



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

– **TELECOM** ESCUELA  
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

Evaluación de conformadores de haz integrados en la  
banda de milimétricas para el diseño de agrupaciones de  
antenas reapuntables electrónicamente

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación

AUTOR/A: Sales Moliner, Carlos

Tutor/a: Herranz Herruzo, José Ignacio

Cotutor/a: Ferrando Rocher, Miguel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



## Resumen

El desarrollo de antenas reapuntables electrónicamente para comunicaciones por satélite en la banda de milimétricas es de gran interés en la actualidad y se espera seguirá siendo de especial relevancia en las próximas décadas. El objetivo de estos dispositivos es proporcionar conexión de banda ancha en aquellas áreas geográficas que no alcancen las redes terrestres. Estas antenas son realizables gracias al desarrollo de una nueva generación de circuitos integrados de radiofrecuencia (RFICs) en la banda de milimétricas que realizan la función de conformadores de haz. Mediante estos sistemas se pueden alimentar los elementos de la agrupación de antenas con la amplitud y fase requerida para conformar el haz y seguir adecuadamente al satélite, manteniendo la calidad del enlace de forma dinámica. El objetivo de este Trabajo Final de Grado es la caracterización e integración de dos chips comerciales de este tipo, uno para transmisión y otro para recepción. Además, se ha diseñado una agrupación de antenas para validar el funcionamiento de uno de los chips en cámara anecoica. En la última parte del documento se presenta el prototipo y sus potenciales posibilidades para desarrollar un sistema con capacidad de apuntamiento electrónico en la banda de milimétricas.

## Resum

El desenvolupament d'antenes reapuntables electrònicament per a comunicacions satel·litals en la banda de mil·limètriques és de gran interès en l'actualitat i s'espera continuarà sent d'especial rellevància en les pròximes dècades. L'objectiu d'estos dispositius és proporcionar connexió de banda ampla en aquelles àrees geogràfiques que no aconseguen les xarxes terrestres. Aquestes antenes són realitzables gràcies al desenvolupament d'una nova generació de circuits integrats de radiofreqüència (RFICs) en la banda de mil·limètriques que realitzen la funció de conformadors de feix. Mitjançant estos sistemes es poden alimentar els elements de l'agrupació d'antenes amb l'amplitud i fase requerida per a conformar el feix i seguir adequadament al satèl·lit, mantenint la qualitat de l'enllaç de manera dinàmica. L'objectiu d'este Treball Final de Grau és la caracterització i integració de dos xips comercials d'aquest tipus, un per a transmissió i un altre per a recepció. A més, s'ha dissenyat una agrupació d'antenes per a validar el funcionament d'un dels xips en cambra anecoica. En l'última part del document es presenta el prototip i les seues potencials possibilitats per a desenvolupar un sistema amb capacitat de apuntament electrònic en la banda de mil·limètriques.

## Abstract

The development of electronically steerable antennas for satellite communications in the millimeter-wave band is of great interest today and is expected to remain particularly relevant in the coming decades. The goal of these devices is to provide broadband connection in geographical areas that are not covered by terrestrial networks. These antennas are feasible thanks to the advancement of a new generation of millimeter-wave radiofrequency integrated circuits (RFICs) that perform the function of beamformers. Through

---

these systems, the antenna array elements can be fed with the required amplitude and phase to shape the beam and properly track the satellite, dynamically maintaining link quality. The objective of this Final Degree Project is the characterization and integration of two commercial chips of this type, one for transmission and another for reception. Additionally, an antenna array has been designed to validate the operation of one of the chips in an anechoic chamber. The last part of the document presents the prototype and its potential capabilities for developing a system with electronic beamforming capability in the millimeter-wave band.

Quiero agradecerles este trabajo a mis tutores, a Jose Ignacio, Miguel Ferrando y a Bernat por enseñarme y ayudarme. También a mi familia, a mi madre, mi padre y mi hermano por el apoyo incondicional tantos años. Y a mis amigos y compañeros, los de Exo, Caf y Ya Pod, porque aunque de el primer paso, sin ellos no siempre hubiera sabido dar el siguiente.



