.3.

#### 5.4.3.1 Diagramas de radiación. Primer desfasador

A continuación se muestran los resultados de nivel de señal obtenidos para el primer desfasador, referente a los diagramas de radiación medidos directamente en la cámara anecoica.

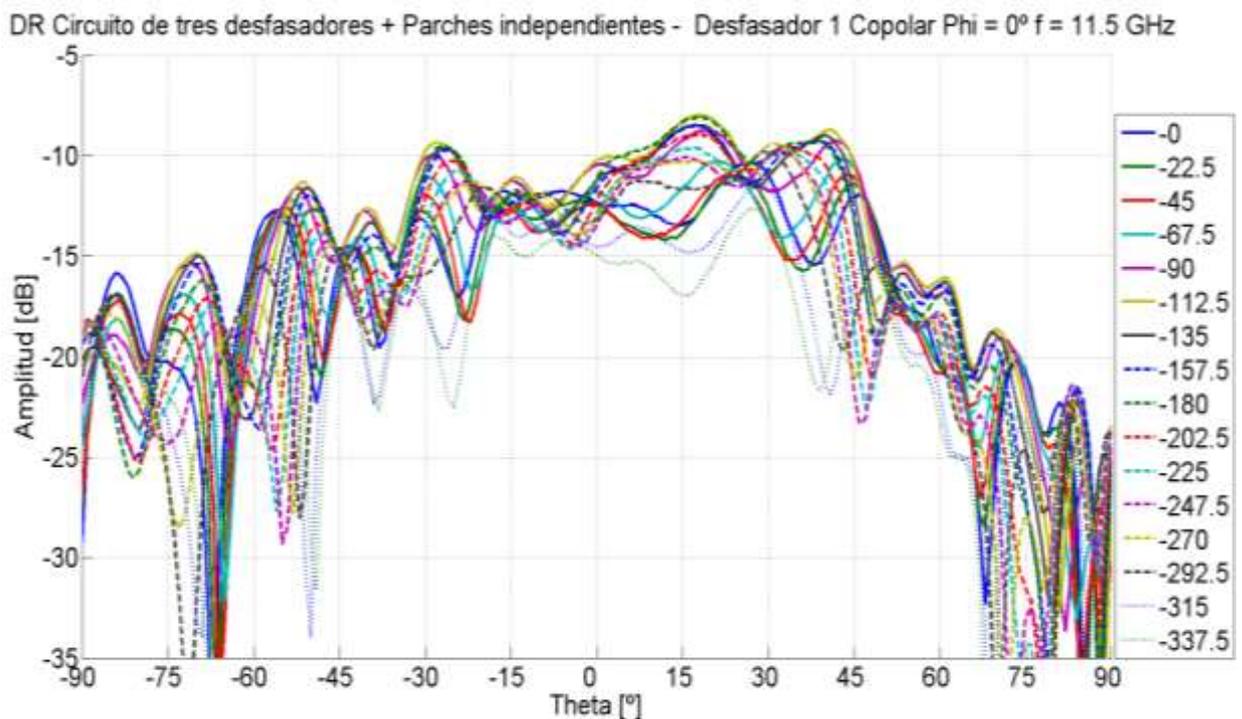


Figura 5.25 Diagramas de radiación. Desfasador 1. Array de tres desfasadores más parches independientes. Todos los estados

Al igual que para los resultados obtenidos durante las pruebas del desfasador de evaluación, el nivel máximo de señal recibida solamente sobrepasa los -10 dB's para los mejores casos, y de medio se obtienen unos resultados en torno a los -12.5 dB's, con una agrupación de resultados bastante buena en las cercanías de los 0° de barrido.

Un suceso verdaderamente importante, es el considerable crecimiento de los lóbulos secundarios, que en algunos casos llegan a estar al mismo nivel que los resultados principales, y el decrecimiento más pronunciado de la señal a medida que no alejamos del 0° hacia la parte positiva del eje, llegando a 90°.

Con el objetivo de mostrar el comportamiento del dispositivo de una forma mucho más completa y visual, como ya se realizó para la representación de medidas del circuito de evaluación, se presentan los resultados a las tres frecuencias características, para los estados más significativos: estado 0 (0°, desfasador sin programar), estado 8 (-180°, activación del bit de control más significativo del desfasador), estado 15 (-337.5°, activación de todos los bit de control a la vez).

Para una mayor claridad, y por la necesidad lógica de comparar el efecto del desfasador en el diagrama de radiación normal de un parche, también se representa junto a los resultados anteriores, los datos obtenidos para el parche solo medido a las tres frecuencias antes estudiadas.

Se representan los resultados antes citados de manera conjunta ocupando una única página (la siguiente), para que la visualización de los mismos sea de mayor comodidad. Y para no desaprovechar espacio, a continuación se hace el análisis de los resultados, que normalmente se realizaría después de la ilustración de los mismos.

En los tres diagramas de radiación mostrados a continuación vuelve a destacar la marcada diferencia de comportamiento que presenta el sistema en función de la frecuencia. Los efectos de la inserción del desfasador parecen ligeramente acrecentados en comparación con los obtenidos para el circuito de evaluación, la diferencia del nivel de potencia que tendría el parche por sí solo, comparado con la obtenida al incluir el desfasador dentro de la medida se acerca a los 12 dB's de media, 2 dB's por encima que la obtenida para el desfasador de evaluación.

Esta diferencia de resultados podría deberse a la inclusión de los elementos necesarios para la conexión del sistema, tales como diversos latiguillos y transiciones, aunque que de todas formas, no deberían presentar esa cantidad de pérdidas.

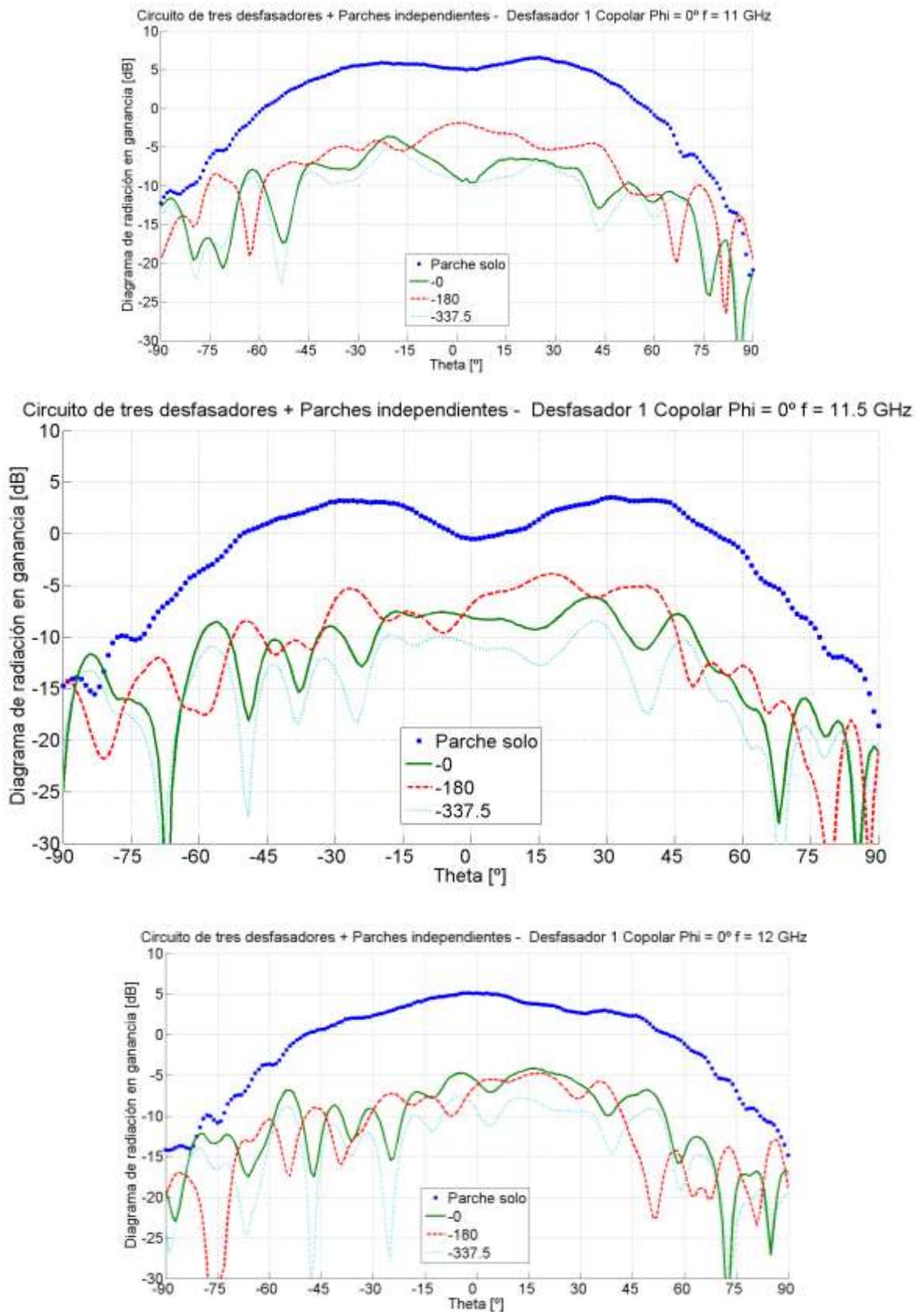


Figura 5.26 Diagramas de radiación. Desfasador 1. Array de tres desfasadores más parches independientes. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz

### 5.4.3.2 Diagrama de radiación. Segundo desfasador (central)

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el segundo desfasador, referente a los diagramas de radiación medidos en la cámara anecoica.

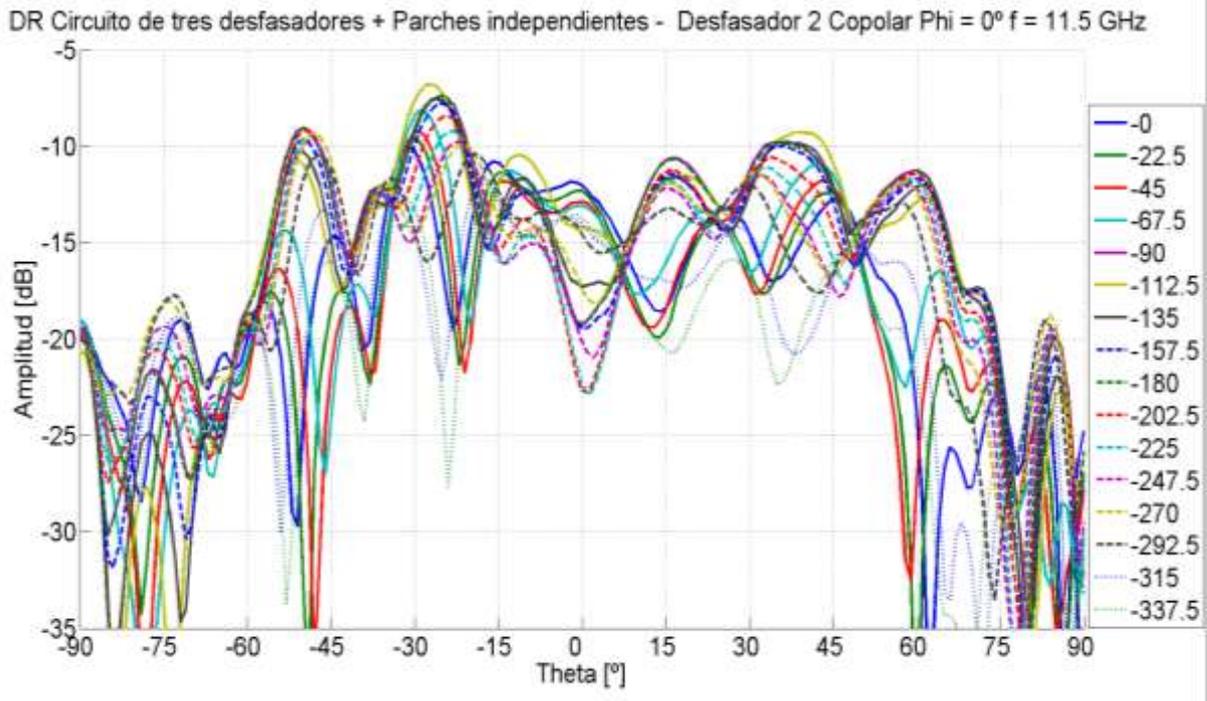


Figura 5.27 Diagramas de radiación. Desfasador 2. Array de tres desfasadores más parches independientes. Todos los estados

Nuevamente, y de manera similar a como se producía para el desfasador de evaluación y el primer integrado del array de tres desfasadores, el nivel de señal máximo se encuentra cercano a los  $-115\text{dB}$ 's, pero con una agrupación de resultados notablemente peor, y un rizado peligrosamente marcado en toda la banda del barrido. Al igual que en el primer desfasador, los lóbulos secundarios se encuentran muy elevados, pero en este caso, la perturbación se produce en el barrido completo.

En las tres imágenes que se muestran a continuación, se puede volver a observar la marcada dependencia de los resultados en función de la frecuencia, pero además llama la atención el acentuado rizado de las medidas, y su bajo nivel de señal en comparación con el parche individual, con casi  $15\text{dB}$ 's de diferencia en casi todo el barrido de medida.

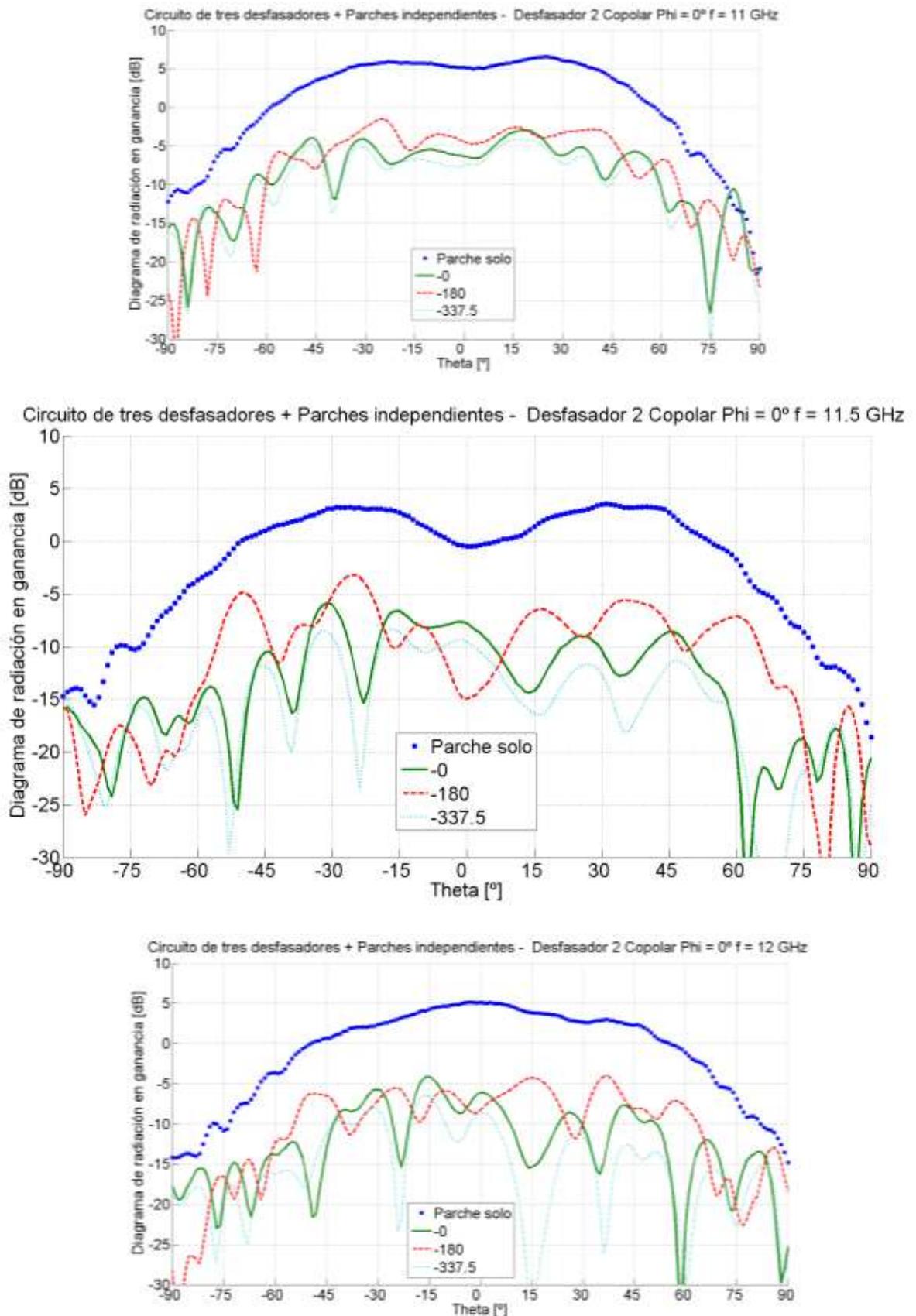


Figura 5.28 Diagramas de radiación. Desfasador 1. Array de tres desfasadores más parches independientes. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz

### 5.4.3.3 Diagramas de radiación. Tercer desfasador

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el segundo desfasador, referente a los diagramas de radiación medidos en la cámara anecoica.

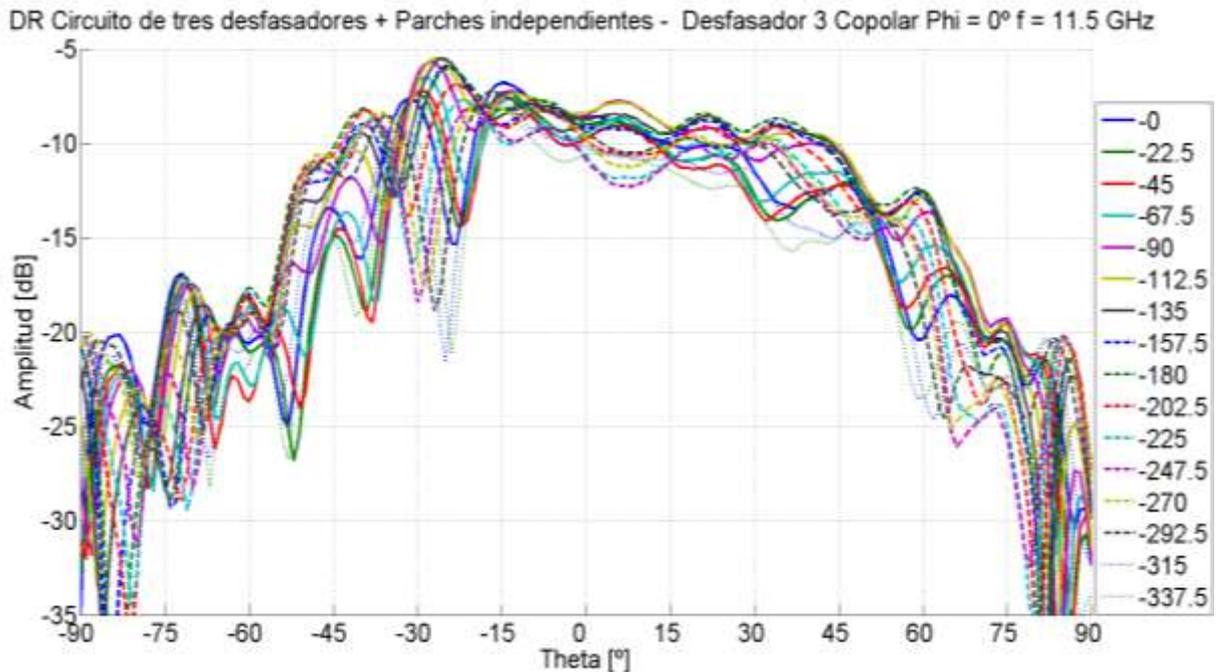


Figura 5.29 Diagramas de radiación. Desfasador 3. Array de tres desfasadores más parches independientes. Todos los estados

Los resultados de la imagen anterior muestran un nivel de señal ligeramente mejor que para los anteriores desfasadores, ya que para la parte central del barrido, se consiguen superar los -10dB's para la mayoría de los estados. La agrupación de resultados sigue las características anteriormente nombradas.

Destaca también para el caso de este desfasador, la crecida del nivel de los lóbulos secundarios, y del rizado observado. Al contrario que para el primer desfasador, se produce un decaimiento más rápido del nivel de señal, a medida que nos alejamos desde los 0°, avanzado en el eje de valores negativos hacia los -90°.

Las imágenes siguientes, que muestran los diagramas de radiación específicos para las tres frecuencias principales, y los estados más significativos, no ilustran ningún resultado distinto a los ya comentados con anterioridad para el resto de desfasadores. El único suceso destacable, es que la caída del nivel de señal con respecto al parche individual, es bastante menor que para los demás desfasadores, llegando solamente en algunos casos a los -10dB's.

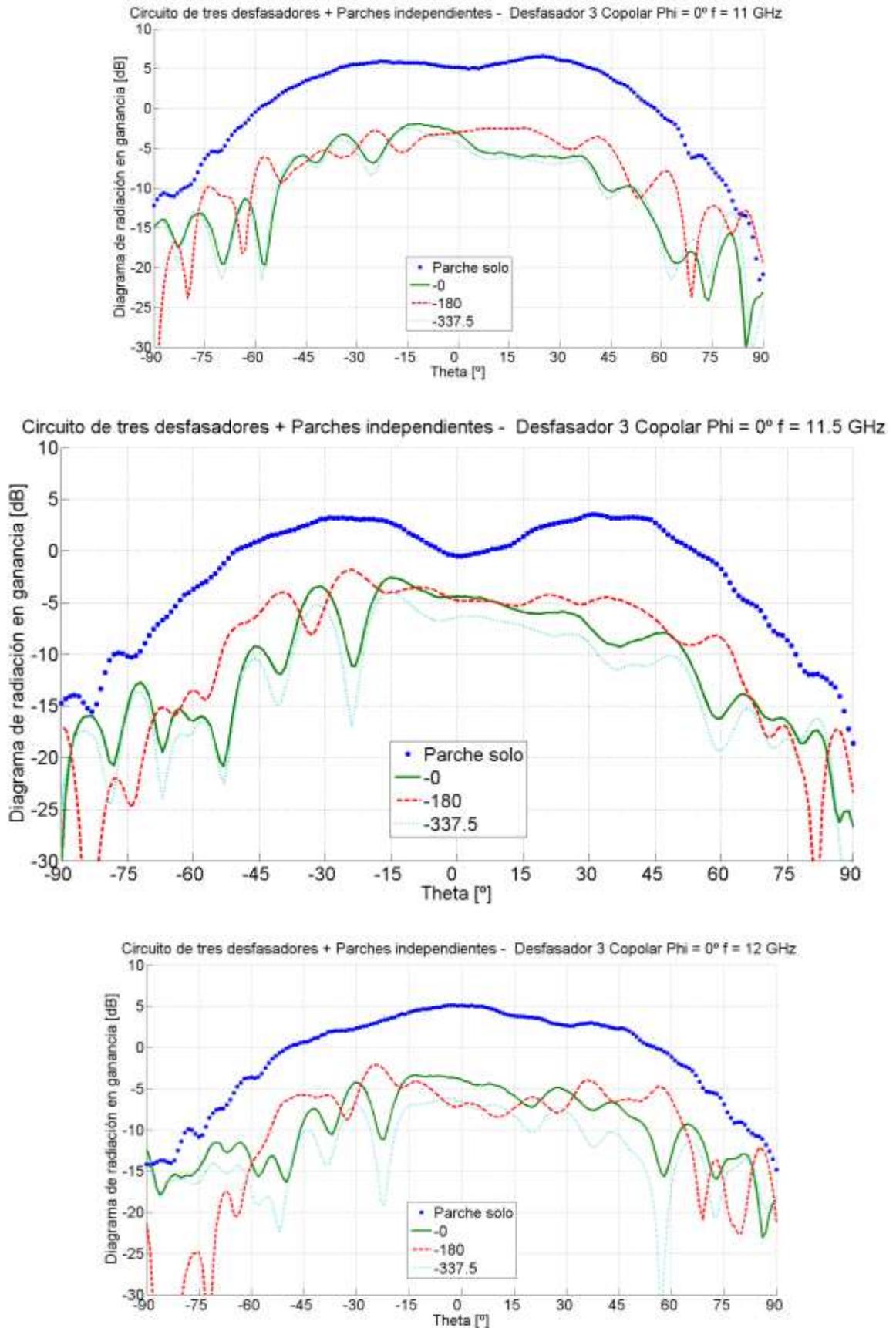
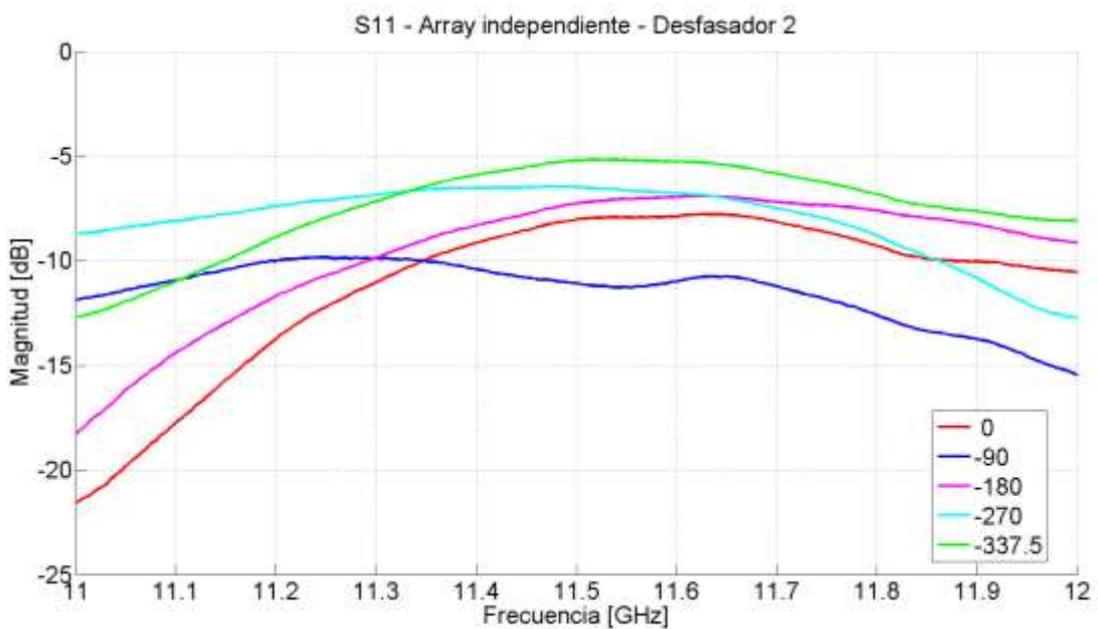
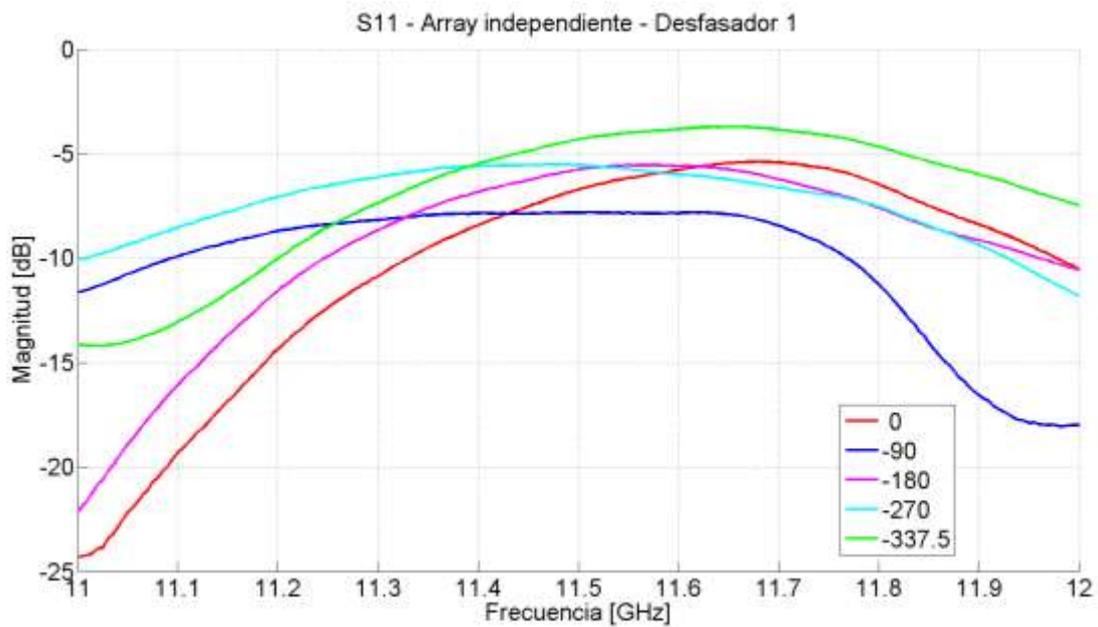


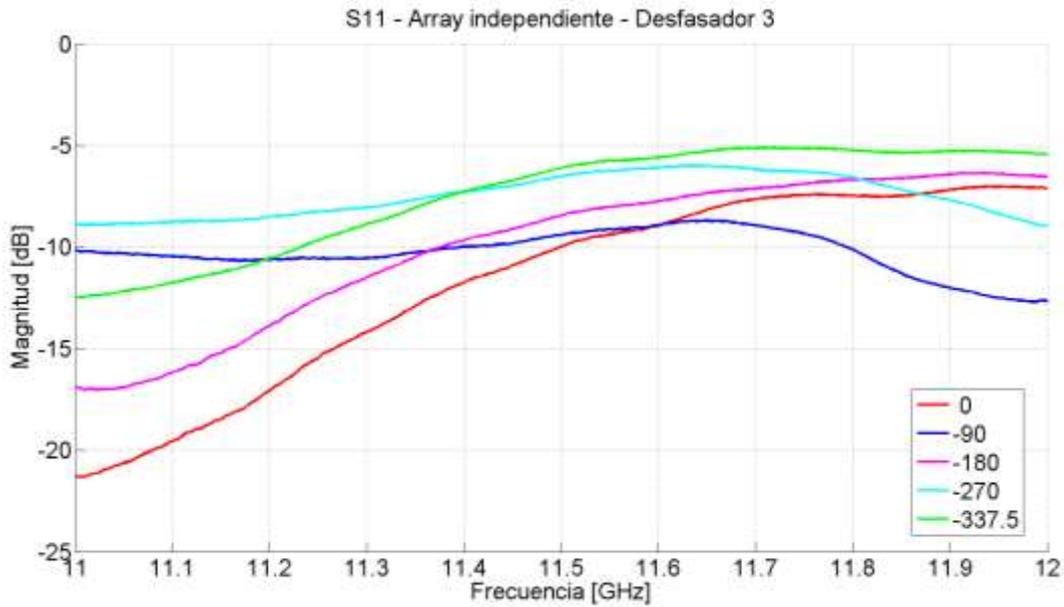
Figura 5.30 Diagramas de radiación. Desfasador 3. Array de tres desfasadores más parches independientes. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz

5.4.3.4 Reflexión de la estructura desfasador y parche

Para finalizar con la caracterización realizada al diseño de la red de alimentación con tres desfasadores y tres parches independientes se mide la reflexión que presenta cada pareja desfasador + parche en su único puerto disponible.