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Estado del arte . . . . .	1
1.2. Antenas reconfigurables . . . . .	4
1.3. Objetivos . . . . .	6
1.4. Metodología . . . . .	6
<b>2. Caracterización de los chips</b>	<b>8</b>
2.1. Introducción . . . . .	8
2.2. Chip TRHJ-4011 (Rx) . . . . .	9
2.2.1. Materiales y montaje . . . . .	10
2.2.2. Resultados experimentales . . . . .	12
2.3. Chip TRHJ-4041 (Tx) . . . . .	16
2.3.1. Materiales y montaje . . . . .	17
2.3.2. Resultados experimentales . . . . .	17
2.4. Conclusión . . . . .	21
<b>3. Diseño de elementos radiantes</b>	<b>22</b>
3.1. Introducción . . . . .	22
3.2. Diseño de la antena . . . . .	23
3.2.1. Diseño de la celda unidad . . . . .	23
3.2.2. Diseño de la agrupación . . . . .	25
3.2.3. Diseño de una red de alimentación . . . . .	26
3.2.4. Primer diseño . . . . .	28
3.2.5. Segundo diseño . . . . .	29
3.3. Fabricación de la antena . . . . .	31
3.4. Conclusión . . . . .	33
<b>4. Desarrollo del software</b>	<b>34</b>
4.1. Resumen y estructura del código . . . . .	34
4.2. Funcionalidad de la app principal . . . . .	34
4.2.1. Establecimiento de la conexión . . . . .	36
4.2.2. Control de amplitud y fase . . . . .	36
4.2.3. Manipular los Control Registers . . . . .	37
4.2.4. Registro de temperatura . . . . .	37
4.3. Funcionalidad de la app secundaria . . . . .	37
4.4. Instrucciones codificables . . . . .	38
4.5. Funciones del software . . . . .	40

4.6. Uso del software . . . . .	41
4.7. Conclusión . . . . .	42
<b>5. Validación experimental</b>	<b>43</b>
5.1. Introducción . . . . .	43
5.2. Montaje en la cámara anecoica . . . . .	43
5.3. Resultados . . . . .	43
5.4. Conclusión . . . . .	47
<b>6. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>48</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	48
6.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) . . . . .	48
6.3. Líneas futuras . . . . .	49
<b>Bibliografía</b>	<b>50</b>



# Índice de figuras

1.1. Integración de las redes terrestres, aéreas y satelitales [1]. . . . .	1
1.2. Redes no terrestres en una red integrada global [5]. . . . .	3
1.3. Antena y arquitectura para el uso de RFICs en polarización dual circular. [13]. . . . .	5
1.4. Agrupación de 1024 antenas de parche de polarización dual en banda Ka [13].	5
2.1. Chips TRHJ-4011 (Izquierda) y TRHJ-4041 (Derecha) [15] [16]. . . . .	8
2.2. Diagrama de bloques funcional del TRHJ-4011. . . . .	9
2.3. Artículos incluidos en el kit de evaluación. . . . .	10
2.4. Esquema del montaje recomendado en los manuales de los chips. . . . .	11
2.5. Montaje para las medidas del TRHJ-4011. . . . .	12
2.6. Variación de la amplitud en Rx. . . . .	13
2.7. Parámetro $ S_{11} $ en Rx. . . . .	13
2.8. Acoplo entre canales en Rx. . . . .	14
2.9. Punto de compresión a 1 dB en Rx. . . . .	14
2.10. Variación de fase en Rx. . . . .	15
2.11. Comprobación de fase entre canales en Rx. . . . .	15
2.12. Medida Calibrada en Rx. . . . .	16
2.13. Calibración en Rx. . . . .	16
2.14. Diagrama de bloques funcional del TRHJ-4041. . . . .	17
2.15. Montaje para las medidas del TRHJ-4041. . . . .	18
2.16. Variación de la amplitud en Tx. . . . .	18
2.17. Parámetro $ S_{11} $ en Tx. . . . .	19
2.18. Acoplo entre canales en Tx. . . . .	19
2.19. Variación de fase en Tx. . . . .	20
2.20. Medida Calibrada en Tx. . . . .	20
2.21. Calibración en Tx. . . . .	20
3.1. Diferentes tipos de elementos radiantes empleados en los <i>phased-arrays</i> [17].	23
3.2. Diseño del parche. . . . .	24
3.3. Parámetro S11 de la celda unidad. . . . .	25
3.4. Modelo 3D del array de parches. . . . .	25
3.5. Parámetros S activos del array de parches. . . . .	26
3.6. Esquemático del diseño en Microwave Office. . . . .	27
3.7. Modelo 3D de la red de alimentación diseñada. . . . .	27
3.8. Diferencia de fase entre caminos. . . . .	28
3.9. Diagramas de radiación del diseño de parches con red. . . . .	28
3.10. Cortes en Azimut del diagrama de radiación del diseño de parches con guías.	29