A continuación se muestran los resultados de estas medidas para los tres conjuntos desfasador + parche. Por simplicidad, solo se muestran los resultados en algunos estados críticos y los mismos que para el desfasador de evaluación, de cara a facilitar su comparativa





*Ilustración 5.31 Parámetros  $S_{11}$  (reflexión) para los tres desfasadores del array de tres desfasadores más parches independientes*

Como ocurría para los resultados del desfasador, se obtiene una reflexión distinta para cada estado de desfase que se programe en el integrado. Los resultados son muy similares para los tres desfasadores.

Aunque se observa un descenso de la adaptación máxima posible, los resultados anteriores se mantienen en rangos similares a los obtenidos para el circuito de evaluación del desfasador.

## 5.5 Conclusión

Las pruebas realizadas sobre el circuito de control serie y la placa de conexión intermedia, permiten asegurar un protocolo serie plenamente operativo para la programación en cadena de tres desfasadores. Mediante algunos cambios en el código utilizado, se puede actualizar fácilmente dicho funcionamiento a un número mayor de elementos. Aunque como ya se comentó en el capítulo anterior, todo el potencial de este sistema no está plenamente explotado, dado que sigue siendo necesario interrumpir las medidas para realizar los cambios necesarios en los datos de entrada del código de control, y modificar el estado programado en los desfasadores. Este proceso se hace verdaderamente tedioso y lento en cuanto a las pruebas en la cámara anecoica, asemejándose de forma alarmante al mecanismo utilizado para el control paralelo.

Los diseños implementados contienen un alto grado de modularidad, pudiendo realizar modificaciones importantes sin demasiado esfuerzo, y permitiendo adaptar el uso del integrado en cuestión a multitud de necesidades.

Las altas pérdidas medidas, así como la gran reflexión que presenta el montaje, hacen muy importante el correcto diseño de la red de alimentación previa a los desfasadores, y la optimización de la ganancia del elemento radiante. En definitiva, el sistema total diseñado carece de ganancia.

La variabilidad medida para los estados de desfase no coincide con los valores aportados por la hoja de documentación del fabricante, pero aun con esto, se puede realizar una estimación de la misma, y por lo tanto, aunque no controlable, puede ser prevista.

En relación con lo anteriormente descrito, existe una alta dependencia de las características del sistema en función del estado programado, lo que hace muy difícil generalizar su funcionamiento, y por lo tanto, diseñar los elementos conectables al mismo.

La deformación que presenta el diagrama de radiación es verdaderamente considerable, además de la gran variabilidad de esta, en función del estado programado en el desfasador.

Como se ha podido observar en las figuras de la subsección anterior, referente a las pruebas en la cámara anecoica, existe una variabilidad en el funcionamiento de cada uno de los tres desfasadores. Estos cambios en el funcionamiento dependen en gran medida de la posición del elemento analizado. Esto es debido a la presencia de otro elemento cercano, es decir, los efectos cruzados entre los parches o acoplos mutuos deben ser tenidos en cuenta.



## 6 Diseño de array conjunto de tres desfasadores y tres parches

### 6.1 *Introducción*

En este capítulo se explican todos los procesos de diseño y fabricación llevados a cabo para intentar integrar todas las tecnologías estudiadas en este PFC, en un único circuito array de tres elementos, mediante el cual poder comprobar el funcionamiento de cada una de las tecnologías implementadas.

La aplicación conjunta de las tecnologías mostradas permite obtener unos diseños mucho más compactos y adaptables, y se intenta llevar a estudio estas ventajas, junto con los problemas que puedan derivar de un diseño reducido en tamaño.

Se estudiarán con detenimiento los resultados obtenidos, comparándolos entre sí con los elementos estudiados, y verificando su funcionamiento con respecto a los resultados obtenidos en los capítulos previos.

### 6.2 *Diseño y fabricación*

La fabricación se ha realizado casi en su totalidad en el taller de circuitos impresos de la EPS, con el material necesario para ello.

A continuación, se describe tanto las herramientas, componentes y materiales necesarios a tal efecto, como los procedimientos seguidos para la construcción.

#### 6.2.1 *Diseño de los circuitos impresos*

En el diseño mostrado en capítulo anterior, se disponía de la red de alimentación que contenía los desfasadores en una única placa individual, que se conectaba a un diseño independiente con los dos grupos de parches apilados (inferiores y superiores); mediante las transiciones macho-macho. Para esta nueva construcción, se desea eliminar la transición entre las dos placas, pudiendo soportar todo el conjunto sobre una única mecanización en aluminio, y realizando la conexión de parches inferiores con el desfasador directamente a través de una línea microstrip.

##### 6.2.1.1 *Circuito array desfasadores y tres parches*

Continuando con el estilo de diseño seguido para las anteriores construcciones, en estos planos los parches inferiores estarán situados en la misma capa que el propio

desfasador y la línea microstrip de salida. Los parches superiores se colocarán alineados en una capa superior, separados físicamente por una capa de “foam”, que imitará las características del aire, y se encargará de dar una mayor solidez a la estructura.

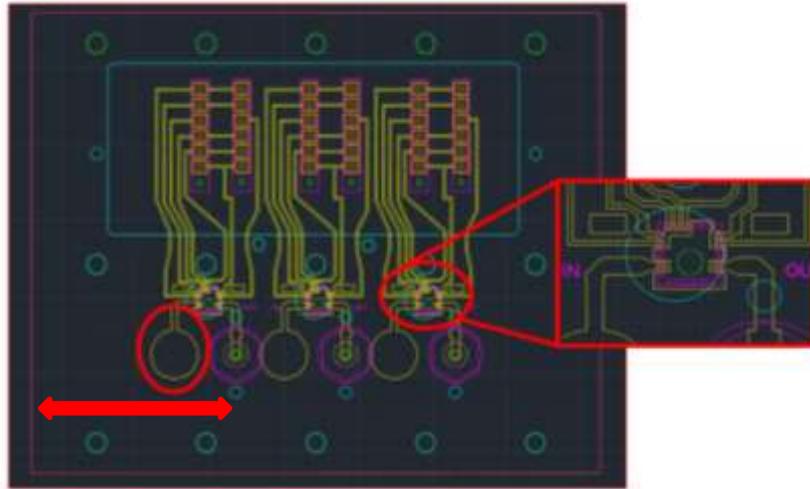


Figura 6.1 Circuito array de tres desfasadores y tres parches inferiores

En la anterior Figura, pueden observarse los cambios más significativos implementados con respecto al diseño de la sección anterior. A continuación se procede a detallar más concretamente estas modificaciones:

- **Parche inferior:** como se puede observar por la imagen anterior, se ha sustituido el espacio para soldar un conector vertical y la línea microstrip que alimentaban la entrada del desfasador, por un parche circular y su correspondiente línea de transmisión. Varias veces a lo largo del proyecto se ha explicado este cambio, que se realiza en el puerto de entrada del desfasador, dado que el sistema que se está diseñando actúa como receptor.
- **Desfasador:** en la imagen aumentada, a la derecha de la imagen principal, puede comprobarse que la colocación prevista del integrado está desalineada del centro del círculo de vaciado del soporte metálico. Como se explicara más adelante, debido a un error durante el proceso de mecanizado del soporte de aluminio, fue necesario desplazar ligeramente la posición de los conectores y los parches (y todo el circuito conectado a ellos, lógicamente); los conectores se desplazaron 0.9 mm alejándose del borde del lateral izquierdo de la placa, y por consiguiente fue necesario re-rutar el resto del circuito.

Aparte del circuito mostrado en la ilustración anterior, fue necesario realizar el circuito correspondiente a los parches superiores, en el mismo sustrato que el del circuito original, así como una placa de soporte para sujeción en la cámara anecoica. El resultado

de estos diseños puede comprobarse en el anexo correspondiente A.C “Planos de mecanizados y circuitos impresos”.

### 6.2.2 Componentes utilizados

El diseño anterior, donde se integran conjuntamente todas las tecnologías estudiadas, requiere de una cantidad bastante reducida de componentes electrónicos, los cuales, son los mismos utilizados para el diseño del array explicado en el capítulo anterior.

#### 6.2.2.1 Chasis de soporte en aluminio

Como ocurría con anterioridad, debido al material del cual se compone la carcasa de los conectores, se hace imposible soldarlos directamente al sustrato del circuito impreso; y por lo tanto, es necesario el uso de una placa de soporte metálica para dar también rigidez y consistencia al diseño.

La desaparición de tres de los seis conectores debido al cambio en la alimentación de los parches inferiores hace que a su vez sea necesario modificar de posición de los tres restantes para corregir el error en el flujo de potencia de los diseños del proyecto anterior. Todos estos cambios en la estructura básica del diseño, hacen que sea imposible reutilizar el soporte metálico ideado por el proyecto precedente; y que por lo tanto, se deba mecanizar desde cero un soporte de aluminio distinto, que cumpla las nuevas especificaciones.

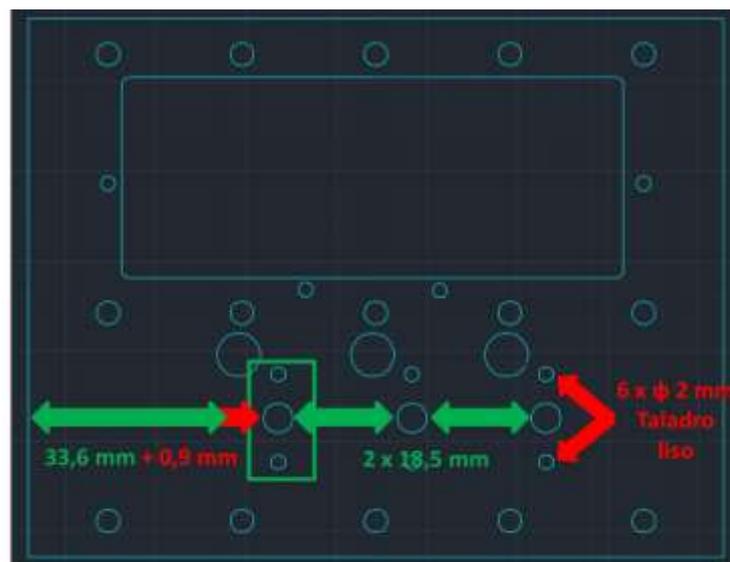


Figura 6.2 Diseño de soporte metálico para circuito de tres desfasadores. Errores cometidos

Debido a las limitaciones materiales del taller de circuitos de la EPS, donde se construyó la placa de soporte en aluminio, fue necesario utilizar unas planchas de material de aluminio de espesor mayor que el especificado en los planos originales “Figura A.26”. En estos planos se indicaba un espesor de la construcción de 1.5 mm, y en vez de esa medida, el espesor del material disponible era de 2 mm.

En la imagen anterior se puede comprobar que durante el proceso de fabricación de este soporte, se produjeron algunos errores significativos, que fue necesario subsanar posteriormente.

- El primero de estos errores, marcado con la flecha roja, superpuesta sobre la flecha verde, indica que durante el proceso de mecanizado, la posición de los taladros necesarios para el alojamiento del conector vertical, se desplazaron 0.9 mm con respecto al margen izquierdo de la placa. Afortunadamente, la distancia entre conectores se mantuvo invariable, así como la distancia entre el taladro central, y los auxiliares (marcados con recuadro verde).
- El segundo error, hace referencia a que los taladros auxiliares para el anclaje de cada conector debían ser roscados con un diámetro de M2, y en su lugar se realizaron taladros totalmente lisos de 2 mm de diámetro. Esto hacía imposible la correcta conexión del conector, y fue necesario actualizar la placa llevándola a un taller externo que retaladró los orificios y adaptó a una rosca de M2 mediante el uso de helicoil.



Figura 6.3 Reparación de taladros mediante helicoil. Imagen extraída de HELICOIL® tangfree

#### 6.2.2.2 Circuitería de corriente continua

Debido a la gran similitud de este diseño con el descrito en el capítulo anterior, no fue necesario realizar ninguna adquisición adicional de componentes. Los utilizados se describen en la tabla *Tabla 5—I Componentes para circuito de tres desfases.*” del capítulo anterior.

### 6.2.3 Montaje: fabricación, soldadura, y conexionado

Una vez terminado el diseño del circuito final, y escogidos los componentes adecuados, se obtienen los archivos gerbers (.gbr) necesarios para la fabricación del circuito impreso en la fresadora del taller de circuitos de la escuela.

Durante este proceso de fabricación, la herramienta que realizaba los contornos del circuito arrastró con su movimiento parte de las virutas de material sobrante; esto provocó que la superficie del tercer parche sufriera daños importantes (como se observa en la imagen a continuación), al igual que la línea de transmisión adyacente. Debido a la importancia de estos elementos, críticos para el proceso de radiación, se decide repetir la construcción de la placa, repasando con mayor cuidado el contorno de dichos elementos.

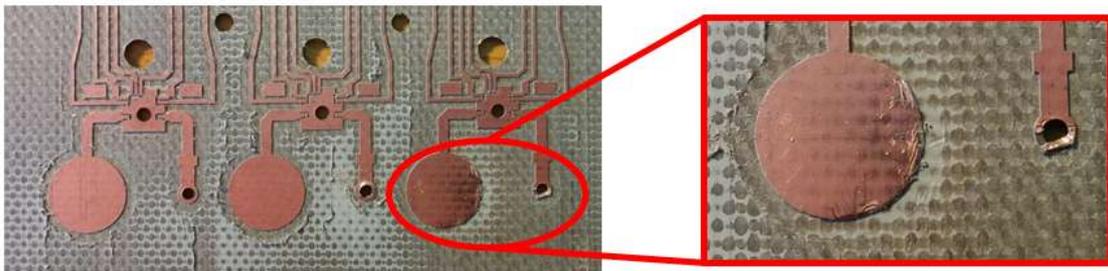


Figura 6.4 Daños sufridos en el tercer parche durante el proceso de fabricación

Una vez corregido este error, y teniendo la placa de circuito impreso perfectamente confeccionada, el proceso de soldadura y conexionado es virtualmente idéntico al descrito en la sección 5.3.3 con algunas particularidades, como la colocación de los parches superiores, separados por una capa de *foam* de 0.5 mm, y la preparación y conexionado de los conectores SMA coaxiales.

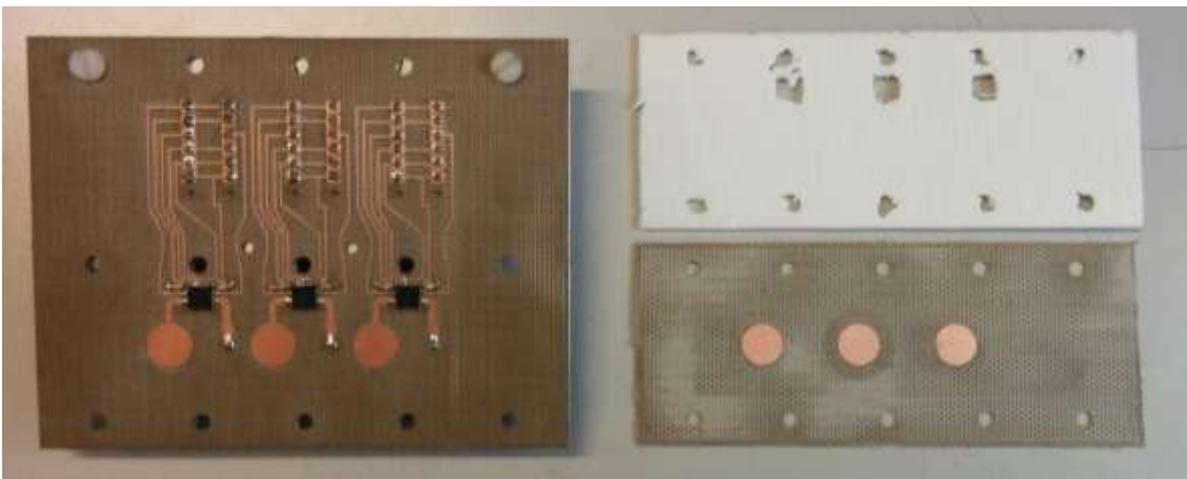


Figura 6.5 Circuito de tres desfasadores y tres parches inferiores (Dcha.), capa de foam (Sup.) y circuito de parches superiores (Inf.)

### 6.2.3.1 Preparación de conectores verticales SMA coaxial

Los conectores utilizados hasta ahora en las distintas estructuras presentadas, se han reciclado de los montajes realizados en el proyecto previo. Debido al cambio de espesor del material utilizado para la mecanización de la placa de soporte, es necesario preparar conectores con unas características diferentes.

En el proyecto previo, el alma de los conectores SMA había sido recortada para adaptarlo al espesor conjunto del soporte metálico y la placa de sustrato, es decir 1.5 mm del soporte de aluminio, más 0.508 mm del espesor del circuito impreso. Para el caso del circuito diseñado anteriormente, es necesario aumentar esta longitud en 0.5 mm.

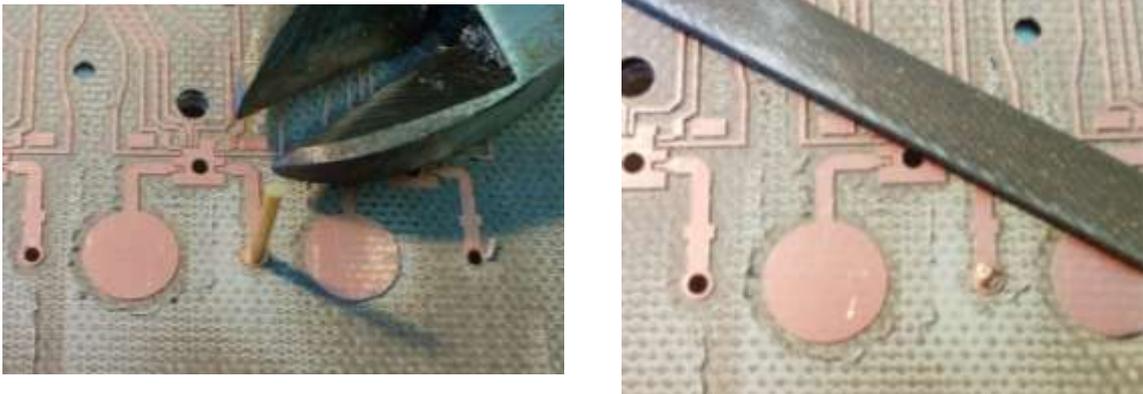
El proceso seguido para la preparación de los conectores se detalla paso a paso a continuación:

- 1. Recortar el recubrimiento de teflón:** el conductor interior del conector está recubierto de teflón. Es preciso recortar este material hasta dejarlo justo a la misma altura que la placa de soporte de aluminio, de tal forma que el sustrato de circuito impreso quede colocado sobre esta superficie, con el alma del conector atravesándolo. Debido al grosor del aluminio, es necesario que la longitud del teflón no exceda los 2 mm.



Figura 6.6 Corte del recubrimiento de teflón del conector SMA

- 2. Recortar el alma de conector:** el conductor interior del conector debe tener una longitud suficiente como para cubrir el espesor conjunto del soporte de aluminio y el sustrato de circuito impreso, para que se pueda conectar de forma fácil y correcta a la línea microstrip. Debido al grosor conjunto de ambas placas, el alma debe tener al menos 2.5 mm de longitud; pero además, se debe dejar alrededor de 1 mm adicional, debido a que el corte realizado por el alicate deforma considerablemente la sección del alma, y es preciso reparar esta deformación como se explica en el paso siguiente.



*Figura 6.7 Corte y limado del conductor interior del conector SMA*

- 3. Limado del conductor interior:** para corregir la deformación del alma del conector sufrida debido al proceso de corte y para aumentar la precisión de la longitud, se realiza un limado progresivo del alma de conector, hasta ajustarlo todo lo posible a la longitud necesaria para cubrir las distancias conjuntas de aluminio y sustrato, pero permitiendo una soldadura de forma correcta con la línea microstrip.

## **6.3 Comprobaciones y medidas**

Con objeto de verificar el funcionamiento de los circuitos diseñados se siguen los mismos procesos explicados y utilizados en las secciones anteriores.

Aunque las pruebas que se mostraran a continuación no denotan unos resultados demasiado positivos, también se comprobará que estos resultados no se deben a errores durante el montaje, sino a la necesidad de un diseño distinto debido a las nuevas necesidades de la estructura construida.

### **6.3.1 Comprobaciones eléctricas**

Siguiendo el mismo procedimiento de comprobación utilizado con el array de tres desfasadores y tres parches independientes, a medida que se realizaba el conexionado de los distintos elementos que conformaban la construcción se iban comprobando estas uniones mediante un multímetro y se verificaba que no existiera ningún tipo de cortocircuito dentro del montaje.

También, al igual que para el circuito anterior, se tuvieron los mismo problemas al intentar verificar la correcta unión de la masa del integrado.

### 6.3.2 Medidas de radiación en la cámara anecoica

El array conjunto de tres desfasadores y tres parches construido para esta parte del proyecto no dispone de dos conectores SMA por desfasador y, por lo tanto, es imposible medir sus características de transmisión y desfase mediante el analizador de redes. Debido a esta limitación, los resultados más esclarecedoras que se pueden obtener para verificar el funcionamiento de la estructura se recogerán de las pruebas realizadas en la cámara anecoica.

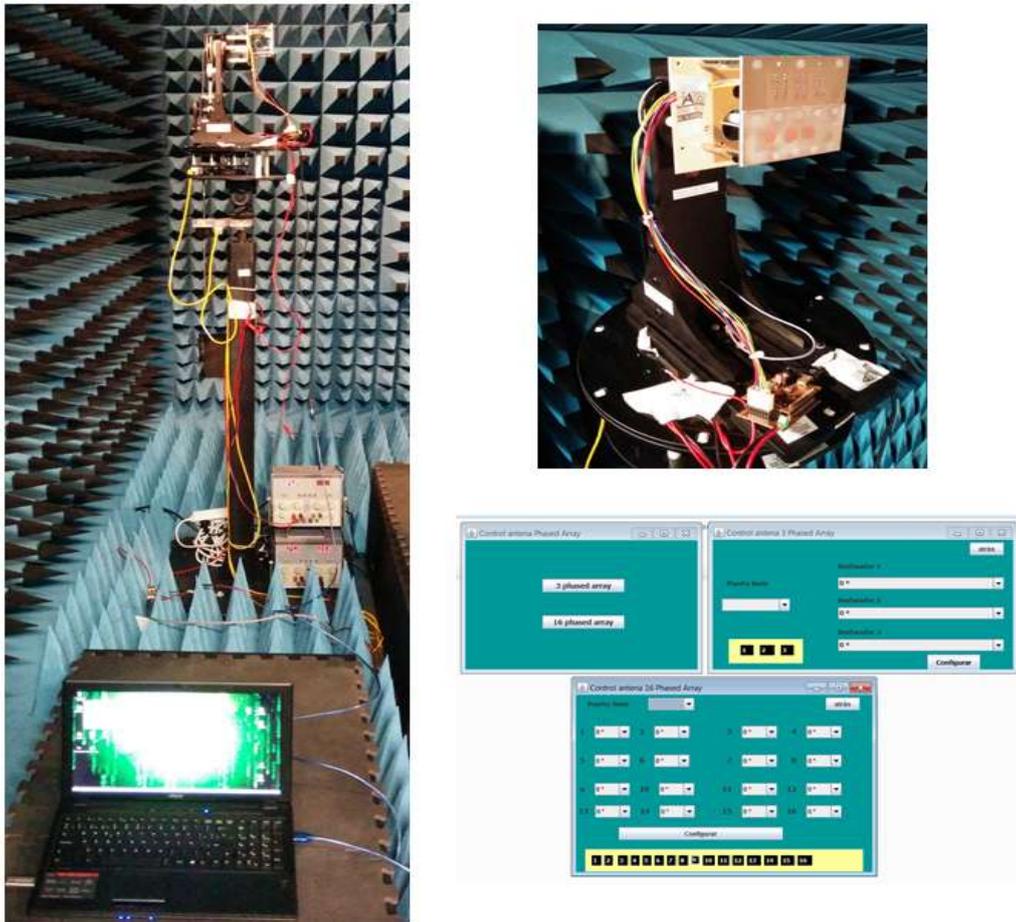


Figura 6.8 Montaje típico en cámara anecoica del array conjunto de tres desfasadores y tres parches.

En la figura anterior se puede comprobar la disposición de la nueva estructura dentro de la cámara anecoica. Debido a la utilización de un recién implementado interfaz gráfico (imagen inferior derecha), ya no es necesario programar la placa de control serie modificando el código de control en el programa de Atmel y tampoco es necesario utilizar el conversor del AVR.

El control serie se controla y alimenta únicamente mediante un cable USB conectado el PC portátil, y modifica el estado de programación del integrado seleccionando el desfase deseado en el interfaz.

Para verificar el funcionamiento del interfaz, y comprobar que el desfasador queda programado correctamente, se realiza una simple comparación mediante el osciloscopio especial del HCTlab. Se comprueban las palabras de control que envía el control serie cuando se conecta con la nueva estructura y las que enviaba utilizando el montaje utilizado en la sección 5.4.1.2, verificando que el funcionamiento es el mismo y que las señales de control no varían en función de la estructura implementada.

### 6.3.2.1 Diagramas de radiación. Primer desfasador

A continuación se muestran los resultados de nivel de potencia obtenidos para el primer desfasador (siguiendo la misma nomenclatura utilizada para las pruebas del capítulo anterior), referente a los diagramas de radiación medidos directamente en la cámara anecoica.

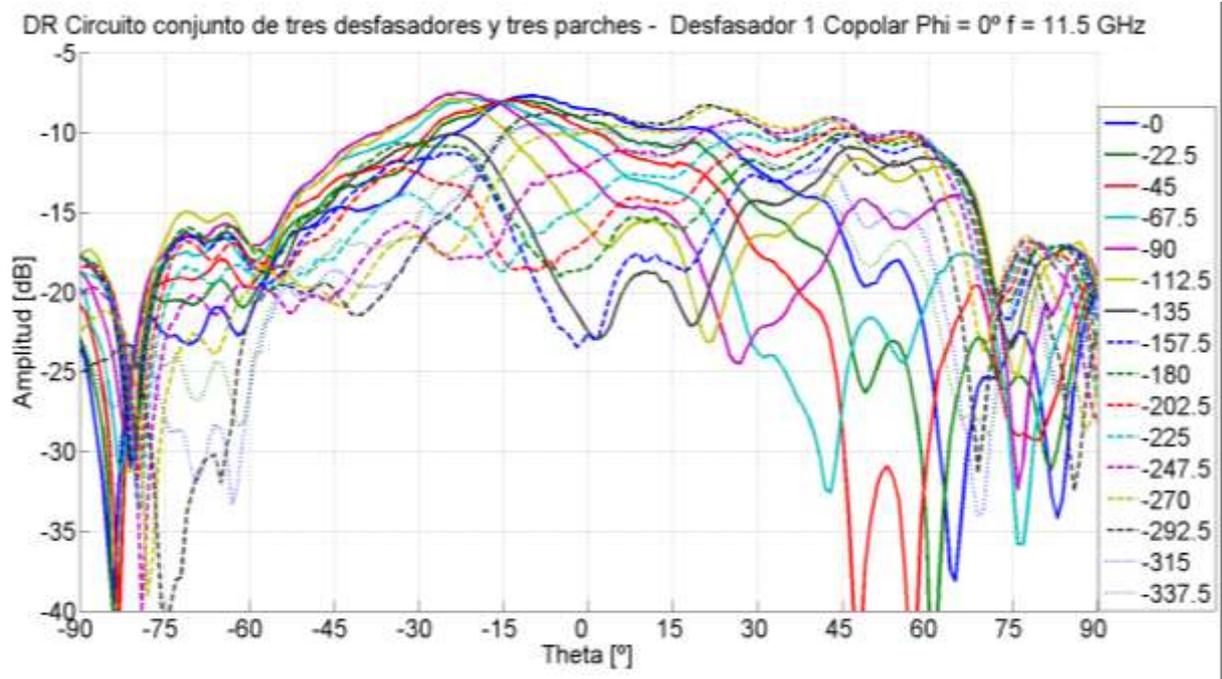


Figura 6.9 Diagramas de radiación. Desfasador 1. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches. Todos los estados

El nivel máximo de potencia es similar al visto en el anterior array, sobrepasando los -10 dB's, solamente en los mejores casos.

En estos resultados destaca la acentuada variabilidad del diagrama de radiación en función del estado. Para cada estado programado en el integrado, se produce una forma totalmente distinta del diagrama de radiación, que parece “desapuntarse” a medida que se aumenta el estado desfase, debido al desplazamiento de los máximos y mínimos relativos del diagrama.

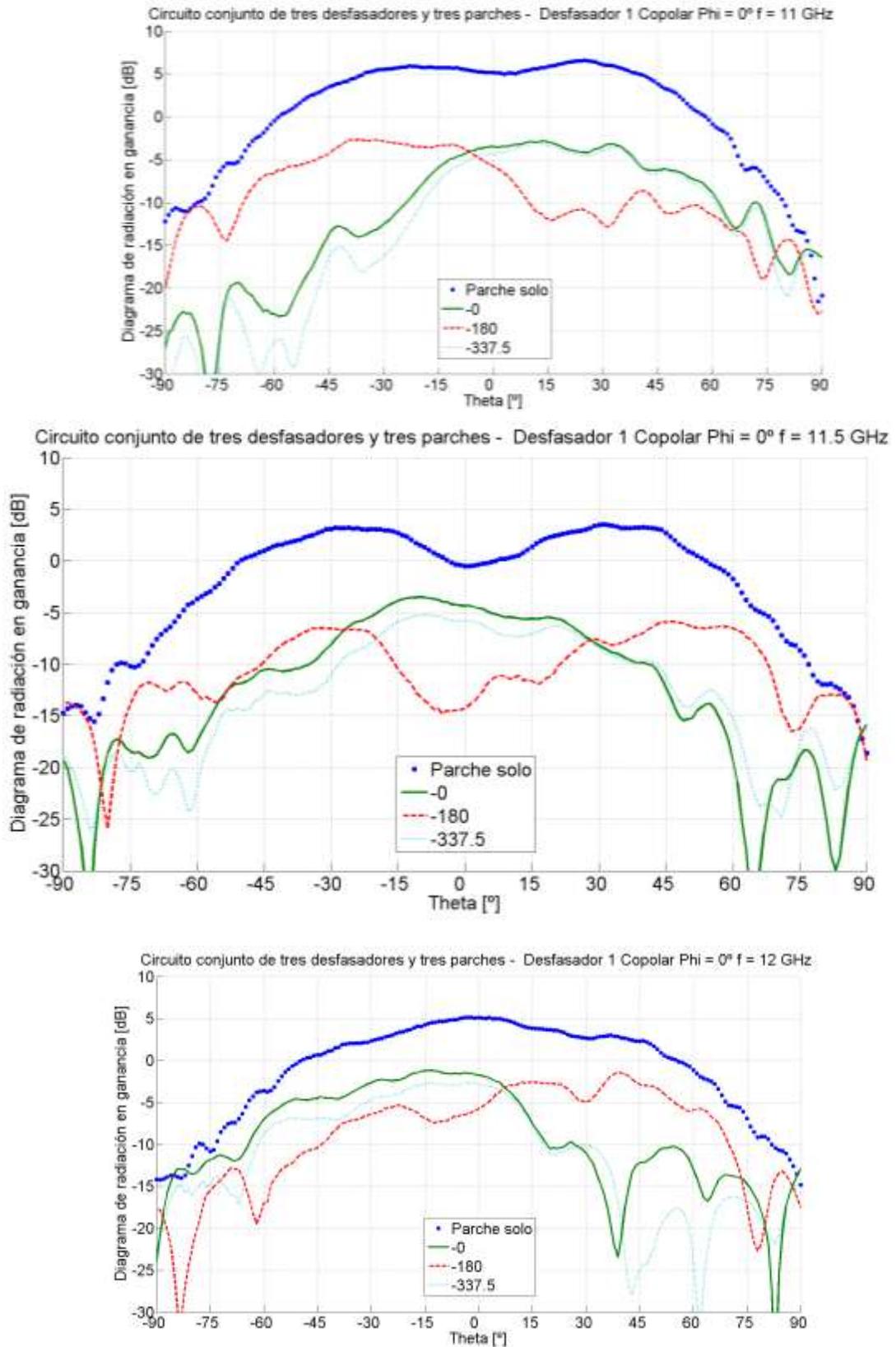


Figura 6.10 Diagramas de radiación. Desfasador 1. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz

En las imágenes previas se puede observar con mayor claridad el efecto comentado anteriormente.

El diagrama de radiación para los estados  $0^\circ$  y  $-337.5^\circ$  parece muy similar, debido a que para el último estado, casi se ha realizado una vuelta completa al proceso de desfase. Si se compara con el diagrama obtenido para el estado  $-180^\circ$ , correspondiente a la activación del bit más significativo de control, el diagrama de radiación ha visto modificada la posición de su lóbulo principal de manera importante, siendo la dirección de apuntamiento totalmente distinta a la inicial.

Este comportamiento es totalmente erróneo, pues si bien en el diseño del capítulo anterior se obtenía un importante rizado en las medidas, en ningún momento encontrábamos una modificación tan impredecible de las características de radiación. A continuación se muestra el comportamiento en fase. Esta información ha sido extraída directamente de la fase de los resultados de campo radiado tomados directamente de la cámara anecoica a las 3 frecuencias críticas

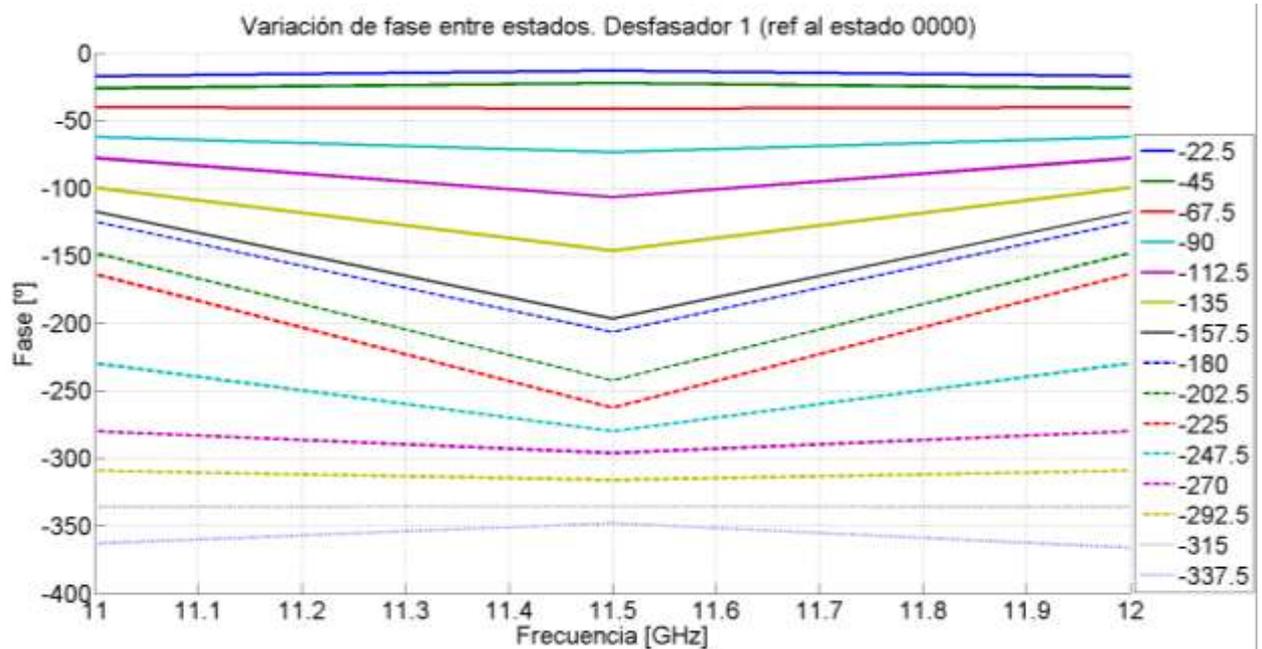


Figura 6.11 Desfase del primer desfaseador. Array conjunto de tres desfaseadores y tres parches

Los efectos de acoplos mutuos observados para las anteriores construcciones no eran tan acentuados; y al contrario que para este caso, se limitaban a una degradación del diagrama de radiación; pero no afectaban considerablemente a la fase proporcionada, que siempre se acercaba a los valores esperados, al contrario que los resultados anteriores.

Este comportamiento podría hacer suponer que el dispositivo no ha sido conexionado de forma adecuada, aunque como se verá más adelante, los errores de funcionamiento se repiten para todos los elementos del array; lo que no refuta esta teoría, pero si la convierte en un suceso menos posible.

### 6.3.2.2 Diagramas de radiación. Segundo desfasador (central)

Siguiendo el mismo procedimiento, ahora se muestran los resultados obtenidos para el segundo desfasador, referente a los diagramas de radiación medidos en la cámara anecoica.

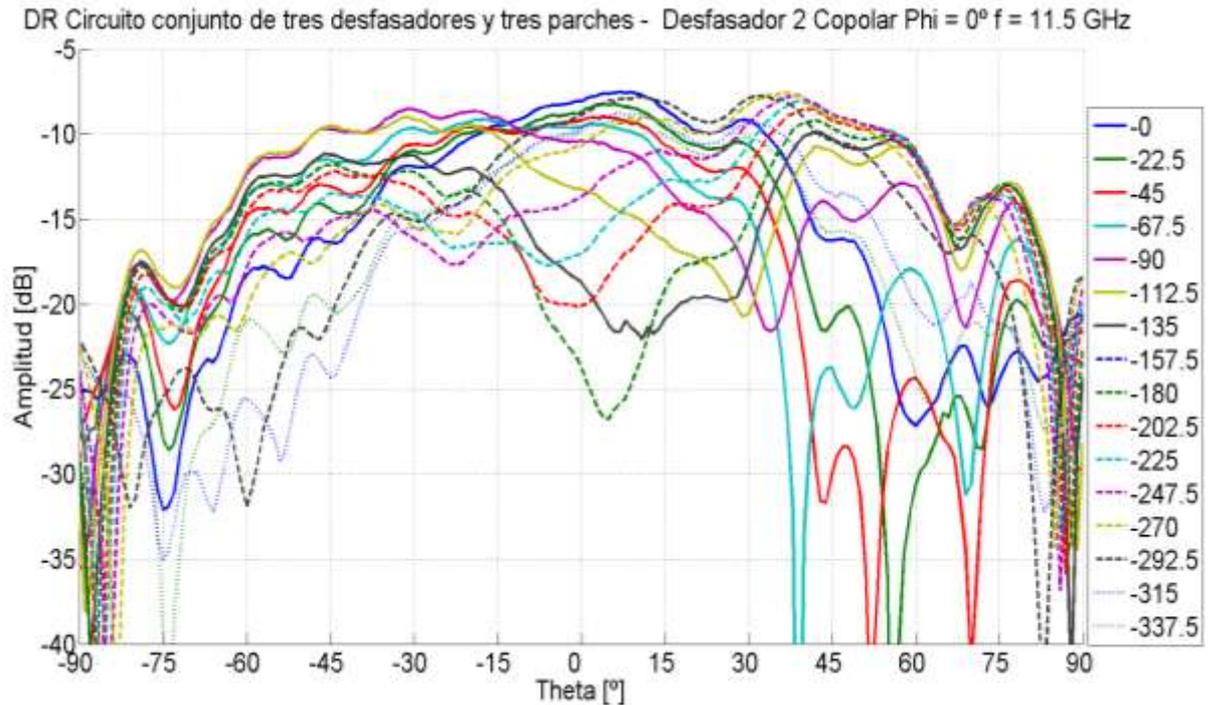


Figura 6.12 Diagramas de radiación. Desfasador 2. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches. Todos los estados

De manera similar a como se producía para el primer integrado del array de tres desfasadores, el nivel de señal máximo se encuentra cercano a los -10 dB's. Al igual que en el primer desfasador, el nivel de los lóbulos secundarios se encuentran muy elevado, y la perturbación que deforma el diagrama de radiación en función del estado se reproduce para este componente de manera similar que para el anterior.

Aunque la deformación del diagrama de radiación es muy parecida a la mostrada para el anterior desfasador, existen diferencias muy sutiles en la forma en la que el estado de fase afecta a cada elemento. El caso más fácil de ver, es que para el segundo desfasador, en la posición de 0° grados del barrido, el estado de desfase que provoca el mínimo relativo es el correspondiente a '-180°' de desfase; mientras que para el integrado anterior, en la misma posición, el mínimo relativo lo ocasionaban los dos estados anteriores, '-157.5°' y '-135°'. Un suceso similar ocurre con la mayoría de estados comparándolos con los resultados del desfasador anterior.

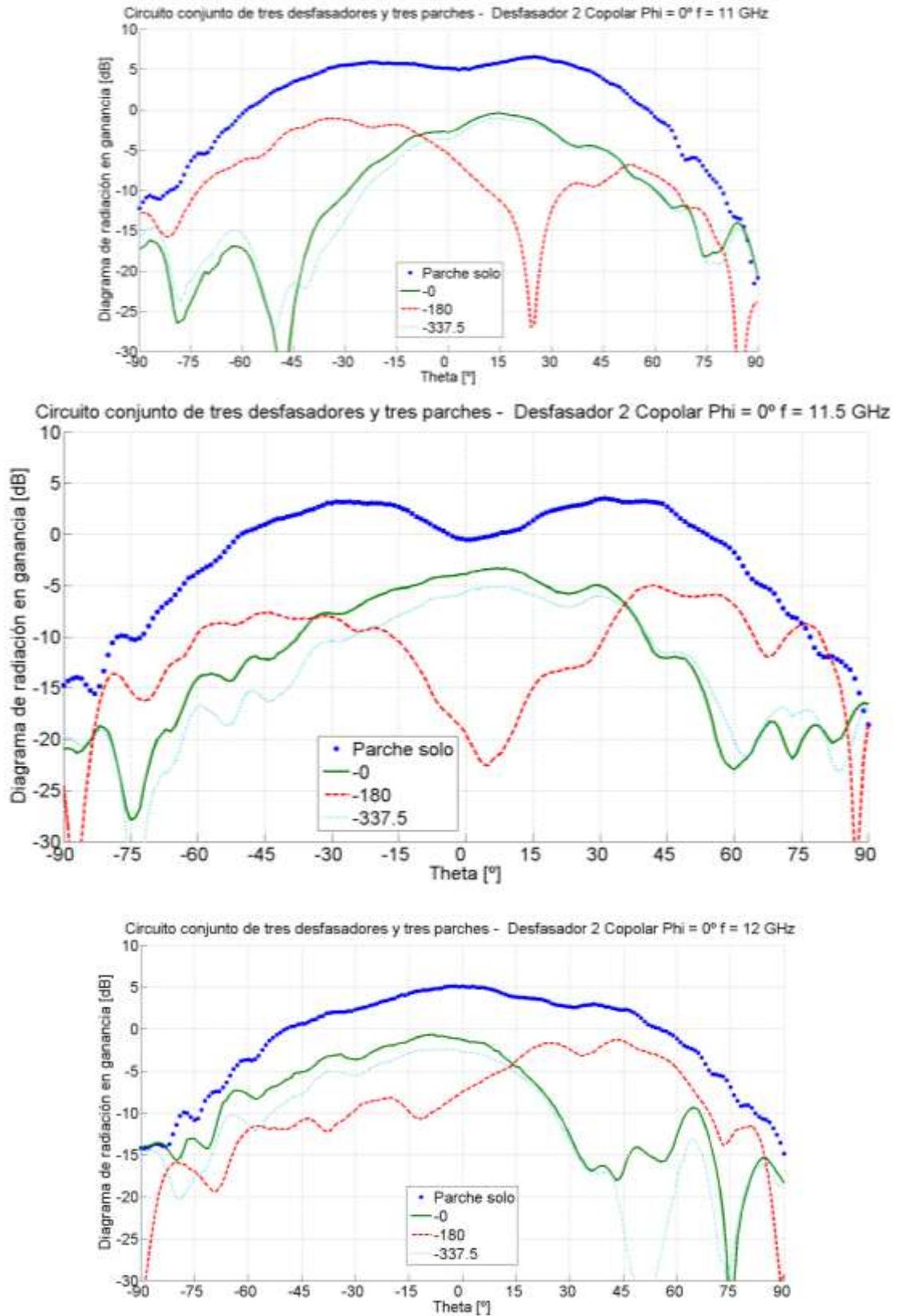


Figura 6.13 Diagramas de radiación. Desfasador 2. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz

Los resultados mostrados con anterioridad denotan un comportamiento muy similar al que ya se comentó para el primer desfasador. Las similitudes entre los diagramas de los estados '0°' y '-337.5°', y la diferencia de "apuntamiento" con el estado '-180°'. Como ya se ha destacado anteriormente, los mínimos relativos que se producen en este caso están mucho más marcados, aunque la posición a la que se producen dentro del grado de barrido de theta es casi la misma.

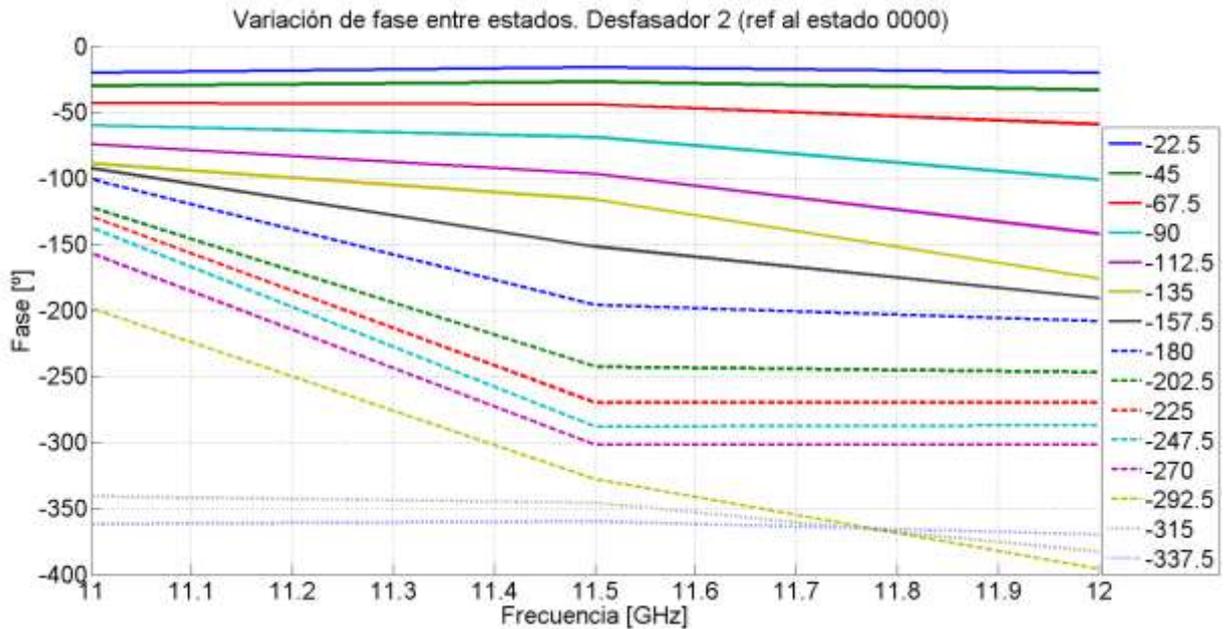


Figura 6.14 Desfase del segundo desfasador. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches.

Nuevamente, los resultados en fase no son nada estables, y existe una marcada diferencia de funcionamiento según la frecuencia de trabajo, sobre todo comparando los resultados a 11 GHz con el resto.

Más adelante se realizaron algunas pruebas desconectando la alimentación de los desfasadores "parásitos", o colocándolos en el mismo estado de desfase que el central. Esto modificaba la reflexión presente en los desfasadores parásitos, lo que altera la señal que puede acoplarse al desfasador principal y hace que la amplitud de los mínimos se reduzca, sin variar considerablemente al desfase conseguido en el desfasador principal. El proceso no se consiguió generalizar para todos los estados, y por tanto los resultados no se consideraron concluyentes.

### 6.3.2.3 Diagramas de radiación. Tercer desfasador

Siguiendo el mismo procedimiento, ahora se muestran los resultados obtenidos para el segundo desfasador, referente a los diagramas de radiación medidos en la cámara anecoica.

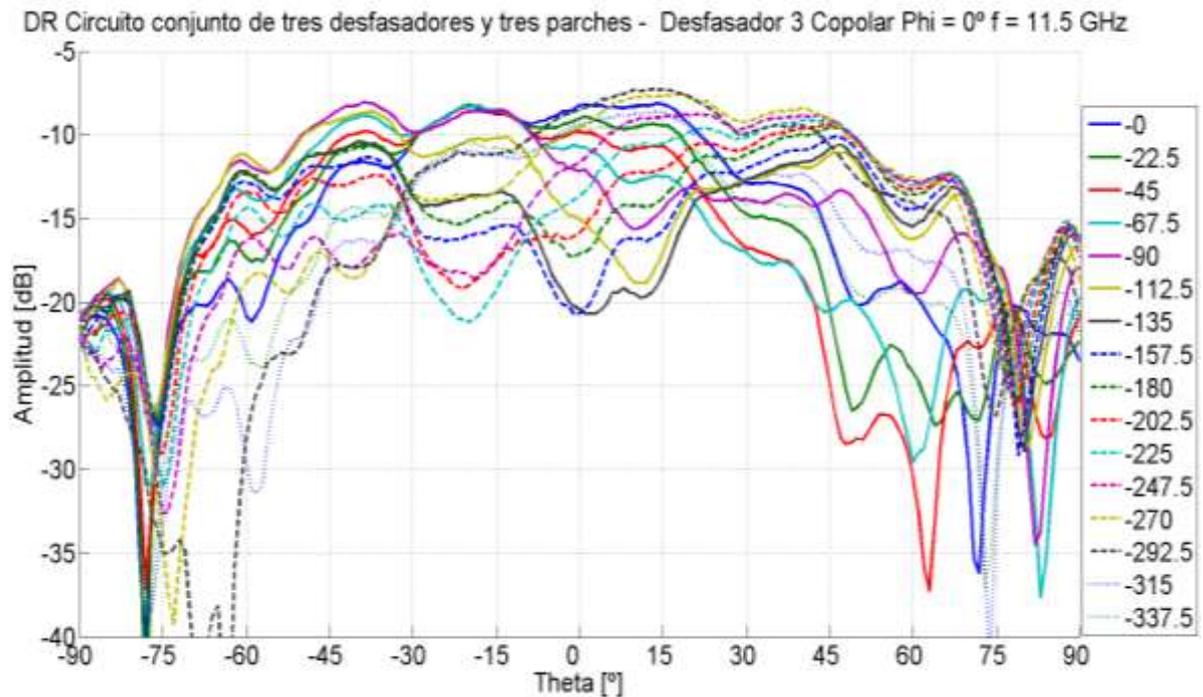


Figura 6.15 Diagramas de radiación. Desfasador 3. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches. Todos los estados

De manera similar a como se producía para el primer integrado del array de tres desfasadores, el nivel de señal máximo se encuentra cercano a los -10 dB's. Se detecta un gran parecido en la tendencia de los resultados que adoptan ambos desfasadores.

Al igual que para los dos integrados anteriores, reaparece la deformación del diagrama de radiación con una alta dependencia del estado de desfase. Como ya se dijo con anterioridad, los resultados para este elemento se asemejan enormemente a los obtenidos con el primer desfasador, pero con las sutiles diferencias comentadas durante el análisis de los resultados del segundo desfasador.

El mínimo relativo generado en los '0° del barrido, vuelve a deberse a los estados '-135°' y '-157.5°' como ya ocurría en el primer componente; lo que confirma que las diferencias encontradas con el segundo desfasador, se deben a la situación en los extremos de los desfasadores primero y segundo.

La similitud de comportamiento entre los desfasadores primero y tercero queda probado por las gráficas presentadas a continuación, en las cuales pueden apreciarse unos resultados muy similares a los del primer elemento, con los máximos y mínimos posicionados de manera muy similar y con valores parecidos.

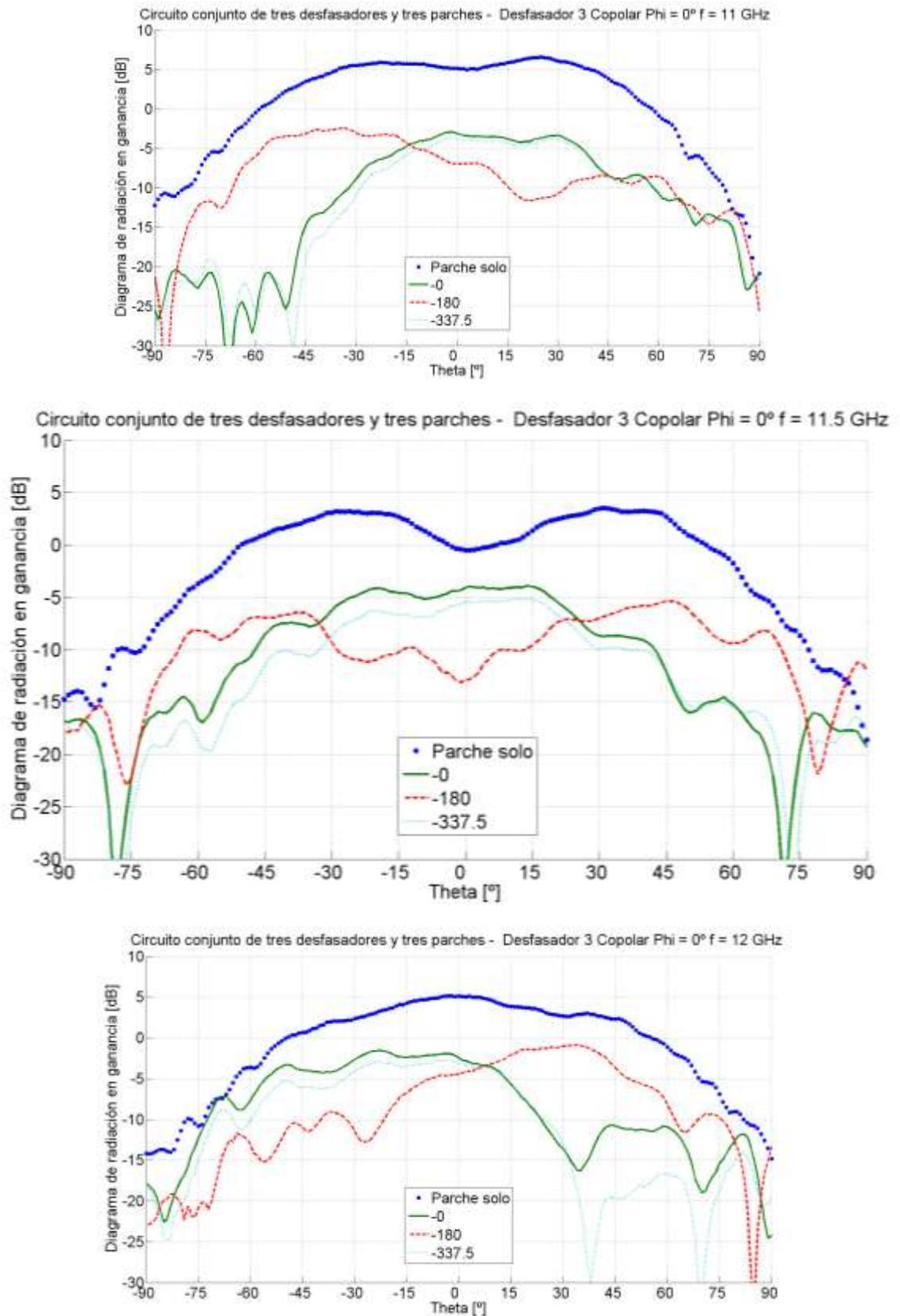


Figura 6.16 Diagramas de radiación. Desfasador 3. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches. 3 estados a 11, 11.5 y 12 GHz

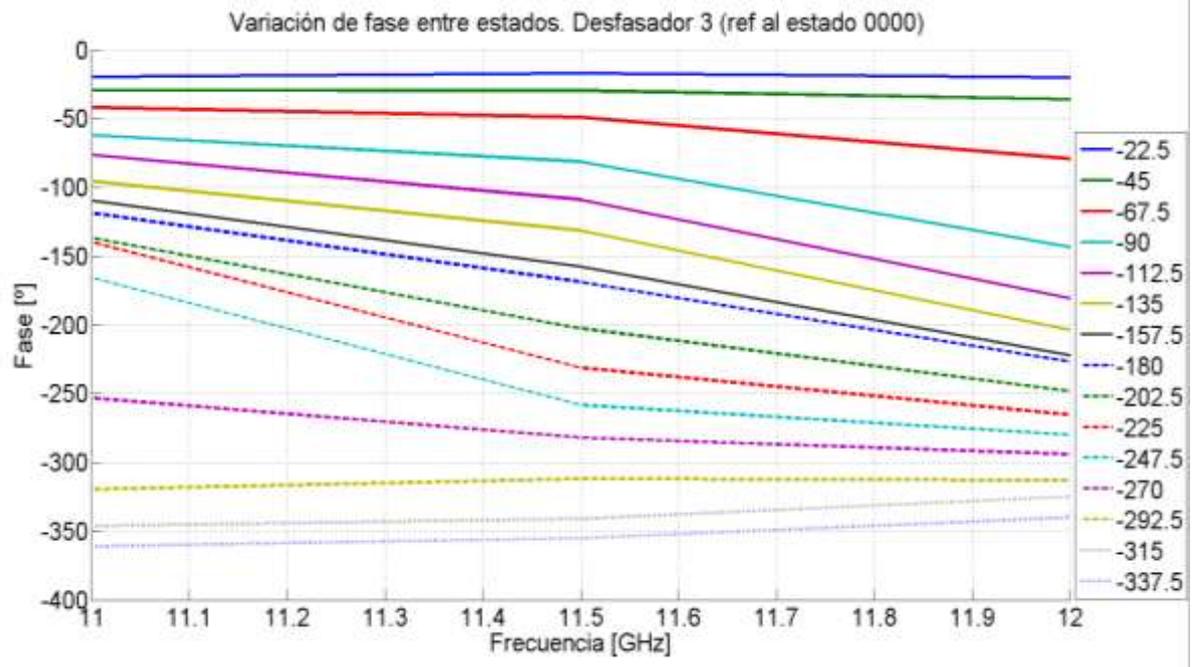


Figura 6.17 Desfase del tercer desfasador. Array conjunto de tres desfasadores y tres parches.

Al contrario que lo observado para la forma de los diagramas de radiación, ateniéndose únicamente a la tendencia que parecen tener los distintos estados de desfase, el desfasador número tres tiene similitudes notables con el desfasador central, dado que los errores que se comenten para la fase de cada estado en función de la frecuencia, una vez representados, se asemejan a los vistos para el segundo desfasador.

Esta afirmación debe tratarse con cuidado, dado que la similitud de la que se hace eco, puede deberse a la baja resolución espectral con la que se han representado los resultados, y podría no ser cierta si se aumentara el número de muestras en frecuencia para obtener los diagramas de radiación.

#### 6.3.2.4 Reflexión de la estructura desfasador - parche

Para finalizar con la caracterización realizada al diseño de la red de alimentación con tres desfasadores y tres parches integrados se mide la reflexión que presenta cada pareja desfasador + parche en su único puerto disponible.

Por simplicidad, solo se muestran los resultados en algunos estados críticos y los mismos que para el desfasador de evaluación, de cara a facilitar su comparativa

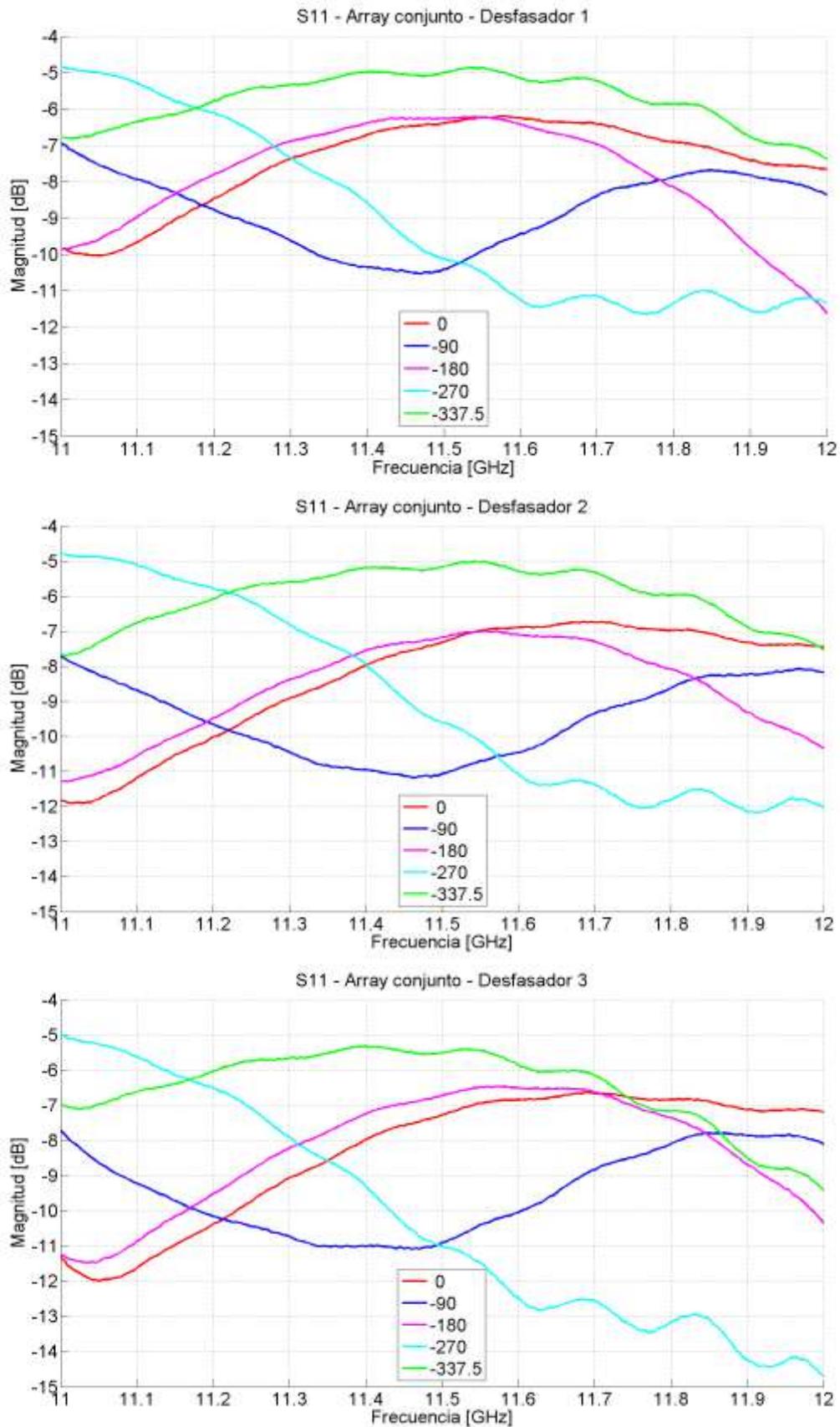


Figura 6.18 Parámetros  $S_{11}$  (reflexión) para los tres desfasadores del array conjunto de tres desfasadores y tres parches

Como ocurría para las anteriores estructuras, se obtiene una reflexión distinta para cada estado de desfase que se programe en el integrado y, en este caso, las diferentes son ligeramente más acuciadas. Los resultados son muy similares para los tres desfasadores.