3.11. Diseño de los parches invertidos. . . . .	30
3.12. Diagramas de radiación del diseño de parches invertidos. . . . .	30
3.13. Cortes en Azimut del diagrama de radiación del diseño de parches invertidos. . . . .	31
3.14. Captura del software CircuitCAM. . . . .	31
3.15. Captura del software BoardMaster. . . . .	32
3.16. Foto de la antena. . . . .	32
3.17. Parámetros S activos medidos de la antena. . . . .	33
4.1. Interfaz de la app principal. . . . .	35
4.2. Interfaz de la app secundaria. . . . .	35
4.3. Interfaz del programa para comenzar la conexión. . . . .	36
4.4. Interfaz del programa para configurar los canales. . . . .	36
4.5. Interfaz del programa para configurar los canales. . . . .	37
4.6. Panel para controlar la calibración de temperatura. . . . .	37
4.7. Ejemplo de uso de la app secundaria. . . . .	38
4.8. Estructura general de las instrucciones. . . . .	39
4.9. Ejemplo de conexión al chip. . . . .	41
5.1. Fotografía del montaje en el soporte. . . . .	44
5.2. Fotografía de la cámara anecoica. . . . .	44
5.3. Diagramas de radiación de los parches a los extremos de la placa. . . . .	45
5.4. Diagramas de radiación de los parches en el centro de la placa. . . . .	45
5.5. Diagrama de radiación con apuntamientos desde $-60^\circ$ hasta $-20^\circ$ y desde $20^\circ$ hasta $60^\circ$ . . . . .	46
5.6. Diagrama de radiación con apuntamientos entre $-10^\circ$ y $10^\circ$ . . . . .	46

# Índice de Tablas

2.1. Capas de la placa de evaluación. . . . .	9
2.2. Materiales incluidos en el kit de evaluación. . . . .	10
2.3. Medidas para la calibración de la fase en Rx . . . . .	16
3.1. Dimensiones del modelo celda unidad . . . . .	24

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Estado del arte

Los sistemas de telecomunicaciones se han integrado de una forma u otra en la vida cotidiana de cada uno de nosotros, teniendo un innegable impacto tanto en nuestras actividades personales como profesionales. El principio fundamental de las redes 5G, ofrecer conectividad a cualquier persona o cosa en cualquier lugar y en cualquier momento, está gradualmente transformándose en una realidad. El objetivo de estas redes es ofrecer un aumento del ancho de banda móvil, reducción de la latencia y la posibilidad de tener un gran número de dispositivos conectados simultáneamente.