En esta estructura se aprecia un descenso de la adaptación bastante más destacado que para la estructura interconexiónada del capítulo anterior, y los rangos de adaptación no coinciden con los observados en el circuito de evaluación. Esto se debe a la necesidad de disponer de todos los componentes en el mismo sustrato debido al objetivo de integración.

## 6.4 *Conclusión*

Las conclusiones que se pueden extraer de los resultados de las secciones anteriores no están probadas completamente, y más bien plantean algunas hipótesis sobre el funcionamiento de la estructura.

Debido a la alta reflexión que presentan los desfasadores en su puerto de entrada, se piensa en la posibilidad de que la señal de radiofrecuencia que incide en los desfasadores parásitos se desfase ligeramente debido al trayecto seguido y al efecto del integrado y se acople al desfasador que está siendo medido debido a la cercanía de las líneas de alimentación microstrip, o de los parches.

En el diseño implementado, todos los elementos están situados en la misma placa de sustrato, esto puede estar provocando algunos comportamientos cruzados indeseables. Ya se había comprobado que existía cierto efecto de acoplo entre los parches de la estructura del capítulo anterior, pero se considera que para el caso del diseño actual también se produce un considerable acoplo de las líneas de alimentación del propio desfasador, con su elemento radiante correspondiente.

La estructura llevada a cabo permite un alto grado de integración, a costa de que los elementos radiantes compartan una masa común con el desfasador y la electrónica de control.

Aunque este tipo de montaje ya se realizó para el circuito de evaluación, en aquel diseño, se disponía de un chasis metálico que recubría casi completamente la placa, y que podía estar aislando los efectos adversos descritos.

Teniendo en cuenta estos posibles sucesos, se concluye que la única forma de promover un correcto funcionamiento de los elementos radiantes, y poder probar su funcionamiento: sería idear una estructura en la cual los desfasadores y las líneas de alimentación en microstrip estuvieran totalmente aisladas de los parches y de otros desfasadores, y a su vez, también se separara de la presencia de las líneas de control en corriente continua.



## 7 Barrido electrónico

### 7.1 Introducción

El objetivo final de este PFC es lograr un barrido electrónico del diagrama de radiación de un conjunto de parches, mediante la modificación de la fase de alimentación de cada uno de ellos.

A continuación se detallan las investigaciones realizadas en relación al tema de la modificación del haz de apuntamiento principal, tanto las pruebas o estimaciones teórico-prácticas, como las medidas realizadas para probar estas estimaciones.

### 7.2 Estimación del campo radiado

Con el objetivo de completar lo expuesto en el estado del arte acerca de los arrays, se sabe que el diagrama de radiación de la antena se ve afectado casi en su mayoría por la distancia entre elementos que la conforman.

Para una cantidad fija de elementos, cuanto menor sea la distancia entre elementos, mayor será el ancho de haz y, como consecuencia, menor será la directividad. Por lo tanto, si se quiere obtener una mayor directividad es preciso separar los elementos todo lo posible. La razón por la cual este método no es del todo recomendable es que al separar demasiado los elementos suele aparecer lóbulos de difracción idénticos al principal (también denominados "*grating lobes*") en posiciones distintas al ángulo de apuntamiento deseado.

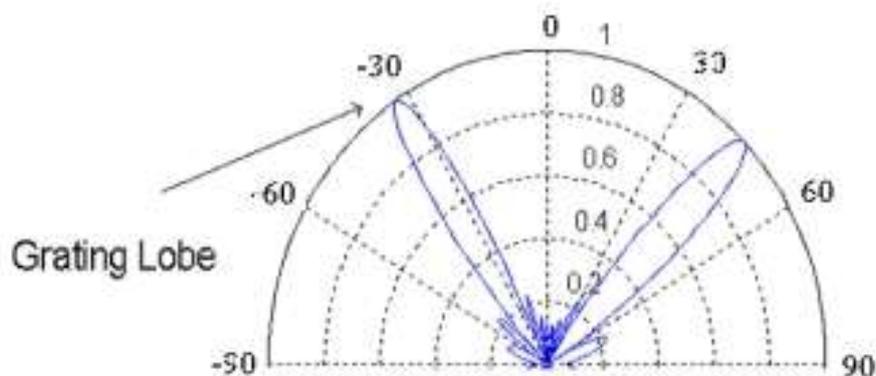


Figura 7.1 Ejemplo de diagrama de radiación con la aparición de grating lobes. Imagen extraída de "Computational Electromagnetics and Antennas Research Laboratory"

Para evitar estos problemas, se debe escoger una distancia entre elementos que permita obtener un ancho de haz lo más estrecho posible, pero garantizando la mínima aparición de “*grating lobes*” y reduciendo la amplitud de los lóbulos secundarios. Este estudio se llevó a cabo mediante el software de simulación “Ensemble 1D Array Synthesis” por el proyecto predecesor de Sergio Casas, en el cual se concluyó que la mejor distancia de diseño entre los elementos del array debía ser de 18.5 mm. Esta distancia entre elementos es la que se lleva utilizando durante toda la realización de este PFC.

$$\Delta\theta_{3dB's}[rad] = 0.886 * \frac{\lambda}{N*d} \quad : \text{Fórmula 7.1}$$

Mediante la fórmula anterior se puede obtener, de manera teórica, el ancho del haz de radiación cuando la potencia ha disminuido 3 dB's del máximo. Siendo “N\*d” la distancia acumulada entre los distintos elementos del array.

Utilizando un array de tres elementos, como los construidos con anterioridad, se obtiene un resultado de  $\Delta\theta_{3dB's}^{3\text{ elementos}} = 23.86^\circ$ , es decir, un array para nada directivo, pero que podría permitir probar las características de desfase para apuntamiento dinámico. Por el contrario, si se utiliza un número de elementos como el previsto para el array final de dieciséis, se obtiene  $\Delta\theta_{3dB's}^{3\text{ elementos}} = 4.47^\circ$ , un valor bastante más directivo y, seguramente, plenamente configurable mediante la modificación de fase.

### 7.2.1 Estimación para array de tres elementos

Aunque las pruebas realizadas en la cámara anecoica solo han permitido obtener resultados para un único elemento del array, e imposibilitaban las pruebas conjuntas de la estructura radiante, los ficheros de datos obtenidos para los elementos individuales pueden combinarse matemáticamente para aproximar el funcionamiento del array completo.

Particularizando la fórmula 2.28 para un array lineal en el plano X y haciendo  $\phi=0$  se pueden sumar las contribuciones en fase y amplitud extraídas de los ficheros .dat, medidos en la cámara anecoica.

$$F_A(\varphi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n * e^{jn\varphi} \quad : \text{Fórmula 7.2}$$

$$\text{donde } \varphi = k_0 d \sin\theta + \alpha \quad : \text{Fórmula 7.3}$$

Igualando a ‘0’ directamente sobre la fórmula 7.3, se puede despejar una expresión teórica para obtener el máximo ángulo de apuntamiento en función de la fase progresiva programada en el array.

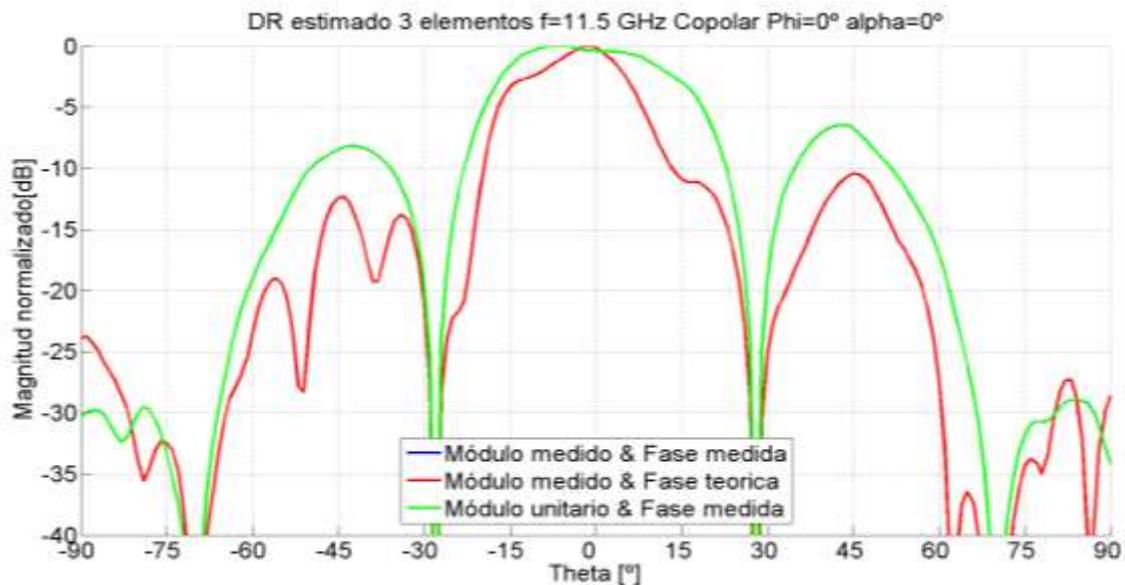
$$\varphi = k_0 d \sin\theta + \alpha \Rightarrow \theta_{max} = \sin^{-1}\left(\frac{-\alpha}{k_0 d}\right) \quad : \text{Fórmula 7.4}$$

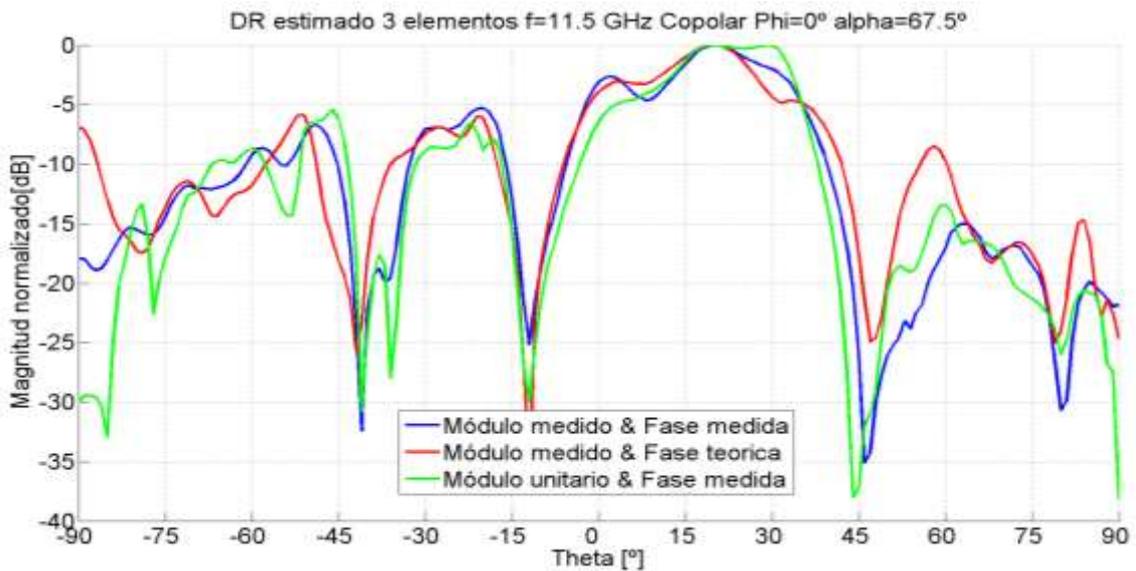
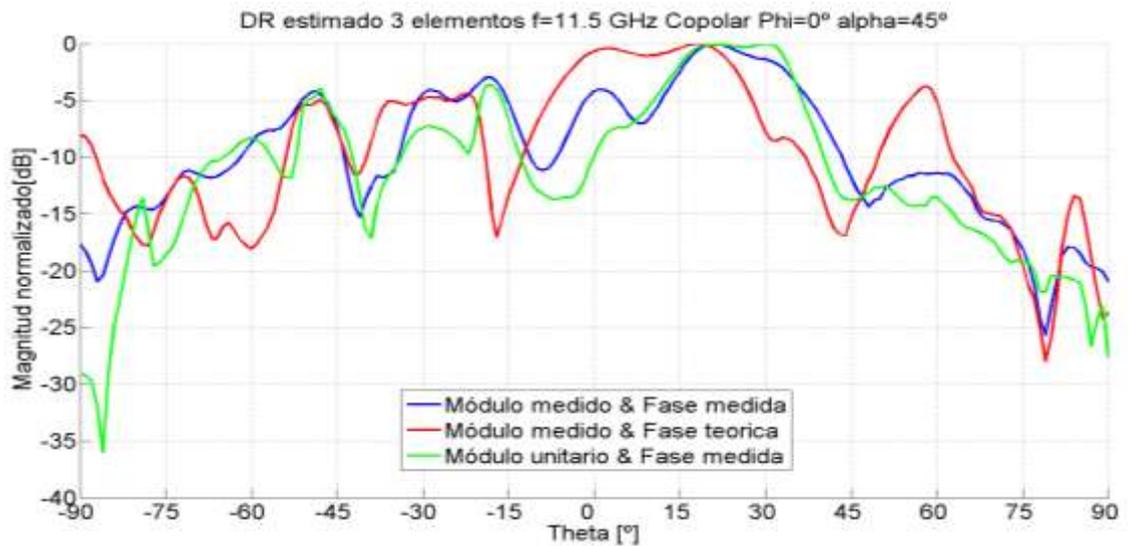
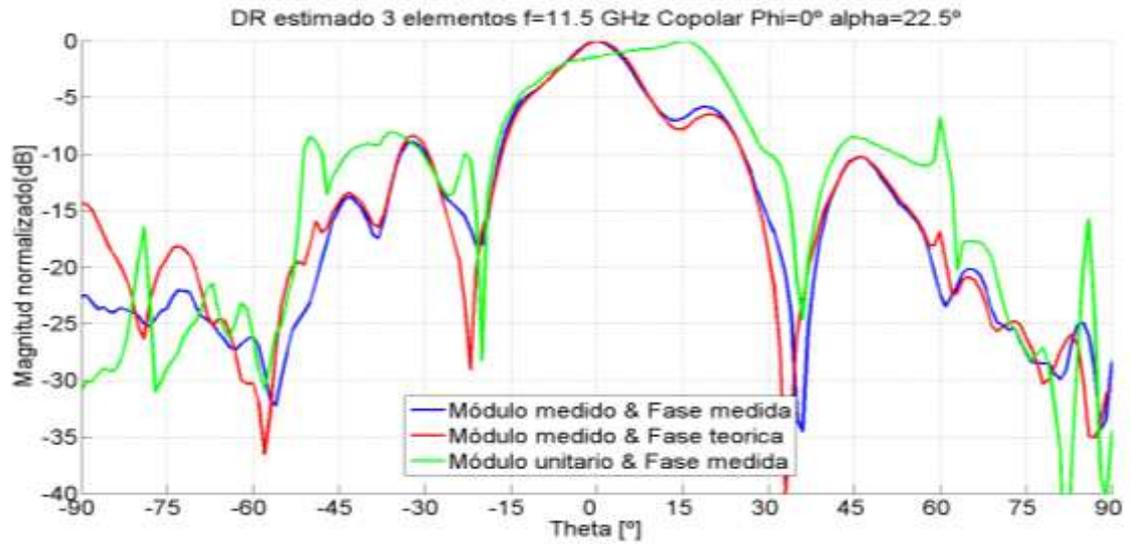
Utilizando la fórmula anterior, se pueden obtener los valores de apuntamiento máximo teóricos, en función de la fase progresiva utilizada. Estos cálculos se encuentran recogidos en la tabla siguiente.

Fase progresiva ( $\alpha$ )	Fase del desfasador 1	Fase del desfasador 2	Fase del desfasador 3	Angulo máximo de apuntamiento ( $\theta_{max}$ )
0°	0°	0°	0°	0°
22.5°	0°	22.5°	45°	5°
45°	0°	45°	90°	10°
67.5°	0°	67.5°	135°	15°
90°	0°	90°	180°	20°

Tabla 7—I Fases progresivas y ángulo de apuntamiento teórico en array de tres elementos

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la estimación matemática. En cada una de las figuras se muestran tres tipos de resultados distintos: una curva obtenida mediante la combinación de los ficheros .dat de la cámara anecoica, utilizando el módulo y la fase extraída de dichos ficheros (curva azul); otra curva donde únicamente se utiliza el módulo extraído de los ficheros, y se complementa con el desfase teórico que deberían introducir los desfasadores (curva roja); y una última representación, en la cual se utiliza el módulo unitario de un único parche sin incluir desfasador, y la fase obtenida de los ficheros medidos en la cámara (curva verde).





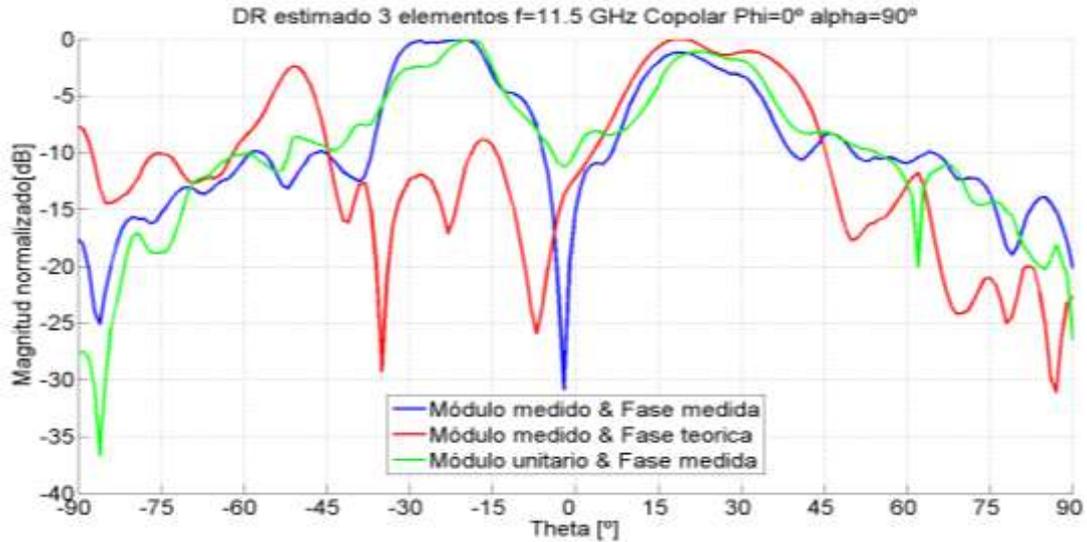


Figura 7.2 Diagramas de radiación de apuntamiento estimado. Apuntamiento de  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  y  $20^\circ$  respectivamente

Para la combinación de resultados mostrada en las gráficas anteriores, se han utilizado **los ficheros de medidas obtenidos durante la sección 5.4.3 del capítulo referente al array de tres desfasadores y tres parches independientes**, debido a que son los mejores resultados obtenidos para los elementos independientes del array.

En las figuras anteriores se puede observar los diversos efectos que tiene utilizar los resultados medidos en la cámara anecoica.

Las deformaciones que se generan, en función del estado, en el módulo de los diagramas de radiación; así como las imprecisiones de desfase, que no son estables en todo el rango de barrido en theta; modifican de manera relevante el diagrama de radiación final del array.

Es difícil extraer conclusiones generales de los efectos que provocan la “no idealidad” del módulo y la fase, debido a que para cada desfase progresivo, los efectos son ligeramente distintos. Aun así, en las gráficas en las que se emplea el módulo medido y la fase teórica parece observarse mayores deformaciones que en el resto, indicando así que el desfase afectaría considerablemente a la forma del diagrama.

Debido a los errores de fase, y a la deformación que se produce en los diagramas de radiación para cada estado programado en los desfasadores, es lógico pensar que los estados que se utilicen para programar el desfase progresivo influirán de forma significativa en el resultado final.

Para comprobar este comportamiento se han realizado dos pruebas distintas: colocar los tres desfasadores al mismo estado, consiguiendo una ausencia de desfase progresivo, y programando un comportamiento en módulo y fase muy parecido para los tres elementos del array; posteriormente, programar un desfase progresivo de  $\alpha=22.5^\circ$  con

configuraciones de estados diferentes, cada cual con sus características de módulo y fase propias.

Para generar una ausencia de desfase progresivo, simplemente se debe programar el mismo estado en los tres desfasadores, pero para obtener una fase progresiva de  $\alpha=22.5^\circ$  en los tres elementos del array, teóricamente, se pueden utilizar cualquiera de las configuraciones mostradas en la tabla.

<i>Fase progresiva (<math>\alpha</math>)</i>	<i>Fase del desfasador 1 (Fase/estado)</i>	<i>Fase del desfasador 2 (Fase/estado)</i>	<i>Fase del desfasador 3 (Fase/estado)</i>	<i>Angulo máximo de apuntamiento (<math>\theta_{max}</math>)</i>
22.5°	0° / E <sub>0</sub>	22.5° / E <sub>1</sub>	45° / E <sub>2</sub>	5°
22.5°	45° / E <sub>2</sub>	67.5° / E <sub>3</sub>	90° / E <sub>4</sub>	5°
22.5°	90° / E <sub>4</sub>	112.5° / E <sub>5</sub>	135° / E <sub>6</sub>	5°

Tabla 7—II Configuración de estados para un fase progresiva de 22.5° en array de 3 elementos

Como se puede comprobar por las figuras siguientes, para  $\alpha=0^\circ$  no existe apenas diferencias entre las configuraciones, dado que al programar el mismo estado en los tres desfasadores, no se producen diferencias significativas de módulo y fase; por otro lado, los resultados para  $\alpha=22.5^\circ$  presentan una alta variabilidad en función de la configuración debido a las diferencias de módulo y fase que presentan los estados programados para cada configuración.

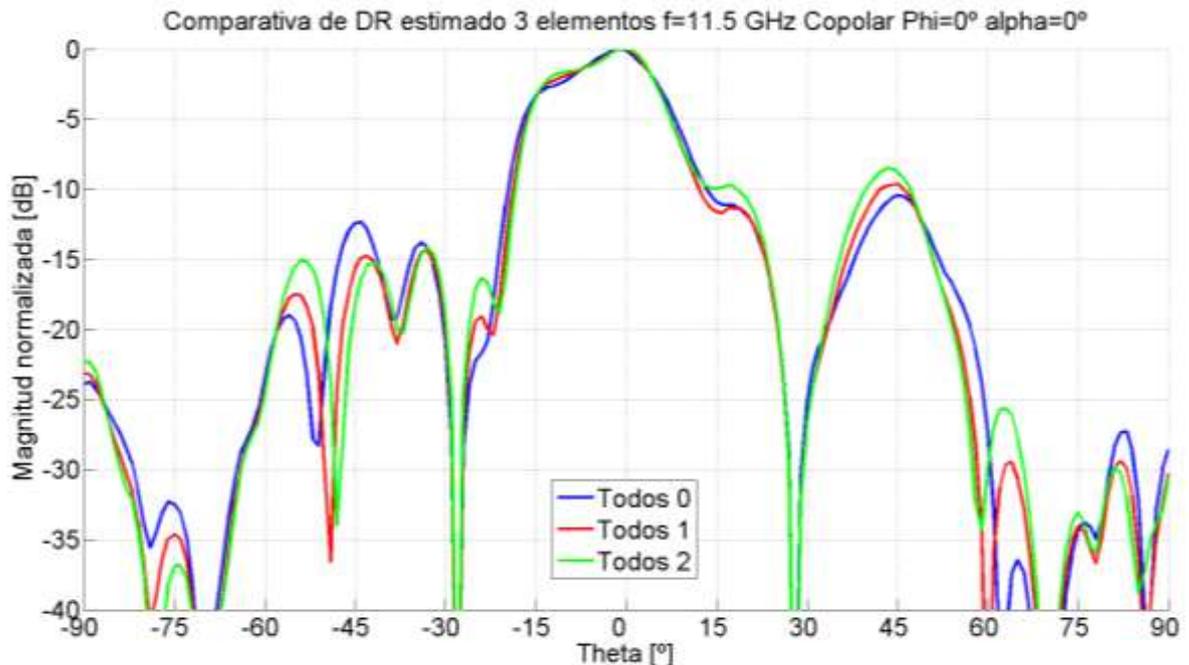


Figura 7.3 Comparativa de configuraciones de estados para una ausencia de desfase progresivo (apuntamiento de 5°) en array de tres elementos

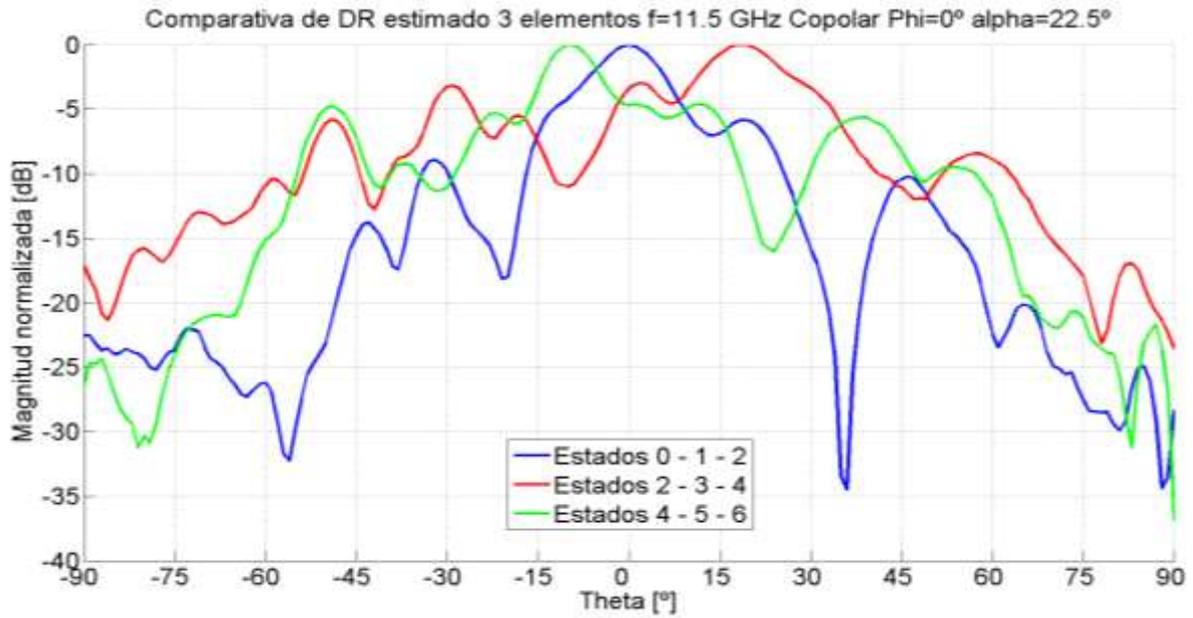


Figura 7.4 Comparativa de configuraciones de estados para desfase progresivo de  $22.5^\circ$  (apuntamiento de  $5^\circ$ ) en array de tres elementos

Se concluye que el grado de apuntamiento del haz de radiación depende íntimamente de la configuración de estados utilizada para un array de tres elementos.

Por último, para poder comprobar el desapuntamiento que debería producirse en el diagrama de radiación se muestran conjuntamente los diagramas con los desfases mostrados en la *Tabla 7—I Fases progresivas y ángulo de apuntamiento teórico en array de tres elementos*”, donde se vuelven a apreciar los efectos antes comentados.

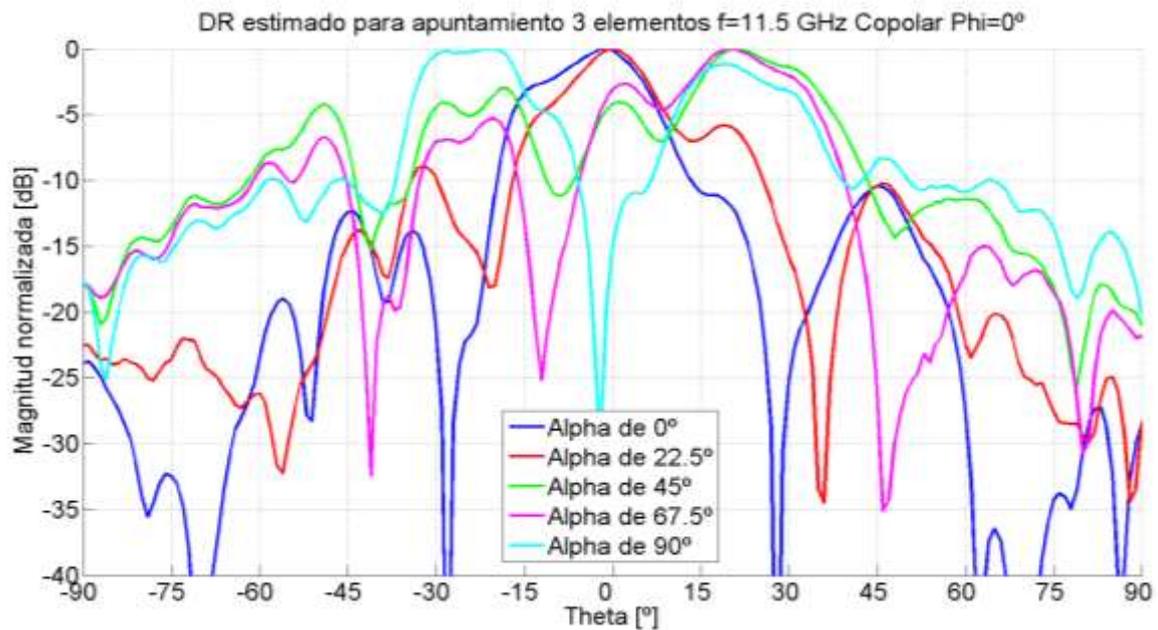


Figura 7.5 Apuntamiento estimado para array de tres elementos

### 7.2.2 Estimación para array de dieciséis elementos

Al igual que para el array de tres elementos de la sección anterior, mediante las fórmulas 7.2 y 7.3, y los ficheros .dat extraídos de las medidas en la cámara anecoica, se puede estimar el comportamiento de un array de dimensiones mayores.

Las aproximaciones que se van a realizar para un array compuesto por dieciséis elementos pueden ser de vital interés de cara a la implementación física de la estructura que se piensa conexasión con la red de alimentación en guía de onda diseñada y construida en el PFC de Sergio Casas.

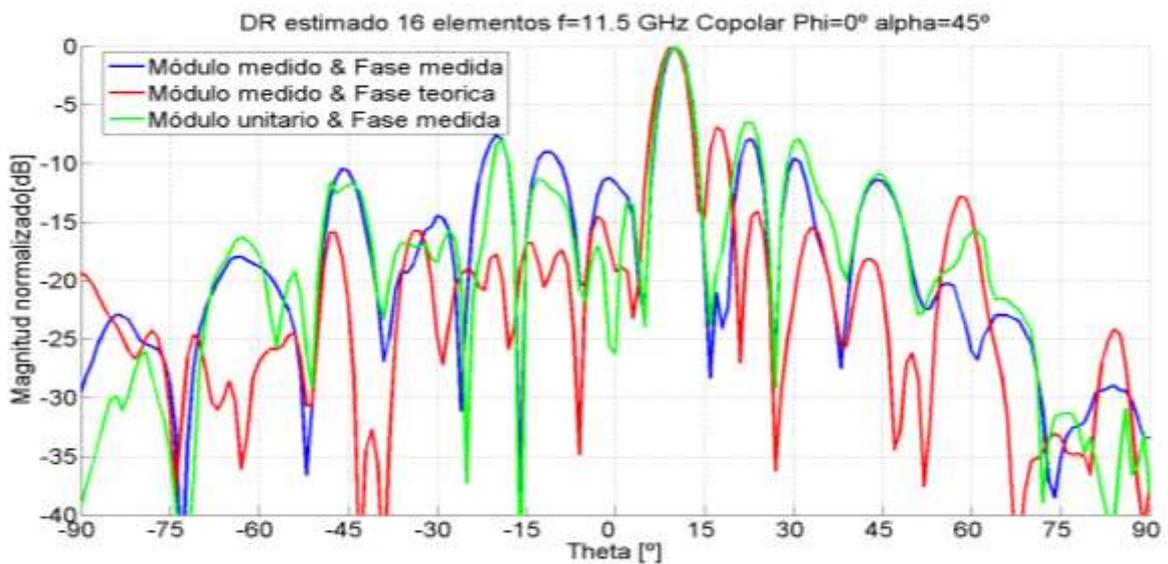
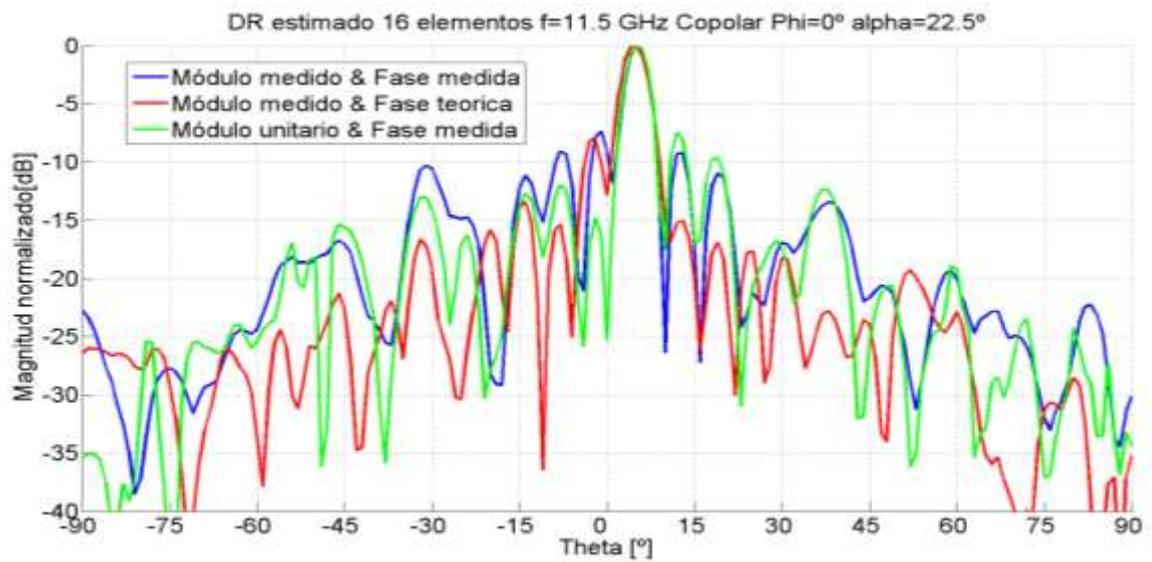
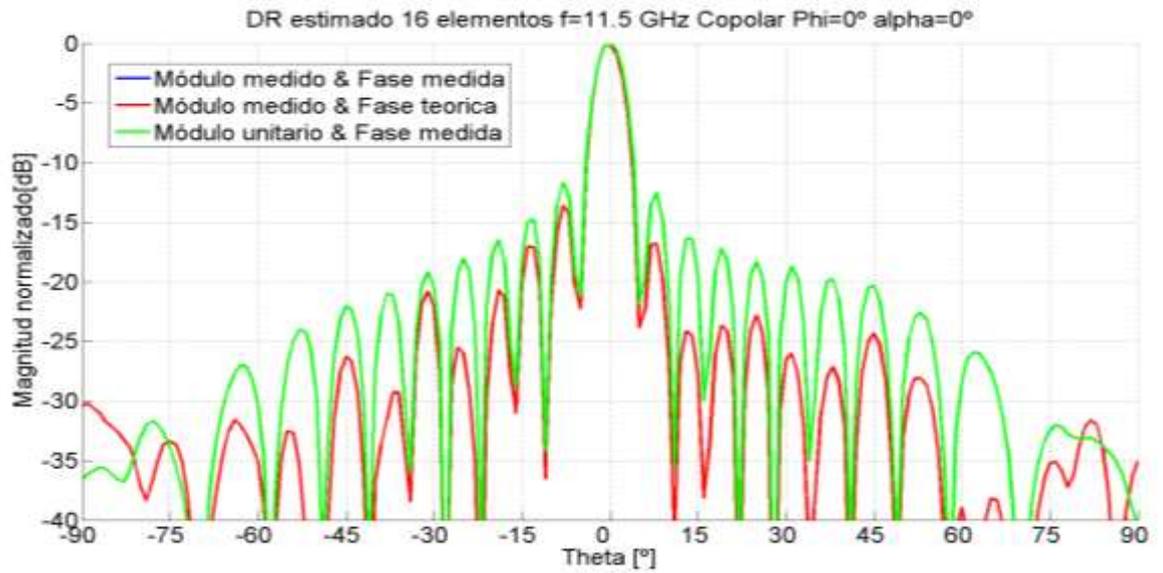
Siguiendo las mismas deducciones realizadas en la sección anterior, se obtiene el apuntamiento teórico del array de dieciséis elementos, en función de la fase progresiva programada en cada elemento, utilizando la fórmula 7.4, y recogiendo los resultados en la siguiente tabla, muy parecida a la descrita en la sección anterior.

<i>Fase progresiva (<math>\alpha</math>)</i>	<i>Fase del desfasador 1</i>	<i>Fase del desfasador 2</i>	<i>Fase del desfasador N</i>	<i>Angulo máximo de apuntamiento (<math>\theta_{max}</math>)</i>
0°	0°	0°	0°	0°
22.5°	0°	22.5°	(N-1)*22.5 [°]	5°
45°	0°	45°	(N-1)*45 [°]	10°
67.5°	0°	67.5°	(N-1)*67.5 [°]	15°
90°	0°	90°	(N-1)*90 [°]	20°

Tabla 7—III Fases progresivas y ángulo de apuntamiento teórico en array de dieciséis elementos

Continuando con la misma estructura reflejada en la sección previa, y de cara a facilitar la comparativa de resultados entre ambas, a continuación se presentan los resultados obtenidos de la estimación matemática del diagrama de radiación para un array de dieciséis elementos. En las siguientes figuras se ha seguido la misma nomenclatura en cuanto a la representación de los datos.

En las imágenes siguientes se puede comprobar como todos casi todos los efectos negativos, derivados de las imperfecciones del módulo y la fase medidos, se minimizan al aumentar el número de elementos de array. Esto es debido a que cuanto mayor es el número de elementos más rápido varía angularmente el factor de array y, por lo tanto, el diagrama del elemento afecta mucho menos. Por lo tanto, el diagrama de radiación es más similar al factor de array.



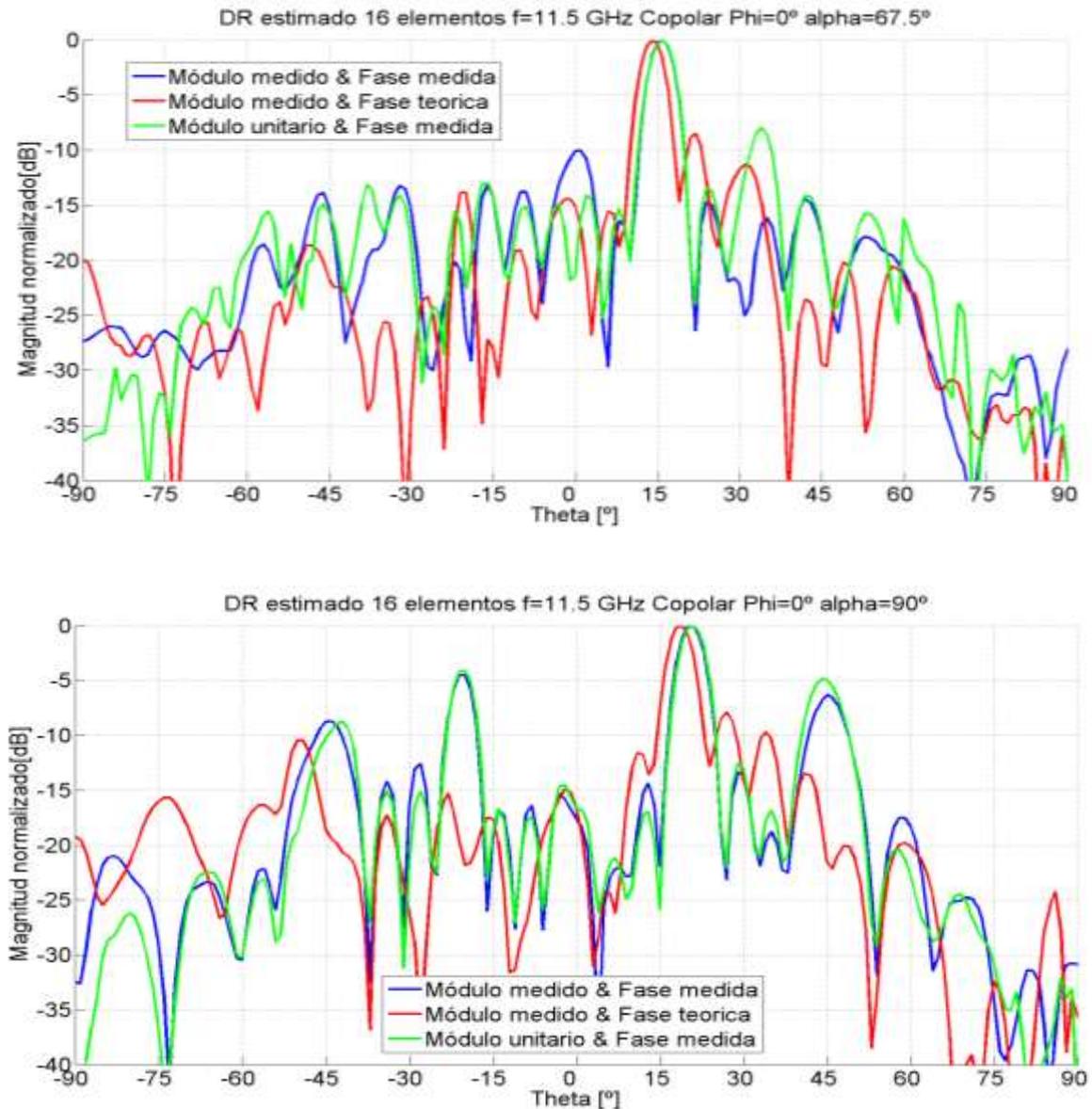


Figura 7.6 Diagramas de radiación de apuntamiento estimado en array de 16 elementos. Apuntamiento de  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  y  $20^\circ$  respectivamente

Aunque en las imágenes anteriores se puede apreciar un ancho del haz de radiación de unos  $4^\circ$ , como el descrito mediante la fórmula teórica 7.1, con un apuntamiento casi idéntico al obtenido en la tabla de apuntamientos dinámicos anterior (se reconoce un error máximo de  $1^\circ$ ), el nivel de los lóbulos secundarios es preocupantemente alto, teniendo una SLL en toda la banda de poco más de  $-5$  dB's, pero sin todavía producirse lóbulos idénticos de difracción.

Aunque la reducción de lóbulos secundarios y minimizar la aparición de “*grating lobes*”, no son características que se puedan modificar mediante la configuración de la fase.

Otro efecto ventajoso de aumentar el número de elementos del sistema es que no se produce la variabilidad tan marcada que tenía el array de tres desfasadores en función de la configuración utilizada para programar el desfase progresivo.

Para generar una ausencia de desfase progresivo, simplemente se debe programar el mismo estado en los tres desfasadores, para obtener una fase progresiva de  $\alpha=22.5^\circ$  en los dieciséis elementos del array, teóricamente, se pueden utilizar cualquiera de las configuraciones mostradas en la tabla. Que no son más que una continuación de las utilizadas para el array de tres desfasadores.

Fase progresiva a ( $\alpha$ )	Fase del desfasador 1 (Fase/estado)	Fase del desfasador 8 (Fase/estado)	Fase del desfasador 16 (Fase/estado)	Angulo máximo de apuntamiento ( $\theta_{max}$ )
$22.5^\circ$	$0^\circ / E_0$	$157.5^\circ / E_7$	$337.5^\circ / E_{15}$	$5^\circ$
$22.5^\circ$	$45^\circ / E_2$	$202.5^\circ / E_9$	$22.5^\circ / E_1$	$5^\circ$
$22.5^\circ$	$90^\circ / E_4$	$247.5^\circ / E_{11}$	$67.5^\circ / E_3$	$5^\circ$

Tabla 7—IV Configuración de estados para un fase progresiva de  $22.5^\circ$  en array de 16 elementos

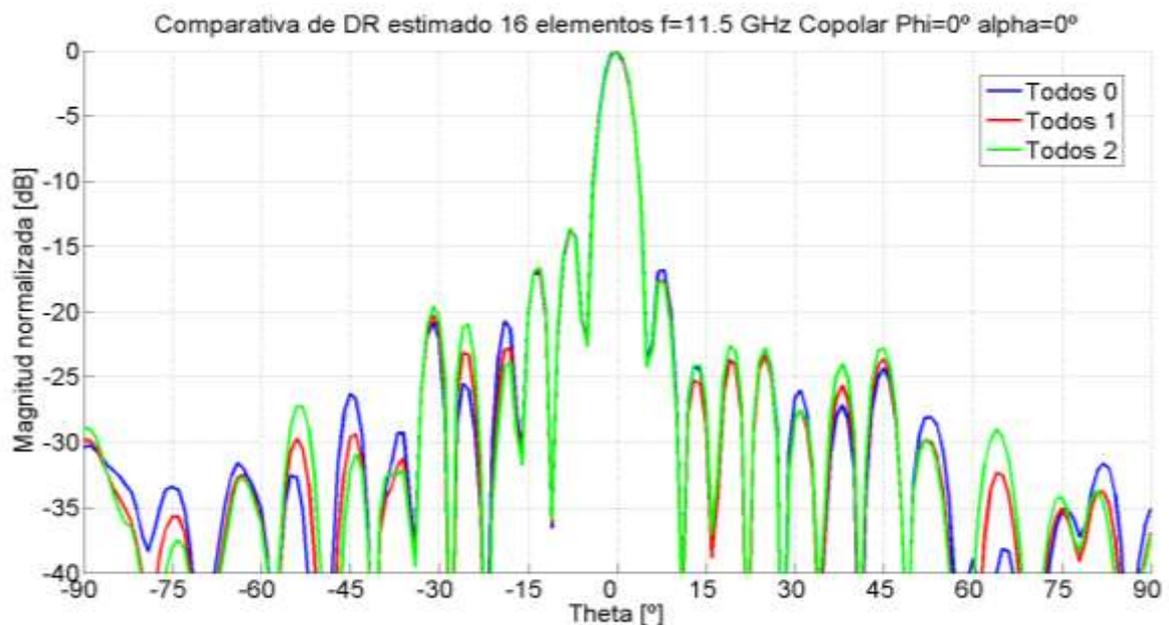


Figura 7.7 Comparativa de configuraciones de estados para una ausencia de desfase progresivo en array (apuntamiento de  $0^\circ$ ) de dieciséis elementos

Si se compara la imagen siguiente con las obtenidas para el array de tres elementos, se puede observar que tanto el apuntamiento como el ancho del haz de radiación a 3 dB permanecen invariables, independientemente de la configuración de estados utilizada. Cambiar la distribución de estados para generar el desfase progresivo deseado, únicamente afecta a la forma y aparición de los lóbulos secundarios, aunque sin afectar de forma significativa a su nivel, es decir, la SLL permanece en valores similares.

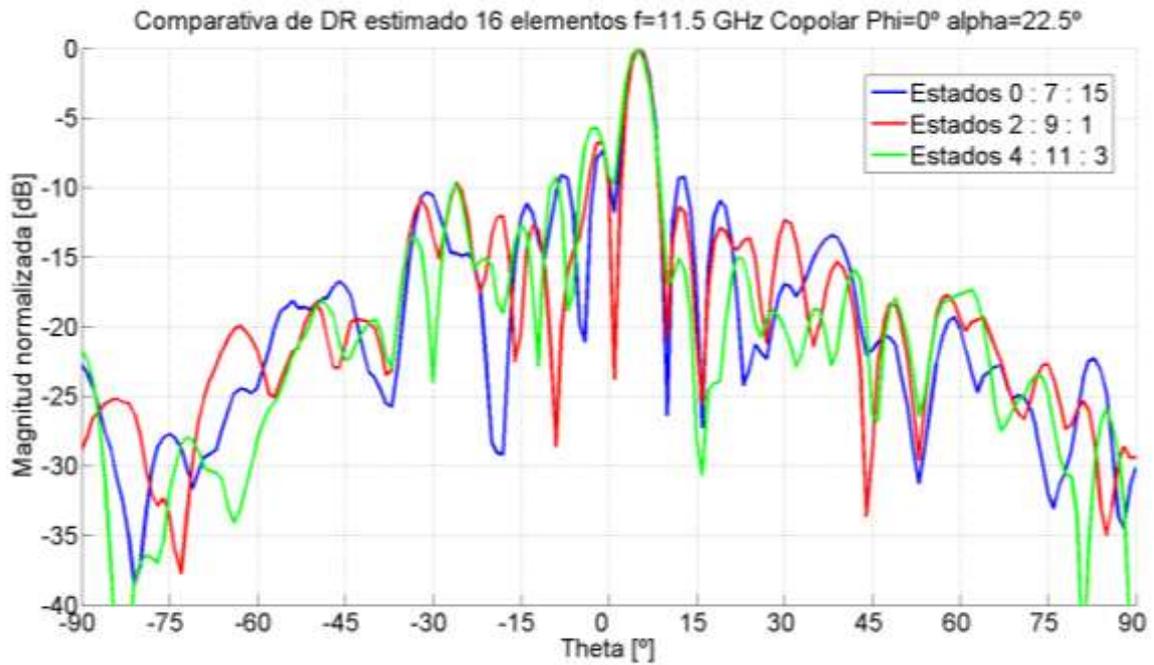


Figura 7.8 Comparativa de configuraciones de estados para desfase progresivo de 22.5° (apuntamiento de 5°) en array de dieciséis elementos

Para terminar, y nuevamente siguiendo la distribución de resultados de la sección anterior, se representan de manera conjunta tres desfases progresivos, y el apuntamiento que producen, para que la comparativa entre ellos mismos, y con los resultados obtenidos del array de tres elementos sea de mayor facilidad.

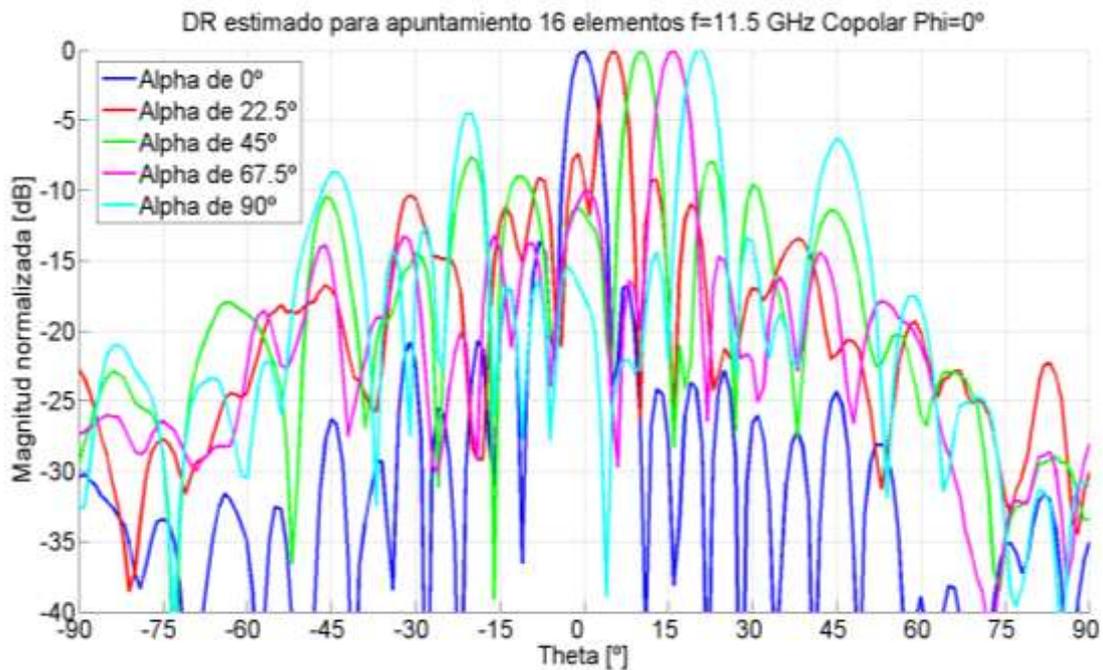


Figura 7.9 Apuntamiento estimado para array de dieciséis elementos

### 7.3 Medidas de radiación en cámara anecoica

La única forma de comprobar cuánto se acercan a la realidad las estimaciones realizadas en la sección anterior es realizar medidas de los diagramas de radiación de los arrays construidos, y comparar estos resultados con los obtenidos de las estimaciones de campo radiado para cada una de las configuraciones utilizadas.

Como se ha comentado anteriormente en la memoria de este PFC, debido a las limitaciones de la cámara anecoica, que solamente posee un único conector para entrada de señal de radiofrecuencia en el mástil de medida, se hace imposible conectar de manera conjunta los tres elementos que conforman los arrays construidos. Para solventar esta limitación, se diseña y construye una pequeña red de alimentación en microstrip.

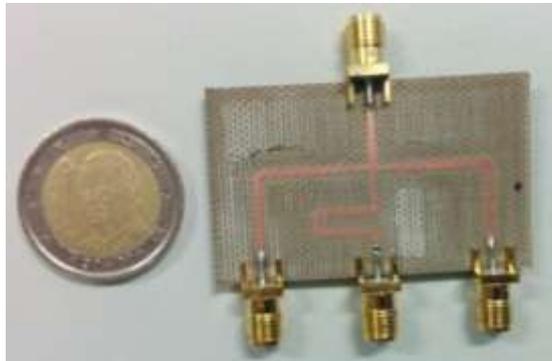


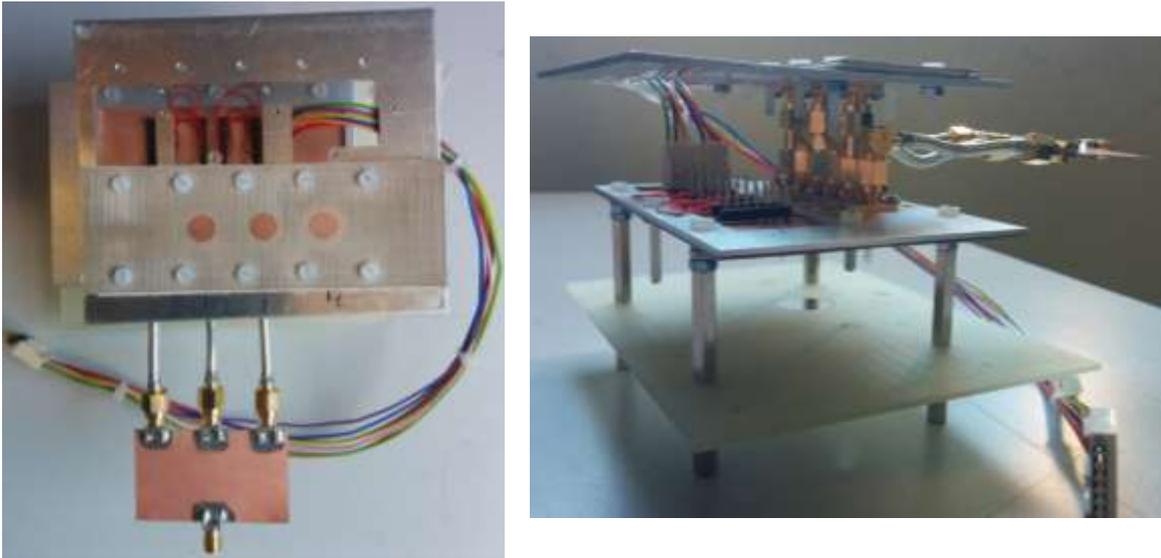
Figura 7.10 Red de alimentación 1 a 3 construida en tecnología microstrip

La red de alimentación de la imagen anterior posee unas especificaciones muy concretas para permitir combinar de manera correcta la señal de radiofrecuencia proveniente de los tres parches+desfasadores de los dos arrays.

- La combinación de las señales debe ser lo más igualitaria posible, es decir, se deben combinar las señales de las tres entradas de RF a una única salida de radiofrecuencia, manteniendo el mismo peso en cada una de las ramas.
- Los recorridos de las tres ramas deben de ser iguales, para permitir que las diferencias de fase sean producto, únicamente, del desfasador, y no del camino recorrido por la señal de RF.
- Minimizar el tamaño para facilitar la integración dentro de las estructuras de los arrays previamente diseñados y construidos.
- Mantener una distancia de 18.5 mm entre los tres conectores, de manera que se pueda integrar la red de alimentación a los arrays sin necesidad de utilizar latiguillos de conexión.

### 7.3.1 Array de tres desfasadores y tres parches independientes

Primero se procede al correcto conexionado de la red de alimentación microstrip con la estructura completa del array. Como muestra la imagen a continuación, para este caso se hace totalmente necesario el uso de los latiguillos que ya estaban conectados al array, ya que debido al reducido espacio que existe entre las dos placas que conforman la estructura se hace imposible conectar directamente el circuito a la red de alimentación, pese a su reducido tamaño.



*Figura 7.11 Conexionado de array de tres desfasadores y tres parches independientes y red de alimentación en microstrip*

Cabe destacar que la red de alimentación se conecta colocando su plano de masa enfrente a la dirección de radiación de la estructura para evitar cualquier tipo de interferencia sobre las líneas de transmisión.

Una vez conectada la red de alimentación, se coloca toda la estructura sobre el mástil de medida dentro de la cámara anecoica, y se realizan las conexiones necesarias del control serie a la estructura de radiofrecuencia y al ordenador de control. Este proceso es idéntico al descrito en los capítulos anteriores.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el array, referente a los diagramas de radiación medidos en la cámara anecoica.

Con objeto de comprobar los efectos vistos en la sección de estimaciones teóricas, primero se realiza una comparativa entre distintas configuraciones para obtener el mismo desfase progresivo, y comparar la variabilidad que se obtiene entre configuraciones; posteriormente, se programan diferentes estados progresivos, para comparar los resultados de desajuste que se producen, y tratar de verificar los resultados de las estimaciones.

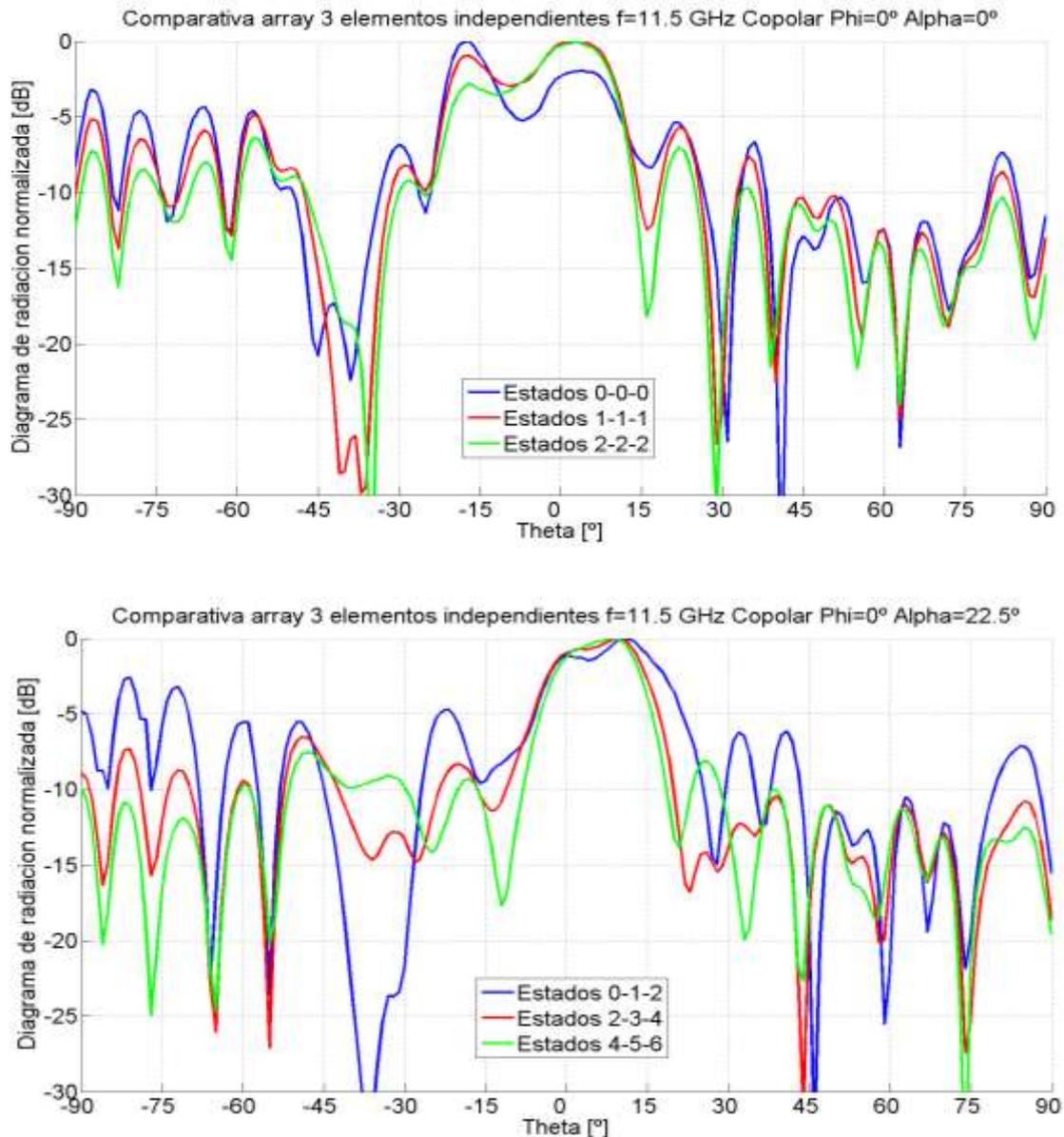


Figura 7.12 Comparativa de configuraciones de estados en array de tres desfasadores y tres parches independientes.