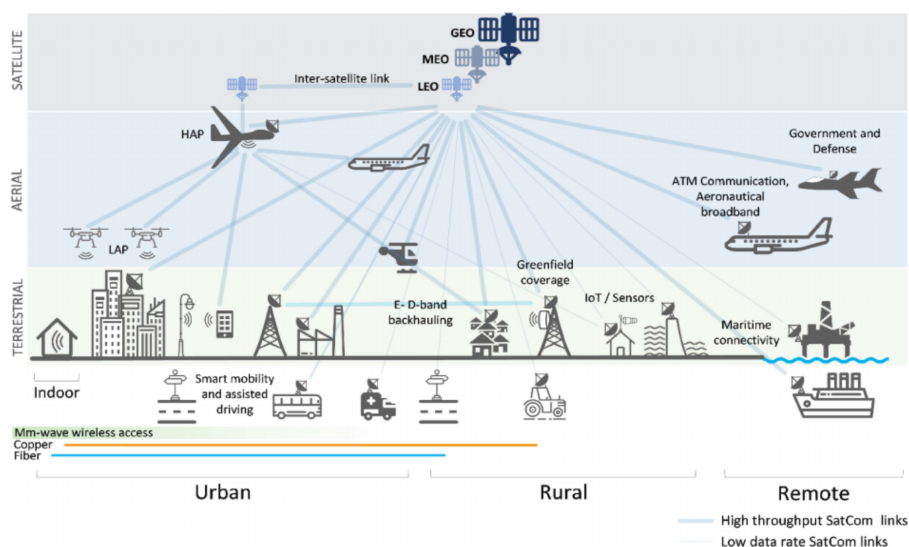


Figura 1.1: Integración de las redes terrestres, aéreas y satelitales [1].

A día de hoy, el espectro electromagnético por debajo de 6 GHz (sub-6) está altamente saturado, por lo que la utilización de frecuencias superiores, por ejemplo a partir de la banda de ondas milimétricas, posibilita un considerable aumento en la velocidad de transmisión de datos.

No obstante, conforme se incrementa la frecuencia, la implementación de estas redes se vuelve más compleja debido a la baja potencia de transmisión y a las elevadas pérdidas de enlace [2]. Por estos motivos, las antenas con haces reconfigurables en la banda de milimétricas surgen como un componente tecnológico esencial para estos futuros sistemas de telecomunicación.

Un ámbito en el que las antenas orientables electrónicamente en la banda de milimétricas tienen grandes posibilidades de destacar es en el de los sistemas de movilidad inteligente y conducción asistida [3]. Las comunicaciones de vehículo a vehículo (V2V), y de vehículo a infraestructura (V2I), en entornos urbanos, pueden facilitar nuevas aplicaciones de información y seguridad vial gracias a comunicaciones de muy reducida latencia, puesto que la información vial puede compartirse en tiempo real y los controladores de tráfico pueden aplicar medidas para evitar atascos y accidentes.

El uso de sistemas de ondas milimétricas se está imponiendo en todos los segmentos de la infraestructura de red. La arquitectura de la red 6G que se está concibiendo actualmente está fuertemente orientada a una infraestructura jerárquica, denominada red heterogénea vertical [1]. Según esta visión, las futuras redes se construyen en tres capas: red terrestre, aérea y espacial (véase la figura 1.1).

Para cumplir con los requerimientos de próximos estándares de comunicaciones inalámbricas en términos de reducida latencia y alta capacidad, es evidente que tecnologías relacionadas con el despliegue masivo de MIMO y ondas milimétricas son de gran interés, y que además, para poder proporcionar conectividad en cualquier lugar en cualquier momento, se necesitan redes satelitales [2]. La prevista red 6G hará uso de las redes no terrestres (NTN), se extenderá en tres dimensiones y conectará los satélites, los aviones, los barcos y las infraestructuras terrestres, proporcionando una cobertura verdaderamente global, incluso hacia el espacio exterior cercano. La singularidad de las NTN radica en su capacidad para proporcionar conectividad en las regiones que son caras o difíciles de cubrir con redes terrestres, como los entornos urbanos [4]. Además, a diferencia de las comunicaciones terrestres, potencialmente sujetas a interrupciones del servicio, las redes NTN garantizan la continuidad del servicio. Por último, estas redes permiten la escalabilidad del servicio para desviar el tráfico de las redes terrestres durante las horas de mayor actividad.