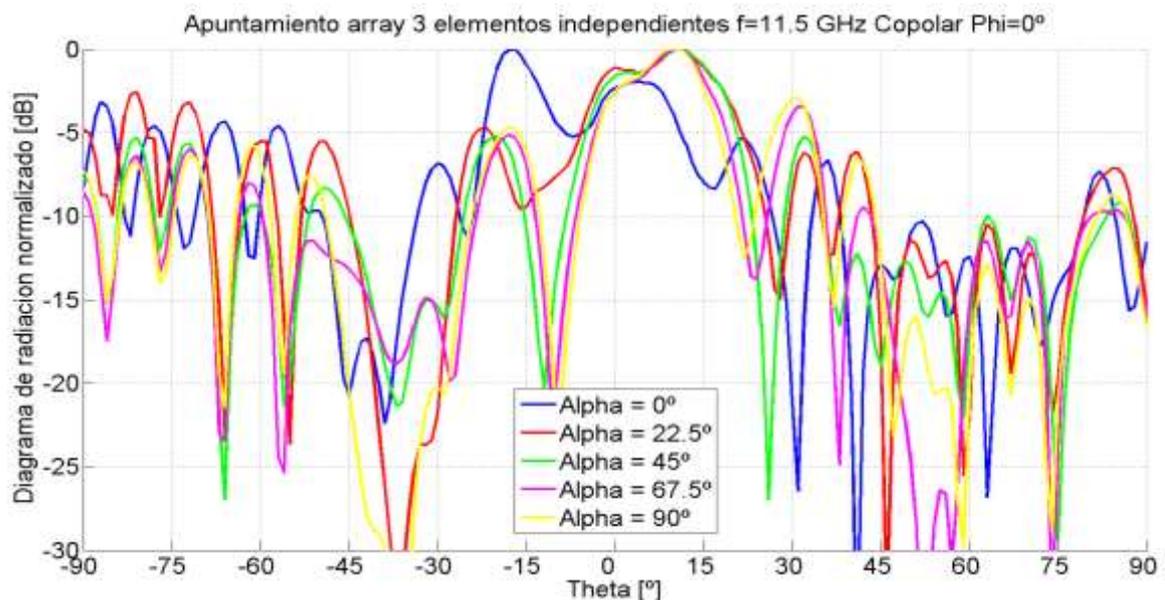
Las configuraciones utilizadas para estas pruebas son las mismas ya mostradas y recogidas en la *Tabla 7—II* del capítulo anterior.

Lo primero que se observa en las gráficas anteriores es que para una ausencia de desfase progresivo ( $\alpha = 0^\circ$ ) el haz principal del array no se encuentra apuntado hacia la dirección de  $\theta = 0^\circ$ , lo cual se debe al rizado producido en los valores máximos de dicho haz, provocado por la deformación de los diagramas de radiación del elemento unitario; y que utilizando un desfase progresivo de  $\alpha = 22.5^\circ$  no se consigue un apuntamiento adecuado a los  $5^\circ$  teóricos, debido en gran parte a la gran anchura de haz que presenta el diagrama de radiación.

Por otra parte, el uso de distintas configuraciones para conseguir el mismo desfase progresivo no tiene los mismos efectos que los descritos durante la fase de estimación de campo radiado.

Los diagramas de radiación anteriores presentan menor variabilidad en función de la configuración programada y se produce un considerable aumento del nivel de los lóbulos secundarios. Estos efectos no se observaban en las estimaciones de campo radiado, que variaban considerablemente dependiendo de la agrupación de estados utilizados, pero presentaban un menor nivel de lóbulos secundarios.

A continuación se presentan las medidas realizadas para comprobar el apuntamiento del haz de radiación principal siguiendo las configuraciones recogidas en la *Tabla 7—1*



*Figura 7.13 Apuntamiento medido en array de tres desfasadores y tres parches independientes.*

Los resultados de las estimaciones de campo radiado de la sección anterior reflejaban una gran variabilidad dependiendo del desfase progresivo utilizado, pero se observaba un desapuntamiento del haz principal pese a las imprecisiones producidas por los errores en el módulo y la fase del elemento unitario.

En los resultados anteriores no se reconoce ningún tipo de desapuntamiento del haz principal, y solo se puede observar la deformación del diagrama de radiación y el aumento del nivel de los lóbulos secundarios si se modifica la configuración de estados programada en el array.

Con el objetivo de completar los resultados expuestos con anterioridad, se han calculado y recogido los resultados de la ganancia de la estructura para las configuraciones de estados presentadas anteriormente, en las posiciones de máxima radiación, y dicha información, se presenta mediante las siguientes figuras.

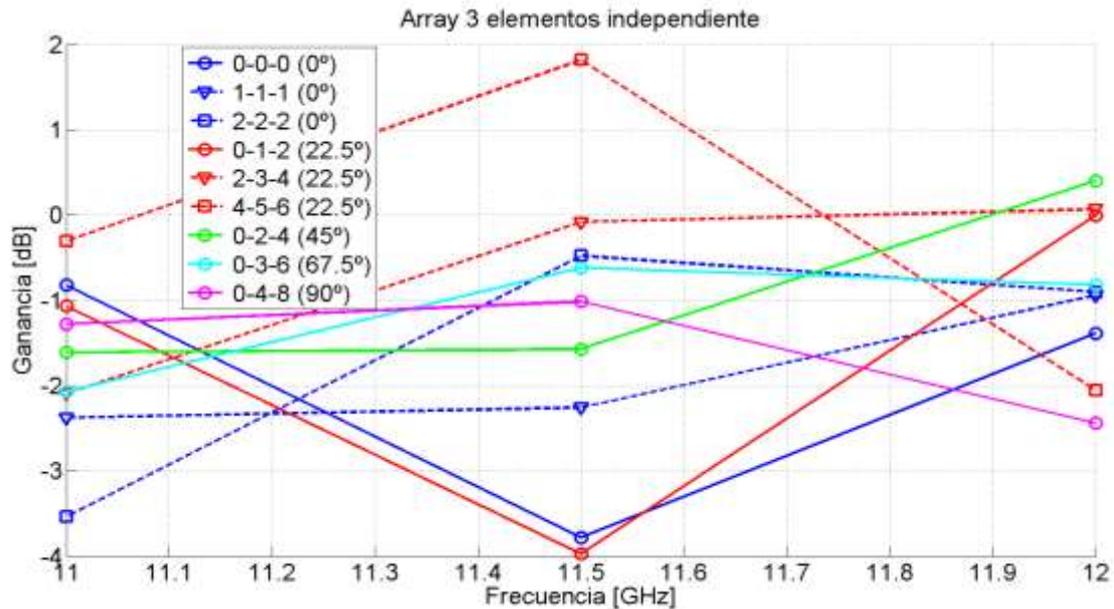


Figura 7.14 Ganancia medida para cada configuración de estados en array de tres desfasadores y tres parches independientes.

En la figura anterior se observa cómo la ganancia de la estructura generalmente aumenta al programar configuraciones de estados mayores a la frecuencia de diseño, tanto si se utilizan configuraciones alternativas para el mismo desfase progresivo, como si se modifica esta configuración para cambiar el apuntamiento mediante un desfase progresivo superior. Este comportamiento también queda reflejado en la siguiente figura, en la cual se observa la ganancia para las configuraciones “básicas” en distintos desfases progresivos.

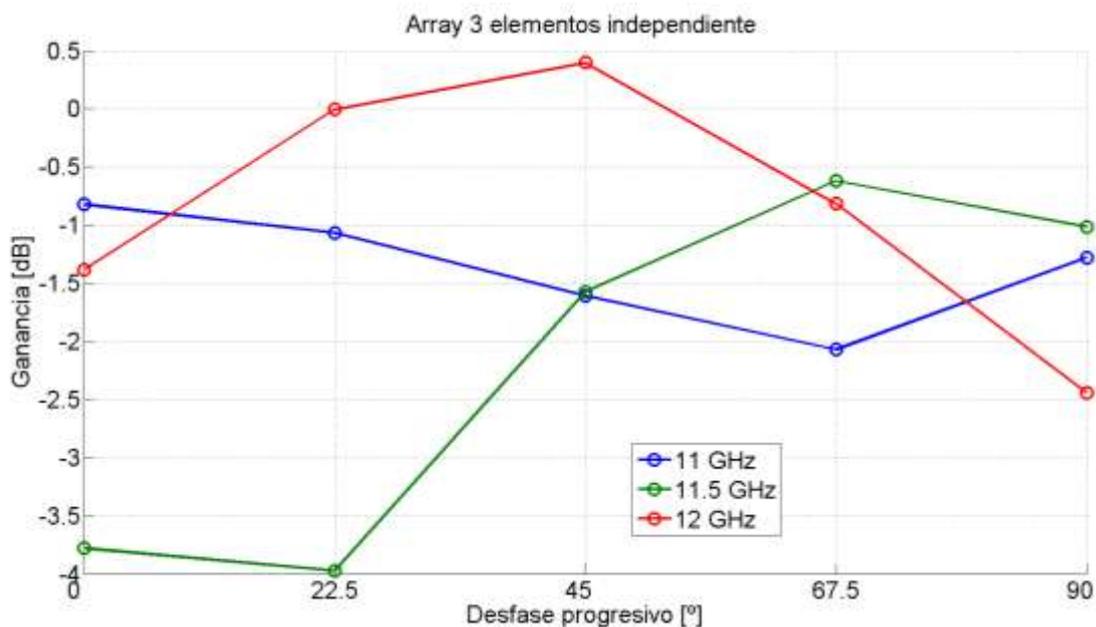


Figura 7.15 Ganancia medida según desfases progresivos en array de tres desfasadores y tres parches independientes.

Con la intención de explicar este comportamiento, se realizaron medidas de la reflexión que presenta el sistema completo en su único puerto de entrada con el objetivo de poder detectar cualquier anomalía producida.

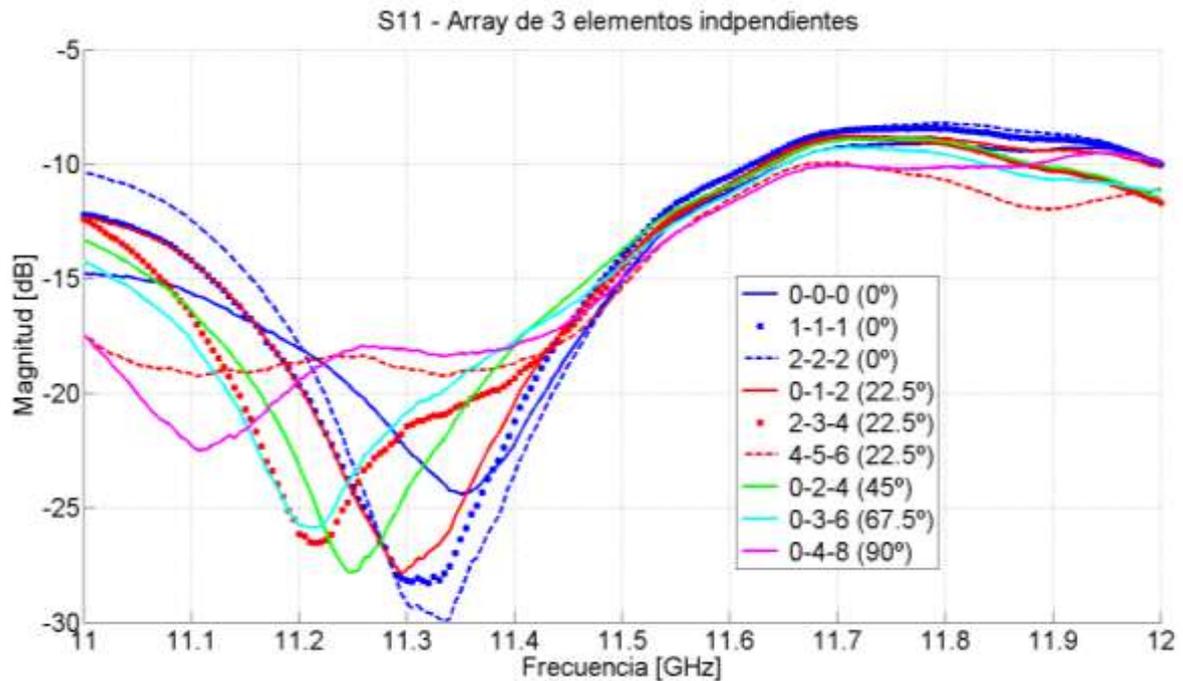


Figura 7.16 Parámetro  $S_{11}$  en array de tres desfasadores y tres parches independientes.

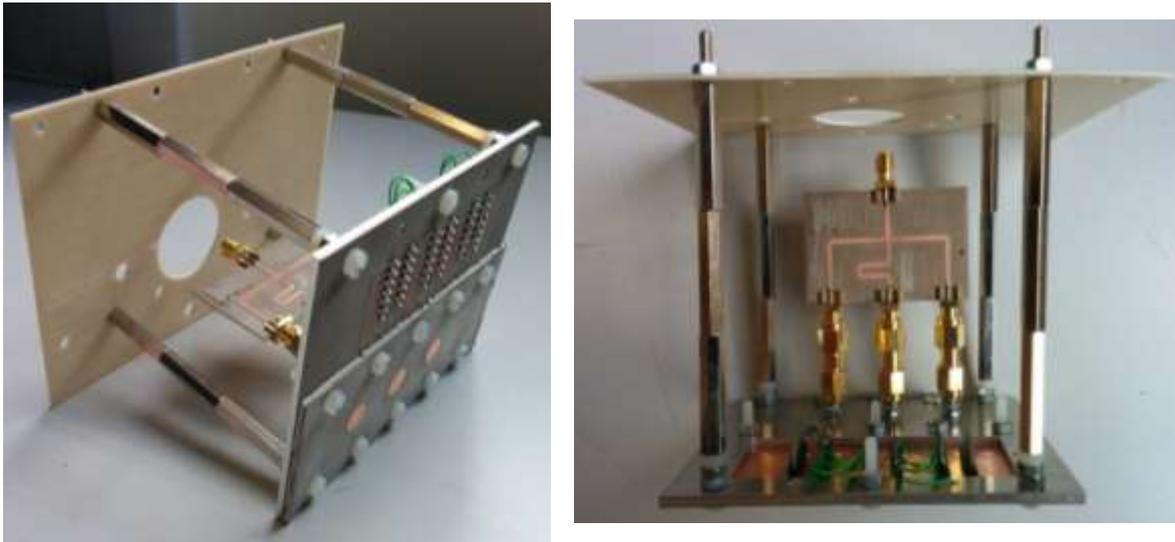
La reflexión para toda la banda de trabajo se encuentra siempre por debajo de -8 dB, y en concreto para la frecuencia de diseño, se dispone de unos valores de adaptación muy agrupados para todas las configuraciones utilizadas, con un valor medio de -15 dB.

Si junto con estos resultados se observan los valores recogidos, durante las pruebas con el analizador de redes llevadas a cabo sobre el array de tres desfasadores y tres parches independientes en el capítulo 5, para el parámetro  $S_{21}$  del array, se confirma este aumento de la ganancia de la estructura. Si en cualquiera de los desfasadores se programa un estado mayor al número dos, los valores de transmisión aumentan, y al combinar el efecto de los tres desfasadores, se produce el aumento de la ganancia anteriormente ilustrado.

Un suceso verdaderamente anómalo, del cual no se ha encontrado explicación, es el aumento de la ganancia para el desfase progresivo de  $\alpha = 0^\circ$ . Si se utilizan los estados uno y dos para generar la configuración de estados necesario, la ganancia no debería aumentar, dado que la reflexión del sistema permanece invariable, y la transmisión de los desfasadores individuales para estos dos estados es menor que la producida en el estado cero.

### 7.3.2 Array conjunto de tres desfasadores y tres parches

Primero se procede al correcto conexionado de la red de alimentación microstrip con las estructura del array. Como se muestra en las figuras a continuación, para este caso no es necesario el uso de latiguillos de conexión, debido a que existe espacio suficiente entre el circuito de los desfasadores y parches y la placa de soporte para la cámara anecoica.



*Figura 7.17 Conexionado de array conjunto de tres desfasadores y tres parches y red de alimentación en microstrip*

De forma similar a la comentada para la anterior estructura, se coloca el nuevo array sobre el mástil de soporte dentro de la cámara anecoica, y se realizan las conexiones necesarias para comenzar el proceso de medida.

Con objeto de comprobar los efectos vistos en la sección de estimaciones teóricas, y para poder comparar los resultados obtenidos con los observados para el array de tres desfasadores y tres parches independientes, primero se realiza una comparativa entre distintas configuraciones para obtener el mismo desfase progresivo, y comparar la variabilidad que se obtiene entre configuraciones; posteriormente, se programan diferentes estados progresivos, para comparar los resultados de desapuntamiento que se producen, y tratar de verificar los resultados de las estimaciones.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el array, referente a los diagramas de radiación medidos en la cámara anecoica.

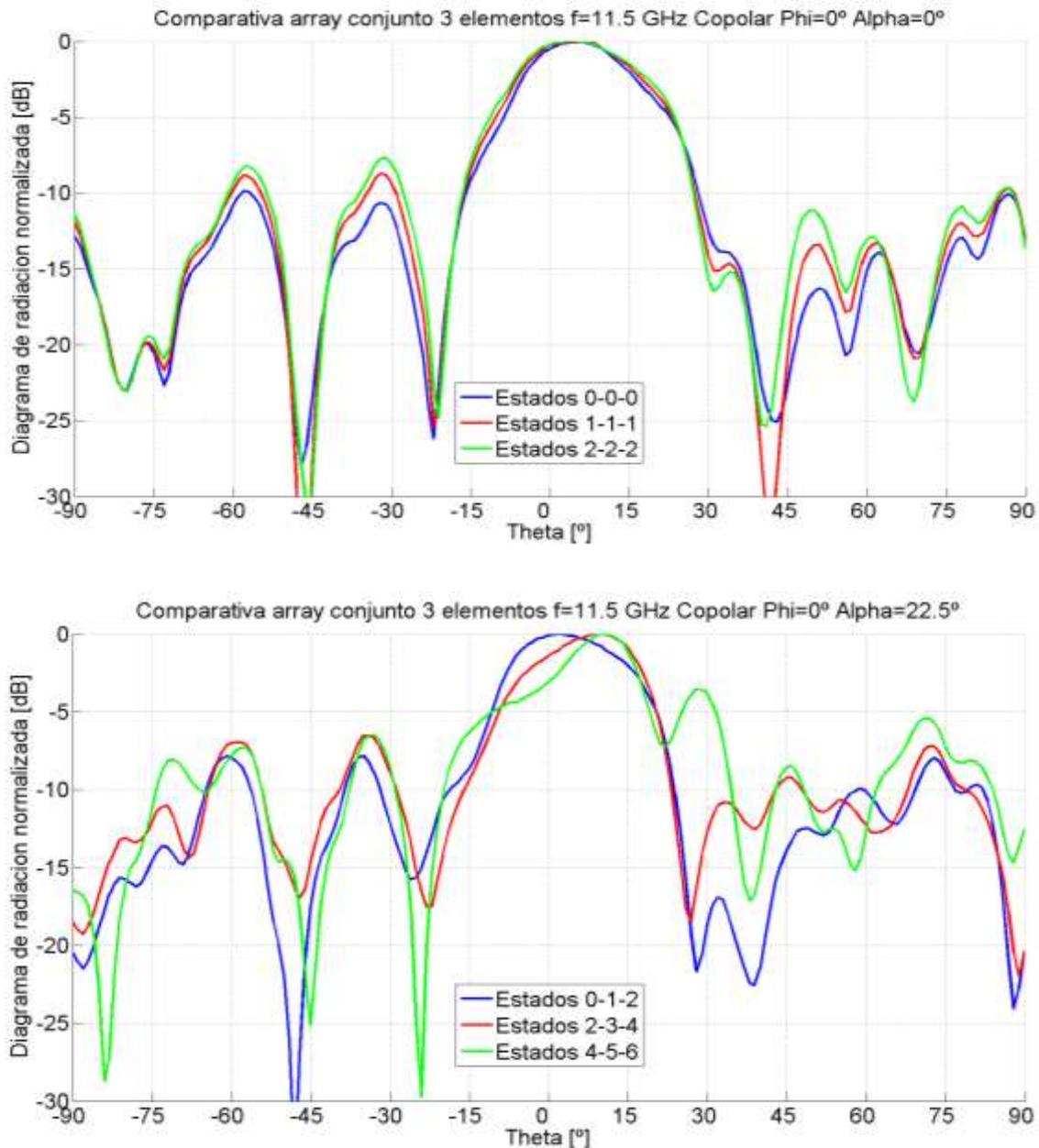


Figura 7.18 Comparativa de configuraciones de estados en array conjunto de tres desfasadores y tres parches.

Las configuraciones de estados utilizadas son las mismas que para el array anterior.

A diferencia de la anterior estructura, el haz principal parece más centrado en torno al  $0^\circ$  del barrido en  $\theta$ , y al presentar menor rizado y un nivel de lóbulos secundarios menor que los resultados anteriores, se asemeja con más claridad a los diagramas de radiación obtenidos durante las estimaciones de campo radiado. Para un desfase progresivo de  $\alpha=22.5^\circ$ , el haz principal tampoco parece apuntarse correctamente, aunque nuevamente se reconoce un menor nivel de lóbulos secundarios que para las pruebas con el array anterior.

Al igual que para los resultados del array de tres desfasadores y tres parches independientes, la variabilidad que se observa en las figuras anteriores, en función de la configuración de estados programada, no coincide con la obtenida para las estimaciones teóricas de campo radiado, las cuales se veían modificadas significativamente por el uso de estados distintos en el desfasador.

A continuación se presentan las medidas realizadas para comprobar el apuntamiento del haz principal, siguiendo las configuraciones recogidas en la Tabla 7—I, las mismas que han sido utilizadas para el array anterior.

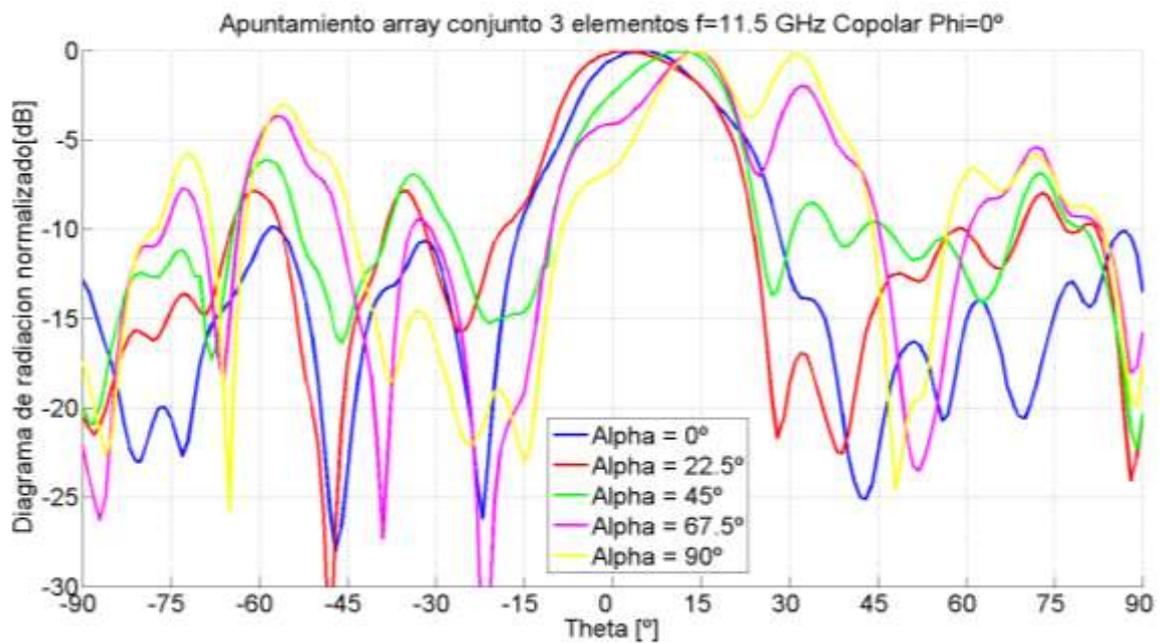


Figura 7.19 Apuntamiento medido en array conjunto de tres desfasadores y tres parches

En la imagen anterior, y pese a los errores producidos por las desviaciones de módulo y fase, se observa una modificación progresiva del apuntamiento del haz principal, que no presenta una variabilidad tan marcada como la obtenida en las estimaciones previas ni en el array de tres desfasadores y tres parches independientes. La modificación del haz principal en los resultados anteriores no se produce con la precisión calculada mediante las fórmulas teóricas.

Con el objetivo de completar los resultados expuestos con anterioridad, se han calculado y recogido los resultados de la ganancia de la estructura para las configuraciones de estados presentadas anteriormente en su posición de máximo apuntamiento, y dicha información, se presenta mediante las siguientes figuras.

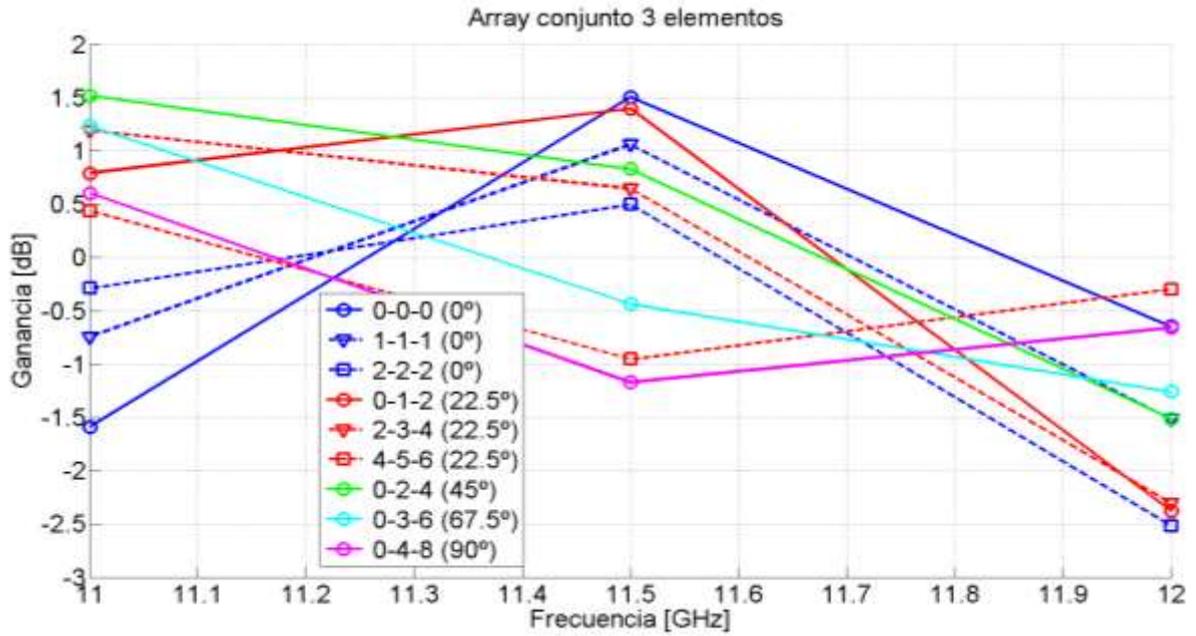


Figura 7.20 Ganancia medida para cada configuración de estados en array conjunto de tres desfasadores y tres parches.

En la figura anterior se observa como la ganancia de la estructura generalmente disminuye al programar configuraciones de estados mayores a la frecuencia de diseño, tanto si se utilizan configuraciones alternativas para el mismo desfase progresivo, como si se modifica esta configuración para cambiar el apuntamiento mediante otro desfase progresivo. Este comportamiento es radicalmente opuesto al observado para el array anterior.

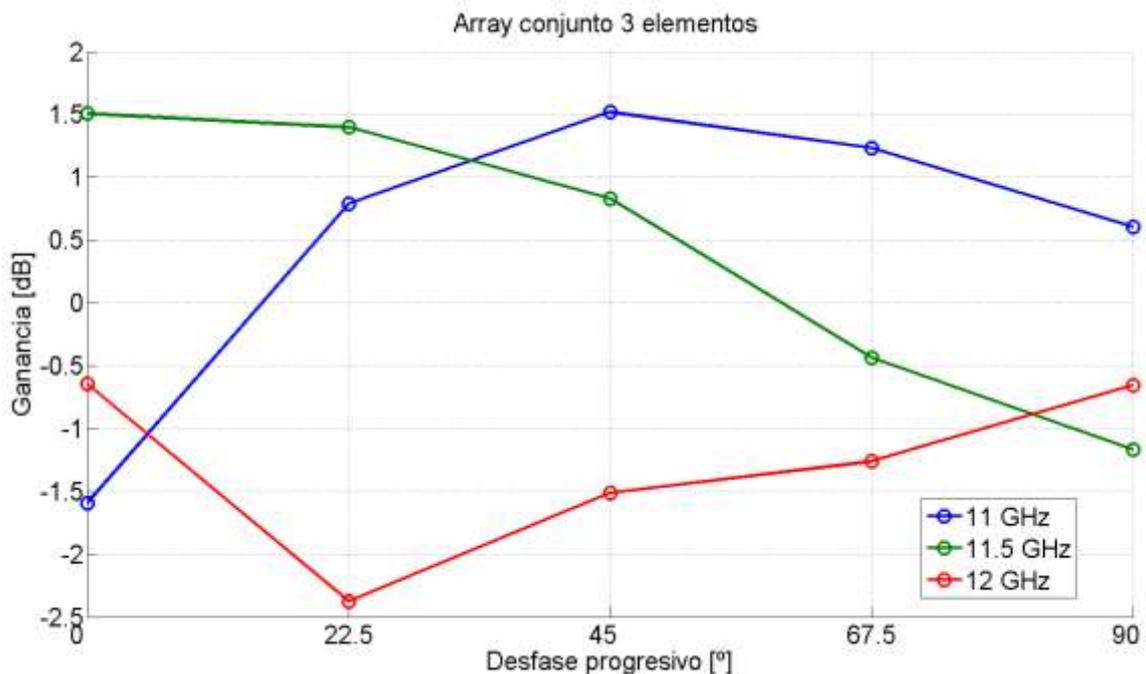


Figura 7.21 Ganancia medida según desfases progresivos en array conjunto de tres desfasadores y tres parches.

Al igual que para el array de la sección anterior, se realizaron medidas de la reflexión que presenta el sistema completo en su único puerto de entrada, con el objetivo de intentar explicar este comportamiento.

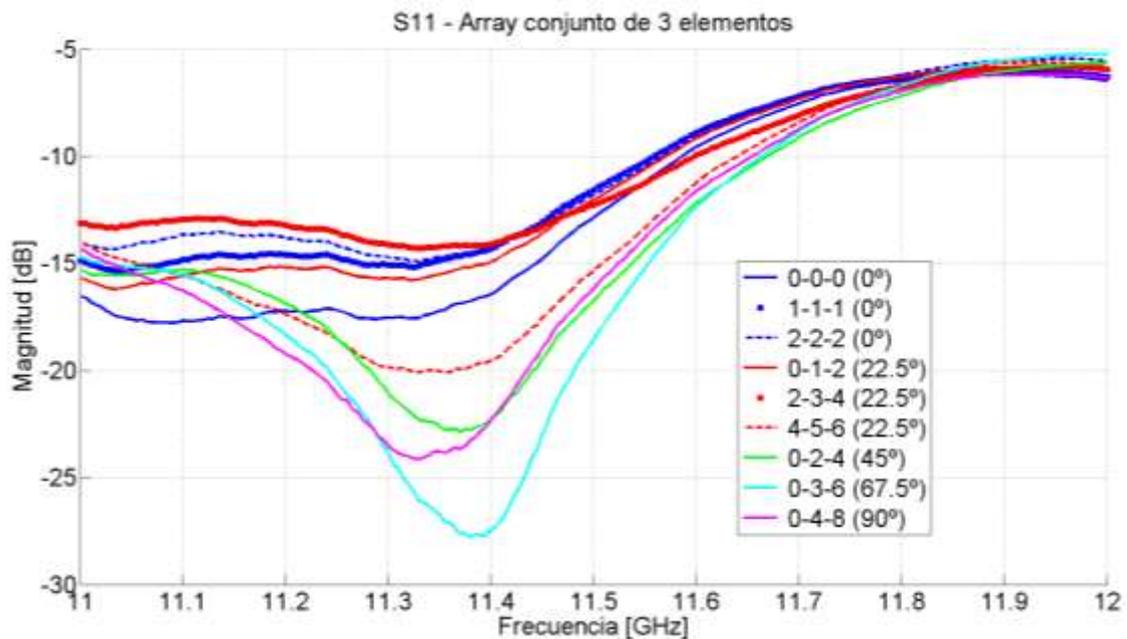


Figura 7.22 Parámetro  $S_{11}$  en array conjunto de tres desfasadores y tres parches.

La reflexión para toda la banda de trabajo se encuentra siempre por debajo de -5 dB, y en especial para la frecuencia de diseño, se dispone de unos valores de adaptación menos agrupados que los obtenidos para el anterior array, y con valores entre -12 dB y -18 dB.

Los resultados de reflexión no explican el comportamiento del sistema en función de la configuración de estados elegida pues, aunque los resultados son ligeramente distintos a los obtenidos para el array anterior, la tendencia de adaptación de ambas estructuras es similar.

La única forma de explicar el comportamiento visto anteriormente es que las transmisiones que se producen para cada uno de los estados sean opuestas a las observadas para el array anterior, y al utilizar estados mayores para las configuraciones, la transmisión de cada desfasador empeore, produciendo el descenso de ganancia. Este comportamiento se asemejaría mucho al visto para los parámetros de dispersión del circuito de evaluación realizado durante el capítulo 4.

Debido a la estructura diseñada para el array conjunto de tres desfasadores y tres parches es imposible verificar esta teoría, dado que no se pueden medir sus parámetros  $S$  mediante el analizador de redes, como se había estado haciendo en el resto de construcciones, debido a la ausencia de un segundo conector en el puerto de salida.

## 7.4 *Conclusión*

Las estimaciones teóricas de campo radiado realizadas en este capítulo coinciden de forma parcial con los resultados de las medidas reales de ambos arrays. Esto se debe en parte al funcionamiento particular de cada uno de los arrays, y en parte al reducido número de elementos utilizado para diseñar dichos arrays.

Operando sobre las formulas referentes al factor de array, se han obtenido unas aproximaciones para arrays de tres elementos. Sin embargo, se considera que debido a la naturaleza de los phased arrays de antenas la coincidencia de los resultados teóricos con los prácticos será mucho mayor al aumentar el número de elementos del array y que, por lo tanto, las estimaciones llevadas a cabo para un array de dieciséis elementos pueden tenerse en mejor consideración que las realizadas para su homónimo más pequeño.

Por otra parte, se han observado diferencias importantes de funcionamiento entre los arrays construidos.

El array de tres desfasadores y tres parches independientes presenta un comportamiento en ganancia totalmente distinto al array conjunto, aunque este sigue obteniendo mejores resultados en las configuraciones medidas hasta el momento.

Solamente con el array conjunto de tres desfasadores y tres parches se ha conseguido realizar un apuntamiento del haz principal de radiación de forma destacable, aunque produciendo un error de apuntamiento considerable.

Es importante destacar que durante los bancos de pruebas a los desfasadores individuales de cada uno de los dos arrays, se creía que solamente el array de tres desfasadores y tres parches independientes funcionaba correctamente, dado que los resultados en radiación del segundo array fueron desastrosos en esas pruebas, realizadas en la sección 6.3.2 para el segundo array, y en la sección 5.4.3 para el primero.

## 8 Conclusiones finales y trabajo futuro

### 8.1 Conclusiones finales

Las conclusiones que se pueden extraer de la realización de este proyecto fin de carrera son bastante diversas.

En primer lugar, se diseñó, construyó, y midió un circuito pensado para evaluar el comportamiento del integrado en torno al cual gira este PFC. Mediante los circuitos construidos se ha podido depurar concienzudamente la electrónica de control del dispositivo, así como los procesos llevados a cabo para un correcto montaje y conexionado, y la verificación del funcionamiento de cada elemento. En esta primera estructura se reconocieron e implementaron todas las características necesarias para utilizar el control del integrado mediante el puerto serie.

El segundo prototipo construido es un array de tres elementos desfasadores al que se le une mediante transiciones un circuito externo con los elementos radiantes. El objetivo de este diseño era comprobar el funcionamiento de varios elementos montados sobre el mismo circuito. Gracias a esta estructura se ha podido realizar un protocolo de control serie con el cual controlar un conjunto de  $N$  elementos realizando las modificaciones adecuadas en el código de control del programa. El software programado se complementa perfectamente con la alta modularidad implementada en los diseños, gracias a la cual se pueden añadir elementos desfasadores adicionales sin demasiada complicación. Aunque las pruebas para verificar el funcionamiento individual de los elementos fueron un éxito el apuntamiento que realizaba el array mediante las configuraciones de estados utilizadas no era el previsto.

La tercera estructura construida integra conjuntamente en un mismo circuito la red de alimentación con los desfasadores y los elementos radiantes, permitiendo un diseño mucho más compacto y adaptable. Este diseño ha permitido descubrir una gran cantidad de efectos de interferencia que existen entre los elementos utilizados, debido al hecho de integrarlos todos en un mismo circuito. Pese a que en las medidas y pruebas realizadas a los elementos individuales que conforman el array no se obtuvieron resultados positivos, la estructura se comporta de manera aceptable al funcionar como un array, permitiendo el apuntamiento, con mayor o menor error, del haz principal de radiación. Para este prototipo se ha comenzado a utilizar un interfaz que facilita enormemente la programación de los estados en los desfasadores, implementado para su uso en un array de tres y dieciséis elementos.

Del funcionamiento de los distintos prototipos y la gran cantidad de pruebas realizadas se pueden obtener algunas particularidades a tener en cuenta.

Se ha puesto gran dedicación en intentar mejorar los procesos de soldadura y conexión manuales, pero observando la gran dependencia que presentan las estructuras diseñadas en función del montaje realizado se considera totalmente necesario hacer externo este proceso. La realización de la soldadura y conexión de los distintos componentes a través de una empresa externa y especializada en este cometido se cree que mejorará en gran medida las características de los diseños y reducirá al mínimo la posibilidad de un error en este proceso.

Las altas reflexiones y bajas transmisiones que presentan las estructuras diseñadas, por la inclusión de los desfasadores, dan como resultado unas altas atenuaciones en el sistema que hacen que dicha estructura carezca de ganancia.

Los diagramas de radiación de los elementos unitarios que componen el array se ven claramente afectados por el cambio en los estados programados en el desfasador, produciendo numerosas imperfecciones en el módulo y la fase de dichos diagramas. Este efecto es crítico en las estimaciones realizadas para un array de tres elementos. En las medidas reales realizadas el efecto es menor que en las estimaciones; por lo tanto, se considera que al aumentar el número de elementos, gracias a los cuales las estimaciones mejoraban enormemente, se mejorarán también los resultados obtenidos para el array implementado.

En algunos de los prototipos se han observado los efectos cruzados que aparecen al tener varios elementos radiantes y sus desfasadores funcionando en el mismo circuito. Debido a esto, se considera necesario investigar nuevos diseños en los cuales se implementen mecanismos para aislar cada uno de los elementos desfasadores de la red de alimentación, de sí mismos y de sus compañeros desfasadores, y también de los componentes de corriente continua y de los elementos radiantes.

## ***8.2 Argumentación de la no finalización de la totalidad del PFC***

El objetivo de este PFC era la integración de desfasadores en un array lineal de parches sobre una red de alimentación en guía de onda, como indica el título del mismo. Como se ha podido observar por la información recogida en este documento, no se han llegado a cumplir todos los objetivos inicialmente planteados.

El proyecto se inició realizando una serie de pruebas sobre las construcciones que se tenían de un proyecto similar anterior, pero debido al estado de dichas construcciones, a los mal funcionamientos, y a los diversos errores de diseño descubiertos gracias a estas pruebas, fue imposible realizar un estudio previo satisfactorio que permitiera continuar el trabajo realizado. Debido a lo anteriormente expuesto fue necesario rediseñar dichas

estructuras y repetir los procesos de construcción, lo cual modificó enormemente la planificación o línea de actuación inicial del proyecto.

Durante la planificación de los prototipos se cometieron diversos errores de diseño que se descubrieron mediante las pruebas realizadas sobre las construcciones llevadas a cabo. Dichos errores se subsanaron una vez se había acotado la razón que los producía a través de numerosos bancos de pruebas y medidas.

La construcción de los prototipos no estuvo exenta de dificultades. El reducido tamaño de los diseños y los componentes utilizados, junto con la imprecisión de los métodos de soldadura y la dificultad para verificar los resultados obtenidos, supuso que este proceso se convirtiera en una de las etapas más críticas de todo el proyecto.

Los procesos llevados a cabo para comprobar el estado de las prototipos solían ser de gran utilidad aunque, en ciertas ocasiones arrojaron resultados confusos en cuanto al verdadero funcionamiento de los dispositivos: como la placa número tres del circuito de evaluación del desfasador, la cual funcionaba perfectamente como red de alimentación pero, no como se esperaba al conectar el elemento radiante; o el array conjunto de tres desfasadores y tres parches, cuyos elementos probados individualmente arrojaban unos resultados desastrosos, pero el funcionamiento conjunto como array era satisfactorio.

Pese a todas las dificultades antes mencionadas, los éxitos conseguidos durante la realización de este proyecto deben ser tenidos en buena consideración. Se dispone de un control mediante el puerto serie del integrado, que permite disponer en cadena de un número indeterminado de desfasadores y facilita su conexión y programación a través de un interfaz desarrollado específicamente para este cometido. La alta modularidad y la facilidad de interconexión de los diseños realizados facilitan en gran medida los procesos de verificación de los elementos individuales, y de cara a la implementación del array completo de dieciséis elementos, el proceso se reduce a replicar los diseños disponibles dieciséis veces. Los prototipos realizados se encuentran en un estado operativo, y todos ellos funcionan correctamente (atendiendo a las particularidades de funcionamiento de cada uno), de manera que pueden ser utilizados para continuar el estudio de esta línea de investigación.

### ***8.3 Trabajo futuro***

El futuro inmediato de esta línea de investigación es incluir la tecnología de desfasadores digitales dentro de la red de alimentación en guía de onda diseñada durante el PFC de Sergio Casas Olmedo.

Para combinar correctamente ambas tecnologías, será preciso investigar con mayor detenimiento los diseños propuestos en este PFC para conseguir un mayor aislamiento de los desfasadores con los elementos radiantes y, gracias a la modularidad implementada en

estos diseños, replicar el elemento unitario hasta formar un array con dieciséis componentes.

Otra línea de investigación puede ser estudiar las distintas configuraciones de estados utilizadas para las pruebas con los arrays de tres elementos. Aunque se han comprobado los efectos de programar desfases progresivos en el array y el apuntamiento que generan, es posible obtener otro tipo de configuraciones que afecten de distinta manera al apuntamiento del haz principal, la anchura de haz, la posición y nivel de los lóbulos secundarios. Este estudio se puede llevar a cabo tanto a través de estimaciones teóricas, como mediante medidas reales de los arrays construidos.

Mediante la modificación de las estructuras planteadas se podría llegar a diseñar un array en dos dimensiones. La tecnología de desfasadores digitales aplicada a un array bidimensional permitiría modificar el haz de radiación para realizar barridos electrónicos en los planos  $\phi$  y  $\theta$ .

Teniendo en cuenta la gran cantidad de problemas que han presentado los desfasadores digitales, se podría estudiar sustituirlo por otros dispositivos que permitieran una modificación efectiva de la fase, como diodos varactores o dispositivos MEM's. Estos elementos requieren de un control muy preciso de la tensión de alimentación, que podría conseguirse mediante un circuito de acondicionamiento correcto, y configurarse adecuadamente a través de los métodos de control serie implementados en este PFC.

## Referencias

- [1] José Luis Masa Campos, Jorge Alfonso Ruiz Cruz. “*Antenas y circuitos de alta frecuencia*”, 2009. Asignatura de máster impartida en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.
- [2] Constantine A. Balanis. “*Antenna Theory: Analysis and Design*”, 3rd Edition. April 4, 2005.
- [3] David M. Pozar. “*Microwave Engineering*”. John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [4] PFC de Jesús Vázquez “*Diseño de un phased array lineal de parches sobre guía de onda para comunicaciones por satélite DBS*” Junio 2014
- [5] PFC de Sergio Casas Olmedo “*Diseño de un array lineal de parches sobre guía rectangular para banda Ku*” Junio 2013
- [6] Garcia-Valverde, D.; Masa-Campos, J.L.; Sanchez-Olivares, P.; Taha-Ahmed, B.; Corcoles, J: “*Linear Patch Array Over Substrate Integrated Waveguide for Ku-Band*” Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, Volume: 12, Page(s): 257 – 260 Marzo 2013
- [7] Sergio Casas-Olmedo; Jose Luis Masa-Campos; Pablo Sánchez-Olivares “*Design and characterisation model for a linearly polarised patch array fed by serial rectangular waveguide network*” IET Microwaves, Antennas & Propagation, 7 pp. Available online: 22 July 2014
- [8] PFC de Alfredo Manuel Castro Cuartero “*Sistema de Control de apuntamiento electrónico de una agrupación de antenas planas reconfigurables operando en el sistema WiMAX a 3.5 GHz*” Junio 2013
- [9] Balanis C. A.: “*Advanced Engineering Electromagnetics*” John Wiley & Sons, 1989, pp. 394-414.
- [10] J.-C. Takada, M. Takahashi, M. Ando, N. Goto, “*Radial Line Slot Antennas*”. *IEEE Tokio Section*, no. 30, pp. 147-151, 1991.
- [11] Desfasador digital MACOM disponible en <http://www.macom.com/digitalphaseshifters>

- 
- [12] Componentes electrónicos disponibles en <http://es.rs-online.com/web/>
- [13] “Características del sustrato RF-35 de Taconic,”  
<http://www.taconic-add.com/pdf/rf35.pdf>
- [14] “Características de la espuma o foam ROHACELL HF  
<http://www.rohacell.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/ROHACELL/product-information/ROHACELL%20HF%20Product%20Information.pdf>
- [15] “Estación de soldadura de JBC,” <http://www.jbctools.com/>
- [16] “LPKF ProtoMat S100,” <http://www.lpkf.es/>

## Anexos

### A Taller de circuitos impresos de la EPS

Todos los circuitos impresos mostrados en este proyecto fin de carrera han sido realizados en el taller de la Escuela Politécnica Superior, mediante las herramientas que se muestran a continuación.

#### FABRICACION DE CIRCUITOS IMPRESOS

La construcción de cada una de las placas, se ha llevado a cabo mediante un proceso íntegramente mecánico utilizando una fresadora automatizada controlada por ordenador.

Para construir los circuitos impresos mediante esta técnica, se hace imprescindible diseñar la placa mediante software y generar una serie de archivos gerbers, que contienen los órdenes de movimiento de la herramienta, conforme a unas posiciones globales. El flujo de trabajo necesario a seguir para realizar esta tarea se muestra en la imagen siguiente.

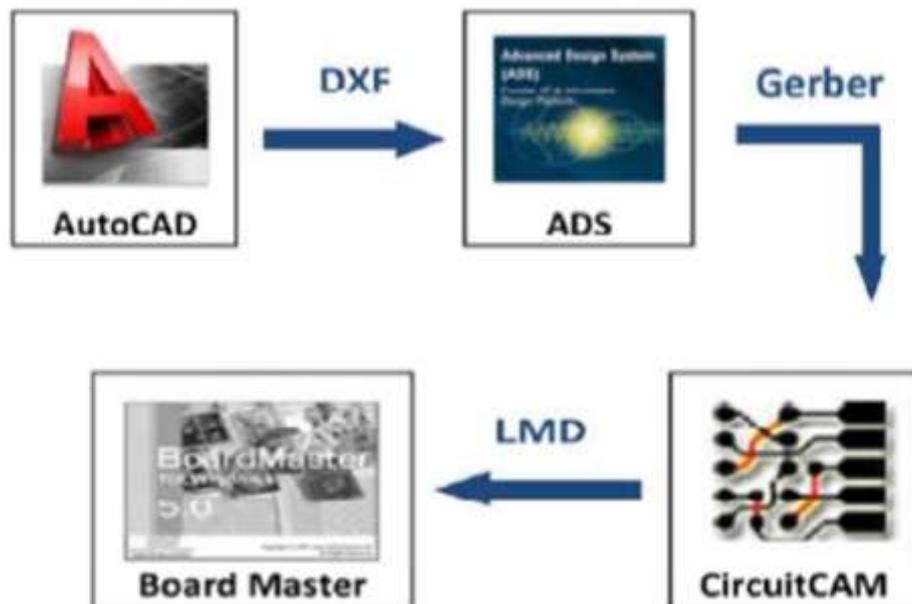


Figura A.1 Flujo de trabajo para construcción en taller de circuitos impresos

1. Generar los diseños del circuito en AutoCAD, con las capas mínimas necesarias para una construcción: taladros, contorno, top y bottom. Exportar los archivos.

2. Importar los archivos .dxf de AutoCAD una vez definidas las capas, y dar el formato Gerber a cada una de ellas mediante ADS, obteniendo los archivos de formato .gbr.
3. Importar los ficheros Gerber mediante el software de creación de PCB's CircuitCAM. Se define la forma de actuar de la fresadora; así como las herramientas que debe utilizar en cada caso, dependiendo de la utilidad del circuito se utilizan las herramientas necesarias, según las indicaciones mostradas en la siguiente imagen.

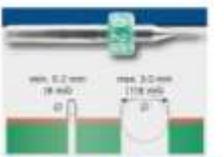
HERRAMIENTA	IMAGEN	DESCRIPCION
Universal Cuter		Marca el contorno del circuito y elimina el cobre.
End Mill		Quita cobre con poca precisión pero con pocas pasadas.
End Mill RF		Quita el cobre de forma muy precisa, es la herramienta más precisa de la que se dispone en el laboratorio.
Spiral Drill		Broca que realiza taladros de forma muy precisa.
Contour Router		Realiza el corte para separar el circuito del sustrato.

Figura A.2 Herramientas de la fresadora LPKF, y función

4. Tras elegir las herramientas y el método de actuar de la máquina, se genera un archivo LMD que se transfiere al entorno de trabajo de BoardMAster. Este software, permite posicionar la placa a construir dentro de unas coordenadas de plancha de sustrato predefinidas. Y por medio de una lista de diez tareas, desde leer fiduciales, hasta hacer taladros o rebajar las pistas del bottom, controla la fresadora así como las herramientas predefinidas.



*Figura A.3 Fresadora de control numérico LPKF*

### **MECANIZADO DE ELEMENTOS METÁLICOS**

Para la realización del PFC fueron necesarias diversas estructuras metálicas de aluminio para dar soporte y rigidez a los circuitos impresos.

De las tres estructuras utilizadas, solo una de ellas se construyó íntegramente en el taller de mecanizada de la Escuela Politécnica Superior, y las otras dos, tuvieron que ser modificadas para adaptarse a las nuevas especificaciones.



*Figura A.4 Fresadora de control numérico OPTIMUN*

La maquinaria utilizada se presenta en la imagen anterior, y se trata de un aparato de control numérico que en base a unos planos es capaz, tras introducir las cotas y posiciones necesarias en el software asociado, generar una serie de cortes y movimientos de fresa con precisiones muy altas y con multitud de accesorios y movimientos disponibles.

### CONEXIONADO Y SOLDADURA

Todos los elementos construidos utilizando las herramientas anteriores, han sido conexionados mediante técnicas puramente artesanales; y debido al reducido tamaño de los integrados que componen los circuitos impresos, es necesario utilizar herramientas especializadas, como las mostradas a continuación, para realizar correctamente las soldaduras necesarias.



*Figura A.5 Microscopio Motic del taller de circuitos impresos*

El microscopio que se muestra en la imagen anterior permite visualizar los circuitos impresos y todos los elementos necesarios a una resolución y tamaño que permiten su soldadura manual, mediante un juego de lentes de alta calidad. Además de la visualización, el aparato está dotado de dos fuentes de luz independientes (una superior y otra inferior), y un sistema de resortes para sujeción.

La estación de nano-soldadura permite conectar adecuadamente cualquier circuito impreso mediante un proceso de soldeo blando por coalescencia de estaño. Además de ser totalmente programable la temperatura de las puntas, el aparato está dotado de una gran cantidad de cabezales intercambiables, especializados para distintas aplicaciones y usos.

Además de la estación de nano-soldadura, en la imagen siguiente se muestra un sistema de conexionado mediante expulsión de aire caliente, el cual permite configurar ampliamente la temperatura del chorro de aire, así como la potencia de expulsión del mismo.



*Figura A.6 Estación de nano-soldadura y herramienta de soldadura por aire caliente*

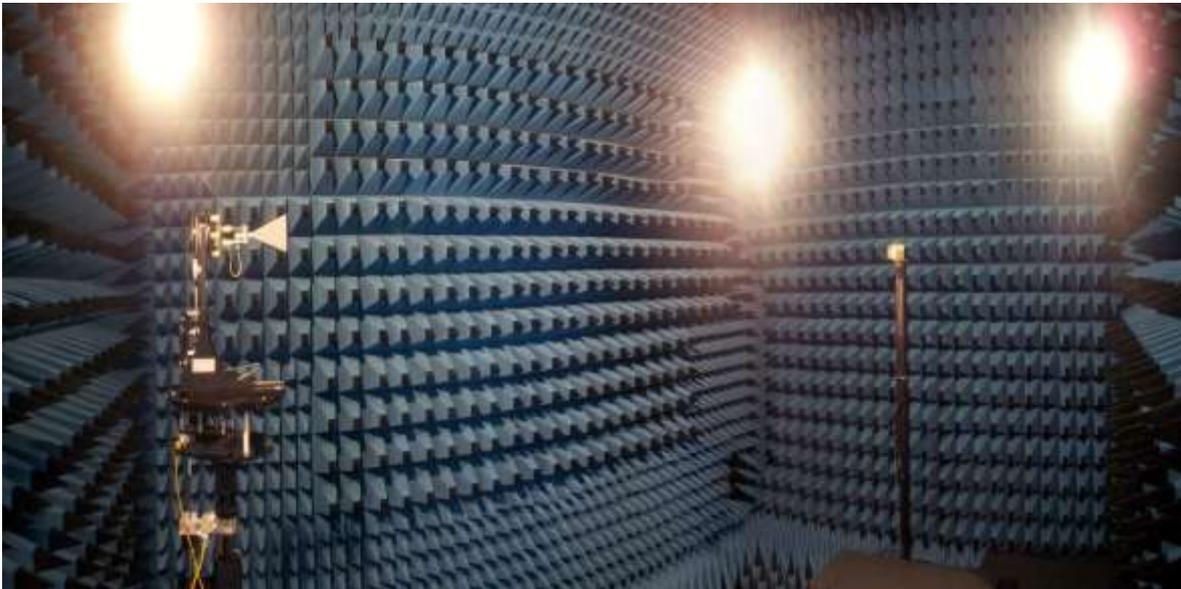


## ***B Medidas en cámara anecoica de la EPS***

Todas las medidas de las distintas etapas de este proyecto han sido realizadas en la cámara anecoica del grupo de investigación RFCAS perteneciente, a la Escuela Politécnica Superior de la UAM.

### **FUNCIONAMIENTO**

Una cámara anecoica es un espacio creado con el fin de aislar completamente las señales de radiofrecuencia exteriores. Proporciona, por medio de una envoltura de material aislante en forma piramidal y unas paredes de recubrimiento metálico, una absorción y aislamiento completo de todo tipo de ondas interferentes en el sistema bajo estudio ajenas a este.



*Figura A.7 Cámara anecoica. Grupo de investigación RFCas*

El aislamiento está basado en el funcionamiento de una jaula de Faraday, el campo electromagnético en el interior de un conductor en equilibrio se anula y también son nulos los efectos de campos externos a él.

El material absorbente interior tiene como única finalidad la de absorber la energía Electromagnética y transformarla en otro tipo de energía, generalmente en calor. Estos materiales absorbentes son de espuma de poliuretano cargada con partículas de carbón, y su geometría piramidal está diseñada para obtener una transición suave entre el aire y el poliuretano dopado. Gracias a esta construcción, la industria utiliza este tipo de cámaras para la caracterización de toda clase de elementos radiantes, así como sus interacciones con otros sistemas de su entorno de trabajo.

**ELEMENTOS UTILIZADOS EN LA CÁMARA ANECOICA**

Como se muestra en el siguiente esquema, el montaje que se utilizó para las distintas medidas realizadas en la cámara anecoica está formado por distintos equipos:

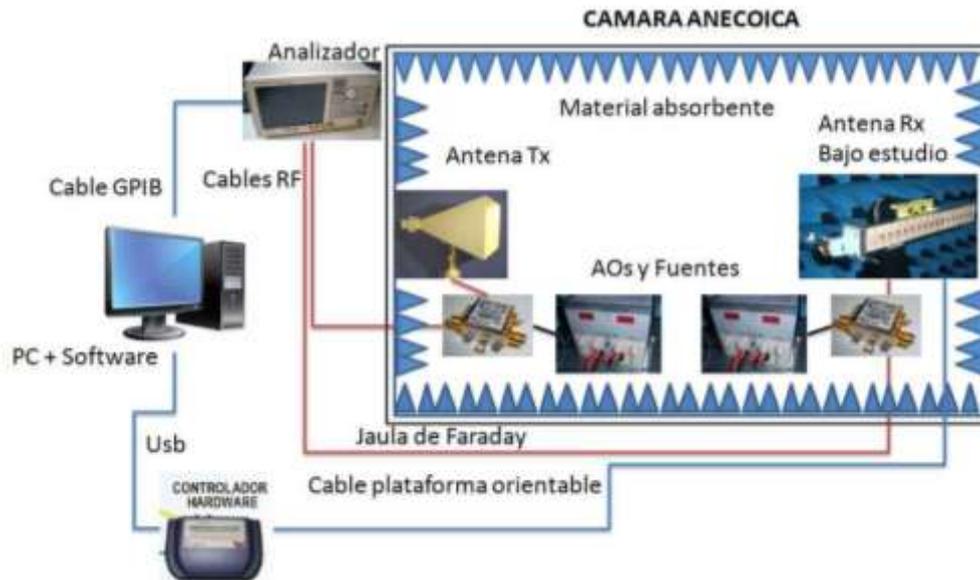


Figura A.8 Dibujo esquemático del funcionamiento de la cámara anecoica

Se puede distinguir entre el equipamiento interno y externo a la cámara anecoica: el equipamiento interno dispone de antena transmisora y receptora, amplificadores de señal acoplados a cada antena y fuentes que suministran la potencia necesaria a estos amplificadores; en el equipamiento externo se dispone del sistema de adquisición de datos, como son el controlador de la plataforma orientable, el analizador de redes y el controlador del hardware.

- **Analizador de redes Agilent E5071C:** equipo que realiza la medición automática tanto de la ganancia de la antena bajo estudio, como el patrón de radiación, directividad e impedancia así como multitud de datos relacionados con ondas de RF. Este analizador puede realizar barridos en frecuencia de 300KHz a 20GHz, lo cual es muy útil para anchos de banda muy altos.



Figura A.9 Analizador de redes Agilent E5071C propiedad de la EPS

- **Kit de calibración del analizador de redes Agilent 85052D:** la calibración del analizador de redes, es un punto muy importante a tener en cuenta a la hora de realizar cualquier tipo de medidas.

El entorno de trabajo es cambiante debido a que los dispositivos que se conectan al analizador de redes, como cables, conectores, etc. No son los mismos propiamente dichos, en cuanto a pequeñas variaciones de la impedancia inducidas por la temperatura ambiental, o simplemente la forma que adoptan los cables al instalar el dispositivo que se quiere medir. Por ello se necesita instalar el sistema y calibrarlo de acuerdo a estas condiciones particulares.



Figura A.10 Kit de calibración Agilent 85052D Economy para coaxial.

Para esta calibración, se utiliza el kit de calibración que consta de una serie de terminaciones para cada puerto bajo estudio conectadas a los cables correspondientes, que el sistema reconoce. Las terminaciones que se encuentran en este kit son: circuito abierto (OPEN), cortocircuito (SHORT), y carga de  $50 \Omega$  (LOAD). También, para medidas con dos puertos, es necesaria la calibración en traspaso de potencia entre puertos (Thru).

- **Cables de medida flexibles Agilent 85131E/F/H:** los cables que se utilizan en el laboratorio para las medidas de los parámetros S fuera de la cámara anecoica, son unos cables flexibles de 3,5mm con conectores NMD.



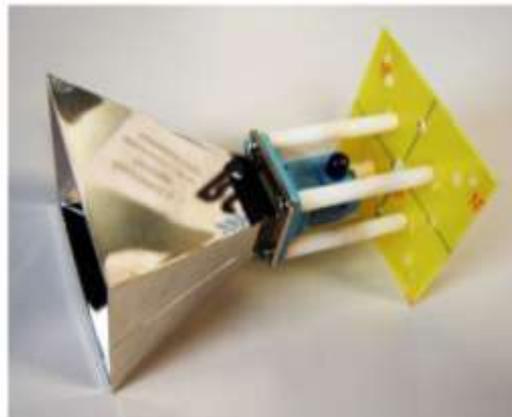
Figura A.11 Cables de medida RF Agilent 85131E/F/H con conectores NMD de 3,5 mm.