En este contexto, la red 5G/6G habilita una convergencia de las diferentes tecnologías inalámbricas, que beneficia en gran medida el desarrollo de nuevas y ambiciosas constelaciones de satélites de órbita terrestre baja (LEO) o de órbita terrestre media (MEO) [6]. Estas redes pueden proporcionar servicios de banda ancha con una latencia muy baja, gracias a la reducida altitud de las órbitas. Debido al gran potencial de una comercialización global de servicios con cobertura universal, muchas empresas privadas han anunciado la creación de sus propias constelaciones. Destaca la red Starlink de SpaceX, que tiene previsto lanzar unos 42000 satélites a diferentes altitudes, además de otras constelaciones planificadas por OneWeb, Telesat o Amazon [6]. Con los miles de satélites que se lanzarán en los próximos años, estas constelaciones serán, con diferencia, la mayor flota de satélites jamás desplegada, y se espera que ofrezcan una oportunidad de mercado única para el sector de los satélites. Esto supone un estímulo excepcional para el desarrollo de nuevas antenas reconfigurables en la banda K/Ka. A este respecto, los terminales SatCom LEO tienen, por lo general, unos requisitos menos estrictos en términos de PIRE, G/T y rango

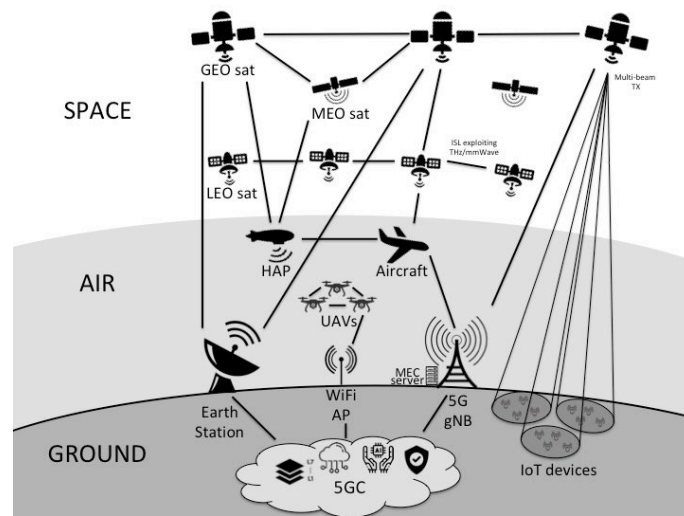


Figura 1.2: Redes no terrestres en una red integrada global [5].

de apuntamiento que sus homólogos GEO, lo que se traduce en una reducción significativa del coste y del tamaño del terminal de usuario.

Además de lo anterior, estas recientes redes de satélite posibilitan una nueva gama de aplicaciones que no requieren una tasa de datos muy elevada, relajando aún más los requerimientos de relación señal a ruido y, por tanto, el tamaño de antena y los requisitos de seguimiento. Por ejemplo, las industrias, las actividades de generación de energía o la práctica de la agricultura, que suelen operar en zonas escasamente pobladas, pueden beneficiarse de los enlaces SatCom LEO. Otro sector en el que los servicios LEO SatCom tendrán un fuerte impacto es el relacionado con el Internet de las cosas (IoT). Un número cada vez mayor de sectores industriales, como el transporte y la logística, la energía, la agricultura, la sanidad, la extracción de recursos naturales y el sector marítimo, adoptarán tecnologías IoT. Uno de los principales inconvenientes de los satélites LEO es el elevado coste de despliegue asociado al gran número de satélites. En este contexto, los satélites SatCom MEO representan un buen compromiso entre latencia y complejidad. Así, los ecosistemas SatCom LEO, MEO y GEO, dan lugar a una infraestructura estratificada, dirigida a diferentes tipos de aplicaciones y segmentos de mercado.