- **Sistema de medida de antenas DAMS 6000:** consta de una plataforma giratoria en la que se colocan las antenas a medir, un controlador hardware para mover la plataforma y una serie de cables RF de precisión, accesorios y herramientas para montar el sistema completo. Este sistema es ideal para medir antenas de pequeño tamaño.



*Figura A.12 Sistema DAMS 6000 para soporte de antenas*

- **Antena de Bocina piramidal:** como las medidas se realizan a una determinada frecuencia de trabajo, se necesita que la antena que se utiliza como sonda disponga de esa misma frecuencia. Por ello y dado que la frecuencia de trabajo de la antena de este PFC es de 11 a 12GHz, se escoge esta antena de bocina piramidal cuyo ancho de banda es de 8 a 12GHz.



*Figura A.13 Antena de bocina piramidal utilizada como sonda de 8 a 12 GHz. Incluye una transición guía-coaxial y un soporte para la torre.*

- **Software Antenna Measurement Studio:** software de medida de antenas encargado de controlar la plataforma giratoria DAMS 6000. Se conecta al

analizador de redes y lo maneja para realizar la medida y obtener el diagrama de radiación.

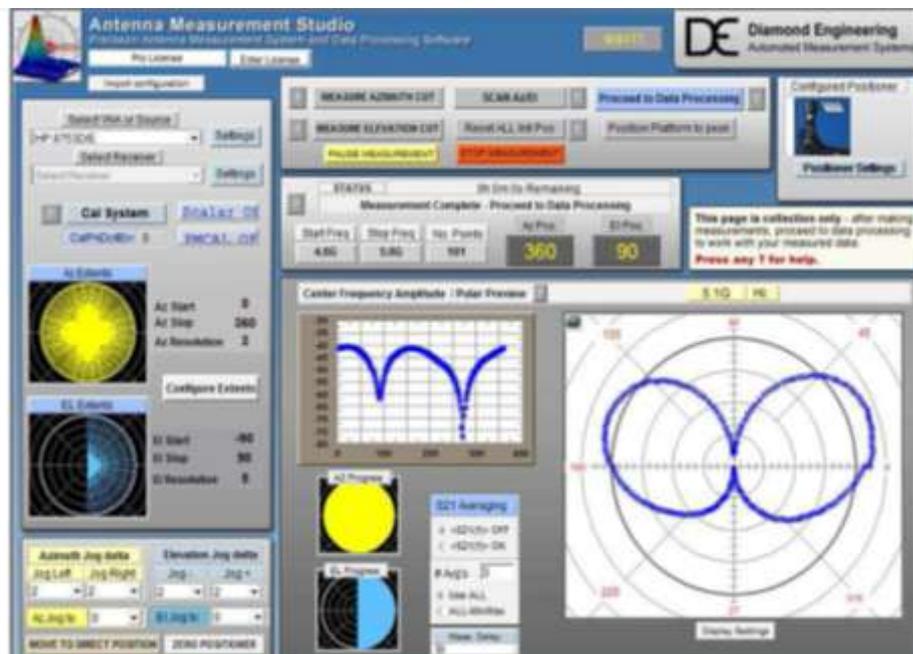


Figura A.14 Entorno de trabajo de AM studio

- **Amplificadores operacionales Mini-Circuits ZX60-24-S+:** en el montaje interior de la cámara anecoica es necesario proporcionar una amplificación de la señal de RF, ya que dentro de la misma, se producen multitud de pérdidas por la radiación y por la longitud de los cables de medidas. Se utilizan unos amplificadores cuya frecuencia de trabajo englobe la frecuencia de trabajo de la antena bajo estudio, en este caso amplificadores de Mini-Circuits de 5 a 20GHz.



Figura A.15 Amplificador de señal de radiofrecuencia

- **Fuente de alimentación externa Promax FAC-662B:** las fuentes de alimentación son necesarias para suministrar potencia a los amplificadores, y alimentar la parte de corriente continua de los controles paralelo y serie.
- **Mixed signal osciloscope:** el osciloscopio MSO-X 3014A es un aparato de señal mixta que tiene dos tipos de entradas, cuatro entradas de los canales analógicos, y un total de dieciséis canales digitales. Estas mediciones se adquieren con una sola base de tiempo, que son vistos en una sola pantalla.



*Figura A.16 Osciloscopio MSO-X 3014A*

### **PROCESO DE MEDIDA EN CÁMARA ANECOICA**

A continuación se explica el proceso completo de medida, de una manera generalizada, pero comentando las particularidades de las medidas de este PFC.

1. Antes de realizar la primera medida, es necesario encender la alimentación de los amplificadores, y permitir que su funcionamiento se estabilice esperando un tiempo entre 30 y 40 minutos.
2. Seleccionar la sonda adecuada en función del rango de frecuencias de trabajo y colocarla en la polarización a medir (horizontal o vertical).
3. Situar la otra bocina de calibración y posicionar correctamente a plataforma en la posición de 0°. Fijar esta posición en el software de control DAMS.
4. Situar la antena a medir y comprobar la componente y colocación de la antena a medir, según el corte deseado de ' $\phi$ '. Cerrar las puertas de la cámara.

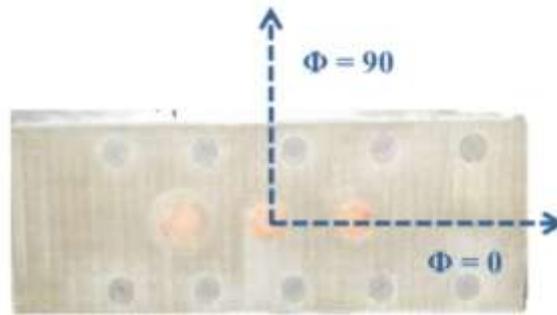


Figura A.17 Convenio para la colocación del array

5. Configurar el analizador de redes: rango de frecuencias, número de puntos y parámetro de medida. Para realizar medidas de radiación en la cámara anecoica, o es necesario calibrar el equipo mediante uno de los kit de calibración del laboratorio.
6. Iniciar el software de medida y encender el controlador hardware. En el software de medida seleccionar el analizador de redes, el tipo de rotación (horizontal o vertical en función de la medida a realizar) y el número de puntos (precisión de rotación).

Durante la medida, el software maneja el analizador de redes (a través de la placa GPIB) generando señales de RF y realizando medidas del parámetro deseado ( $S_{12}$  o  $S_{21}$  seleccionado previamente) por cada punto de rotación y en el rango de frecuencias elegido. Asimismo, el propio software controla el giro de la plataforma a través del controlador hardware, tomándose así las medidas oportunas en cada punto. Al finalizar, se obtiene el diagrama de radiación para cada una de las frecuencias elegidas que puede ser exportado en diferentes formatos.



## *C Planos de mecanizados y circuitos impresos*

### **PARTES METÁLICAS**

Todas las modificaciones realizadas sobre los soporte antiguos han sido realizadas de forma interna a la UAM en el taller de mecanizado de la EPS. La tapa de aluminio para el tercer prototipo ha sido realizada íntegramente en el taller de la EPS.

Todas las piezas están realizadas en aluminio:

- Re mecanizado de chasis de aluminio para las placas de evaluación.
- Re mecanizado de tapa de aluminio como chasis para circuito de 6 conectores.
- Tapa de aluminio como chasis para circuito de 3 conectores.

### **CIRCUITOS IMPRESOS**

Todas las placas construidas en este PFC han sido hechas internamente en el taller de circuitos impresos de la EPS, mediante los procesos de construcción descritos a lo largo de esta memoria.

Las placas fabricadas han sido las siguientes:

- Placas de evaluación. Fabricadas con RF-35 0.508 mm.
- Placa de circuito de tres desfasadores y parches independientes. Fabricadas con RF-35 0.508 mm.
- Placa de circuito conjunto de tres desfasadores y parches independientes. Fabricadas con RF-35 0.508 mm.
- Placa de parches superiores. Fabricada con RF-35 de 0.508 mm.
- Placas de soporte para cámara anecoica. Fabricada con RF-4 de 1.6 mm.

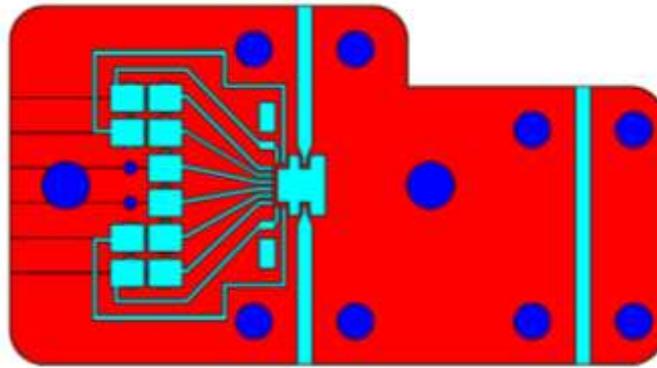


Figura A.19 Circuito de evaluación



Figura A.18 Kit de calibración TRL. Line (Superior), Thru (Inferior izquierda) y CA (Inferior derecha)

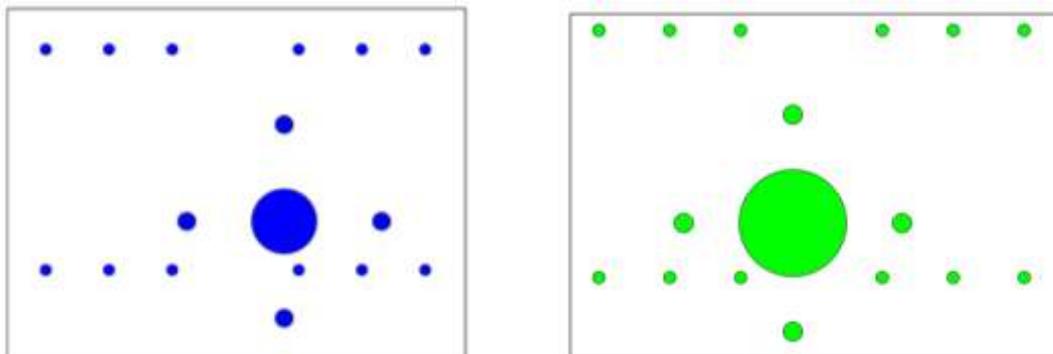


Figura A.20 Soportes para cámara anecoica. Circuitos independientes (Izquierda) y circuito conjunto (Derecha)

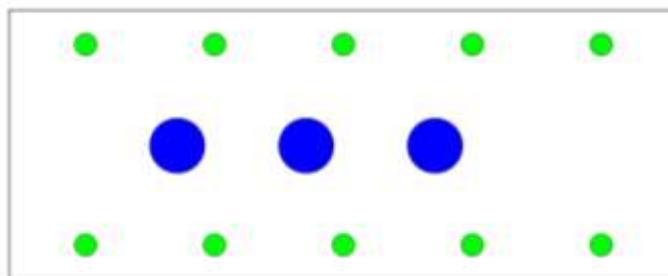


Figura A.21 Parches superiores

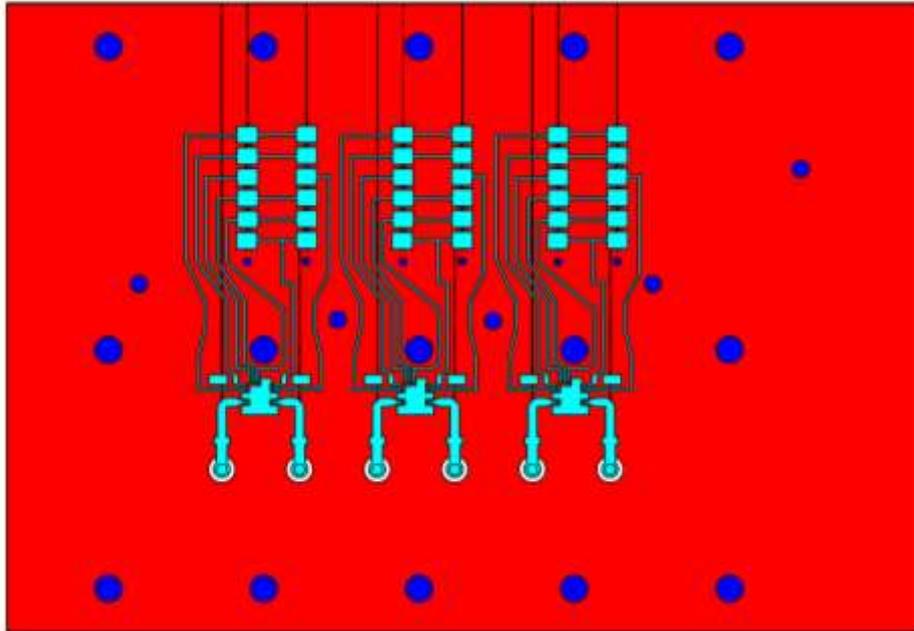


Figura A.22 Circuito de tres desfasadores y tres parches independientes

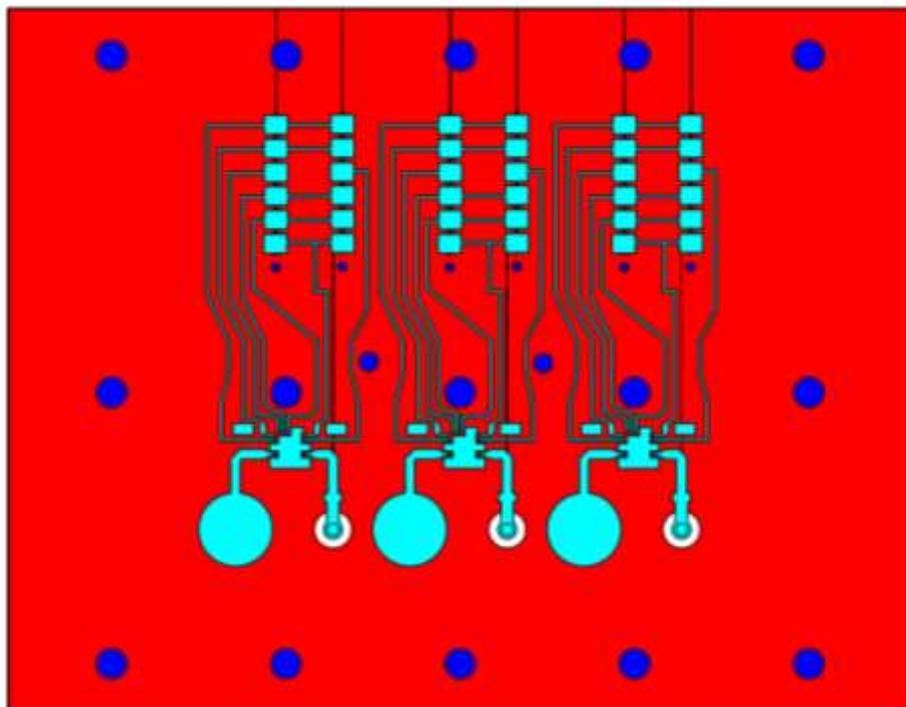


Figura A.23 Circuito conjunto de tres desfasadores y tres parches. Circuito original sin el error de 0.6mm

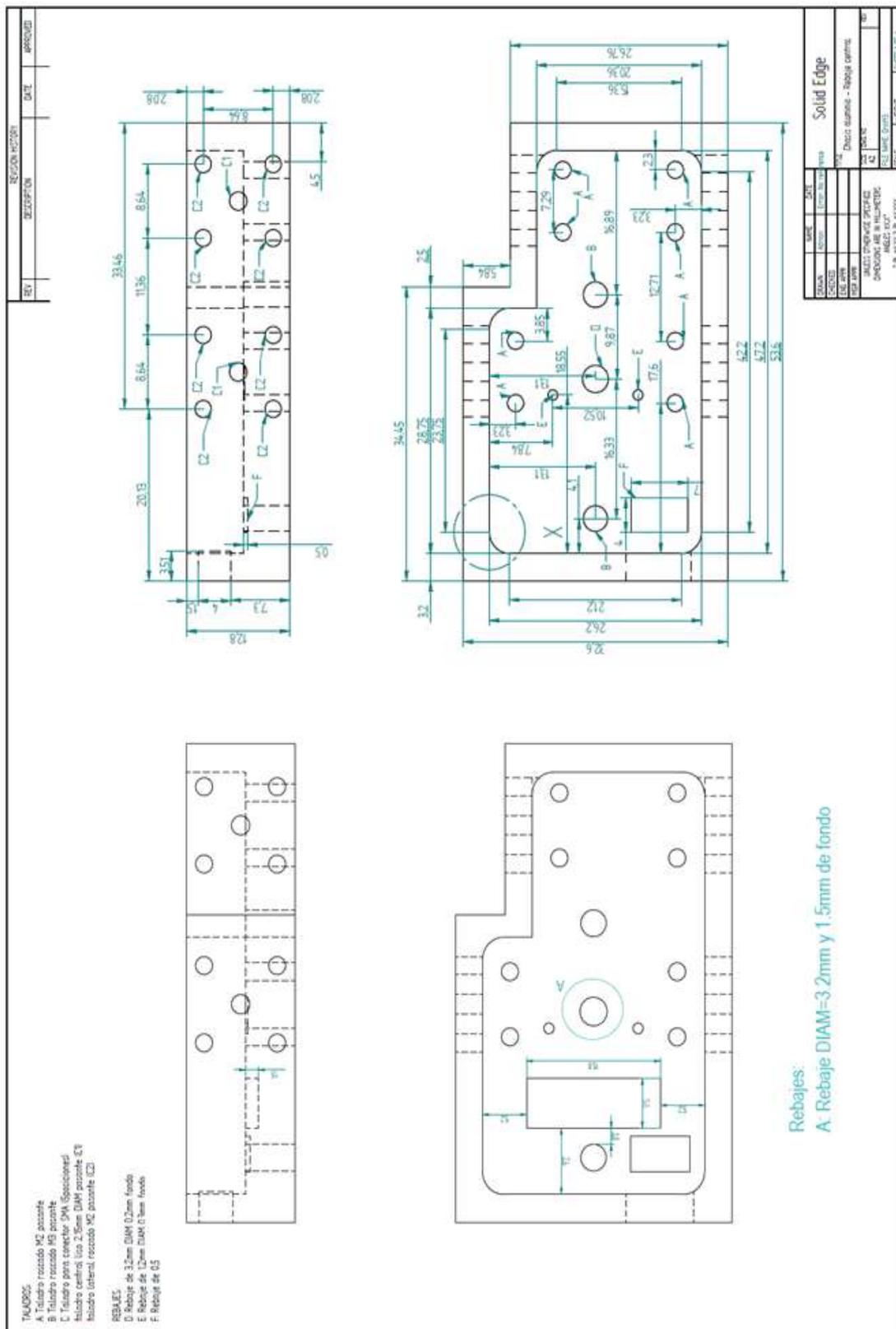


Figura A.24 Chasis de soporte para circuito de evaluación



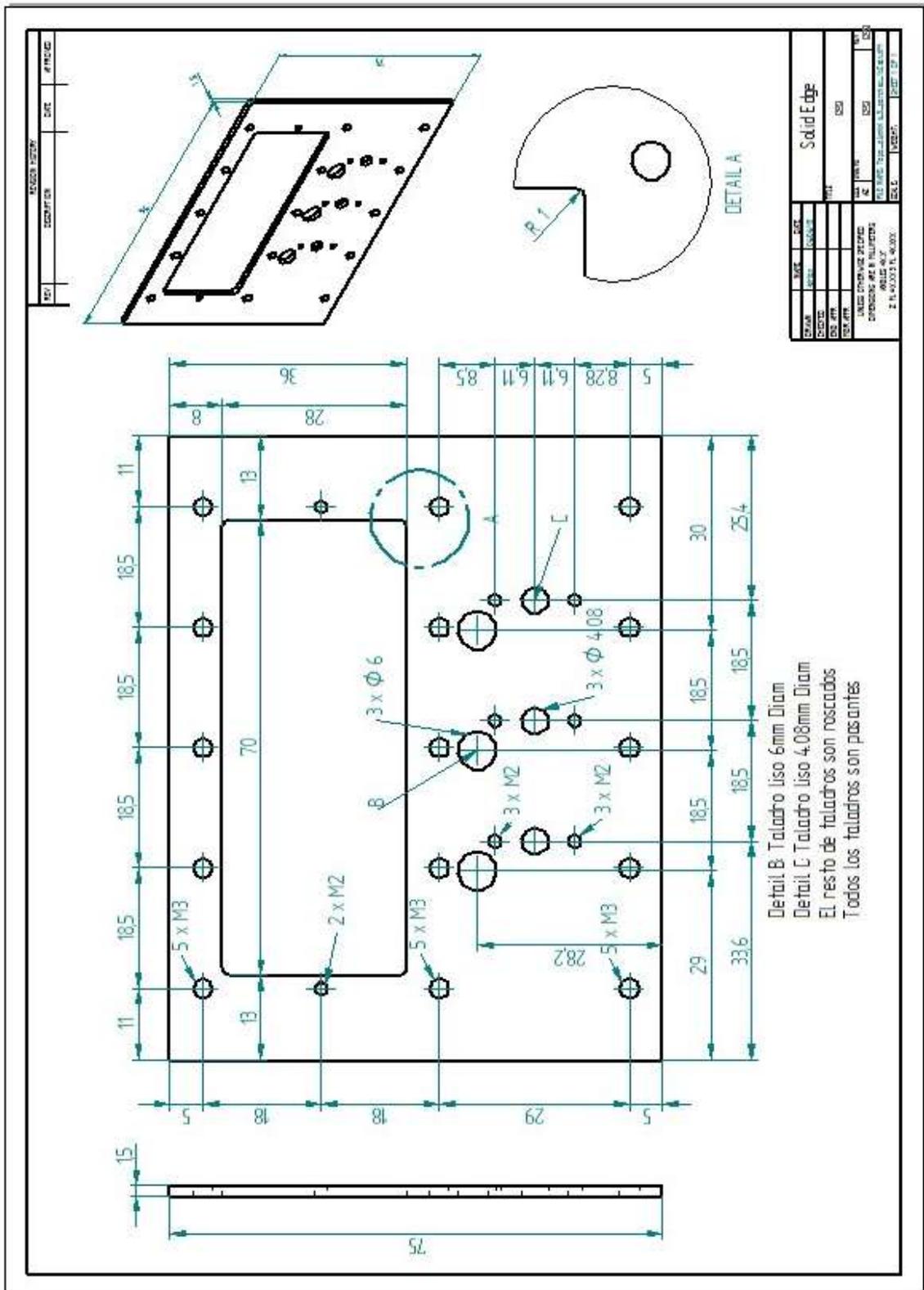


Figura A.26 Soporte para circuito conjunto de tres desfasadores y tres parches. Plano original sin el error de 0.6 mm

## *D Manual de instalación del interfaz*

En este anexo se describe con detalle los pasos necesarios para instalar y utilizar el interfaz, desarrollado en el HTCclub, para el control digital de los arrays de desfasadores de tres y dieciséis elementos.

Es importante destacar que para poder ejecutar el archivo “Control Antena.jar”, que contiene el interfaz en cuestión, en un PC distinto del utilizado para desarrollarlo, es necesario disponer de la misma versión de Java utilizada durante el desarrollo del interfaz, y por lo tanto, la modificación de este software es un paso importante de la instalación.

### **1. Instalación de la versión de Java necesaria.**

La opción más sencilla es modificar la versión de Java existente. Para ello es necesario sustituir los subcarpetas de la carpeta “C:\Program Files\Java”, o “C:\Program Files\Java” según el sistema operativo, por las que se encuentran en la carpeta del interfaz, denominados como “jdk1.8.0\_45” y “jre1.8.0\_45”.

Comprobar que la carpeta “bin” dentro de “jre1.8.0\_45” contiene el archivo “win32com.dll”. Y que la carpeta “lib” dentro de “jre1.8.0\_45” contiene las librerías necesarias: “comm.jar”, “comm 2-0.jar” y “rxtx-2.1.7.jar”.

### **2. Conectar la placa de control serie.**

Al utilizar el interfaz, ya no es necesario utilizar la placa AVR, y por tanto, la placa serie se conecta directamente a un puerto USB del PC a través de su propio conector USB y un cable adecuado.

### **3. Actualizar controlador de dispositivo.**

Una vez el sistema LUFA sea reconocido, es necesario actualizar los drivers controladores de este dispositivo.

Para ello se accede al sistema LUFA a través del panel de control, y se seleccionan sus propiedades. “cambiar configuración” → “Actualizar controlador”

Para actualizar los drivers controladores de este dispositivo **NO** se debe seleccionar la búsqueda en línea, el su lugar, se selecciona la ruta hasta el archivo “LUFA VirtualSerial.inf” dentro de la carpeta del interfaz, como se puede observar en la imagen a continuación.

**NOTA:** *El único sistema operativo sobre el que se ha probado este procedimiento es Windows 7, y no se garantiza ninguna funcionalidad fuera de este entorno.*

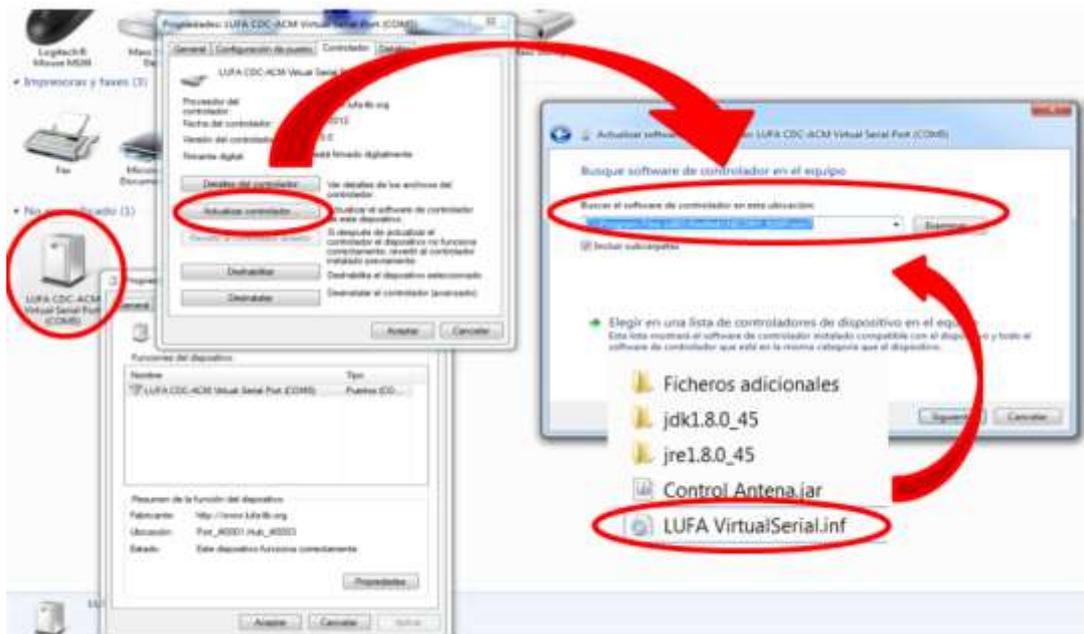


Figura A.0.27 Proceso de actualización de controladores para sistema LUFA

#### 4. Iniciar interfaz

Si la versión de Java se ha modificado correctamente, simplemente se requiere ejecutar el archivo “Control Antena.jar”

#### 5. Seleccionar el puerto correcto para el sistema LUFA

El PC reconoce el sistema LUFA, y le denomina con una terminación de tipo “COM” y un número variable según el PC. Esta denominación se debe seleccionar en el interfaz, como se ve en la imagen.

Es importante destacar que la nomenclatura “desfasador 1” del interfaz, se refiere a aquel elemento de array que recibe la señal desde la cinta de cables de control por primera vez.

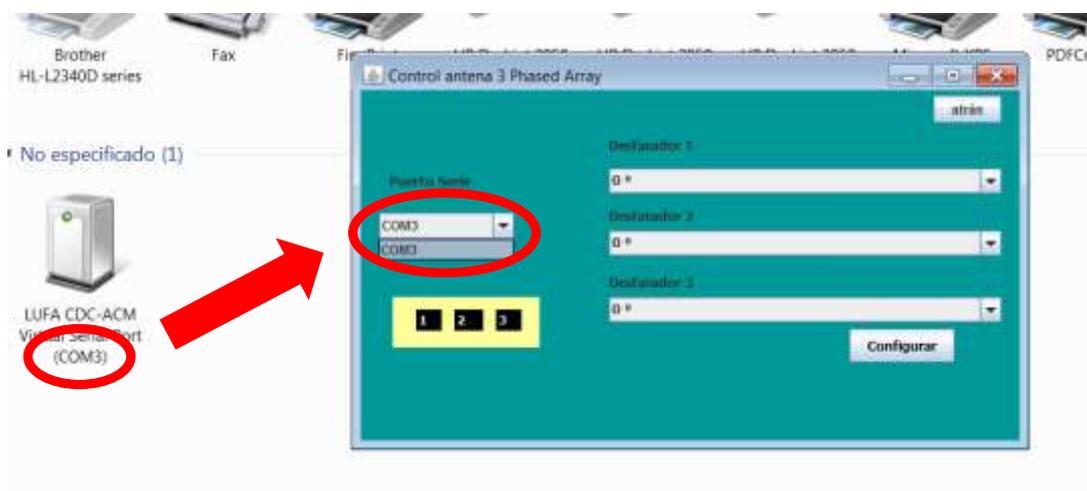


Figura A.28 Selección de nomenclatura “COM” para el interfaz

# PRESUPUESTO

<b>1) Ejecución Material</b>	
• Compra de ordenador personal (Software incluido).....	2.000 €
• Material de oficina.....	200 €
• Material para fabricación de prototipos	
➤ Conectores SMA .....	150 €
➤ Transiciones SMA.....	120 €
➤ Sustrato de circuitos impresos.....	450 €
➤ Componentes electrónicos.....	300 €
➤ Mecanizados en aluminio.....	150 €
• Alquiler de maquina fresadora durante 1 mes.....	4500 €
• Medidas con el analizador de redes durante 20 h.....	1200 €
• Medidas en cámara anecoica durante 30 h.....	4000 €
 Total de ejecución material .....	 13070€
<b>2) Gastos generales</b>	
• 16 % sobre Ejecución Material .....	2091 €
<b>3) Beneficio Industrial</b>	
• 6 % sobre Ejecución Material .....	785 €
<b>4) Honorarios Proyecto</b>	
• 1700 horas a 15 € / hora .....	25500 €
<b>5) Material fungible</b>	
• Gastos de impresión .....	200 €
• Encuadernación .....	10 €
<b>6) Subtotal del presupuesto</b>	
• Subtotal Presupuesto .....	41656 €
<b>7) I.V.A. aplicable</b>	
• 21% Subtotal Presupuesto.....	8747.76 €
<b>8) Total presupuesto</b>	
• Total Presupuesto .....	50403.76 €

Madrid, Julio de 2015

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Adrián Cobos de la Cruz  
Ingeniero de Telecomunicación



## PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, “*Integración de desfasadores digitales en un array lineal de parches sobre guía de onda para comunicaciones por satélite DBS*”. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

### Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partidaalzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma,

por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

### **Condiciones particulares**

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya Formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.