La nueva jerarquía integrada vertical se complementa con las redes aéreas, formadas por nodos de red sobre dirigibles, globos o vehículos aéreos no tripulados (UAV), situados a diferentes alturas. Esta nueva capa combina algunas de las ventajas de los sistemas de comunicación terrestre y por satélite, y puede ofrecer conexiones inalámbricas de banda ancha a bajo coste. Las plataformas de gran altitud (HAP) son nodos de red situados en la estratosfera, a una altura de 20 km. Con los avances de las tecnologías de paneles solares, materiales compuestos y antenas, su despliegue y mantenimiento en las futuras redes será no sólo económicamente viable, sino en algunos casos más conveniente que las redes terrestres [7].

Sin embargo, este tipo de red plantea nuevos retos tecnológicos. Excepto los satélites GEO, los demás son plataformas móviles, lo que exige terminales de usuario con antenas de haz reconfigurable. Además, la proliferación de redes no terrestres aumentará la tendencia

a emplear frecuencias de enlace cada vez más altas. Desde este punto de vista, se puede esperar que se alcance una convergencia tecnológica en torno a antenas de alta ganancia con dirección electrónica del haz, las cuales se antojan como una de las tecnologías facilitadoras clave para las redes de comunicaciones de nueva generación. Una de las características que más condicionan el diseño de los sistemas radiantes es la banda de frecuencias de operación. Así, en los enlaces tierra-satélite, existe una gran separación espectral entre el trayecto ascendente y descendente, por lo que se suelen emplear antenas separadas en las bandas K/Ka, una para cada sentido de comunicación.

## 1.2. Antenas reconfigurables

En los últimos años, el desarrollo de antenas reapuntables para aplicaciones SOTM (Satellite Communications-On-The-Move) en la banda Ka ha sido un reto tecnológico perseguido por el sector industrial y académico. La razón es que las prestaciones exigidas a estos terminales son extremadamente exigentes: bajo perfil, alta ganancia (cercana a 40 dBi) y eficiencia de radiación, capacidad de cambiar el signo de la polarización circular (RHCP/LHCP), anchos de banda de 2 GHz o incluso 3.5 GHz y, por supuesto, libertad para dirigir el haz hacia el satélite en un amplio rango angular ( $360^\circ$  en acimut y  $5^\circ$ - $90^\circ$  en elevación).

Los terminales más extendidos hasta esta década se han basado en reflectores parabólicos con apuntamiento mecánico, con un elevado peso, e instalados en aviones de largo alcance, barcos, trenes o vehículos de emergencia. Dentro de esta categoría de antenas con seguimiento mecánico completo también estarían las agrupaciones de bajo perfil, las cuales posibilitan una reducción del volumen ocupado.

Una alternativa a estas soluciones, aún demasiado voluminosas, consiste en controlar el apuntamiento en elevación mediante el movimiento de pequeñas partes internas, de tal forma que la antena se mantiene fija y completamente plana. Este pequeño movimiento o rotación es capaz de controlar el desfase entre los elementos de la agrupación, y con ello redirigir el haz en un plano sin mover la antena [7, 8, 9]. Dentro de esta familia de soluciones se encuentra el desfasador TTD (True Time Delay) mecánico patentado por el grupo de investigación en el cual está enmarcado este TFG, desfasador que ha sido empleado para el diseño de agrupaciones de ranuras reapuntables [10].

Entre las alternativas posibles, la solución más factible se basa en un control del haz completamente electrónico. Existen diversas tecnologías que permiten el ajuste electrónico de las propiedades de una celda unitaria radiante, y en este proyecto se ha recurrido al empleo de RFICs (circuitos integrados de radiofrecuencia) para el control de la amplitud y fase de los radiadores. Este tipo de dispositivos han estado ausentes hasta hace bien poco en los productos industriales y comerciales, debido a su elevado coste, pero la tendencia ha cambiado en los últimos años gracias a la madurez y desarrollo de las tecnologías RF-CMOS y PCB, y a los avances en el empaquetado de los chips. A raíz del trabajo de varios centros I+D sobre RFICs en la banda de milimétricas [11, 12, 13, 14], un buen número de actores industriales han introducido en el mercado soluciones RFIC avanzadas para antenas activas 5G y SatCom, válidas para una conformación de haz analógica y digital.

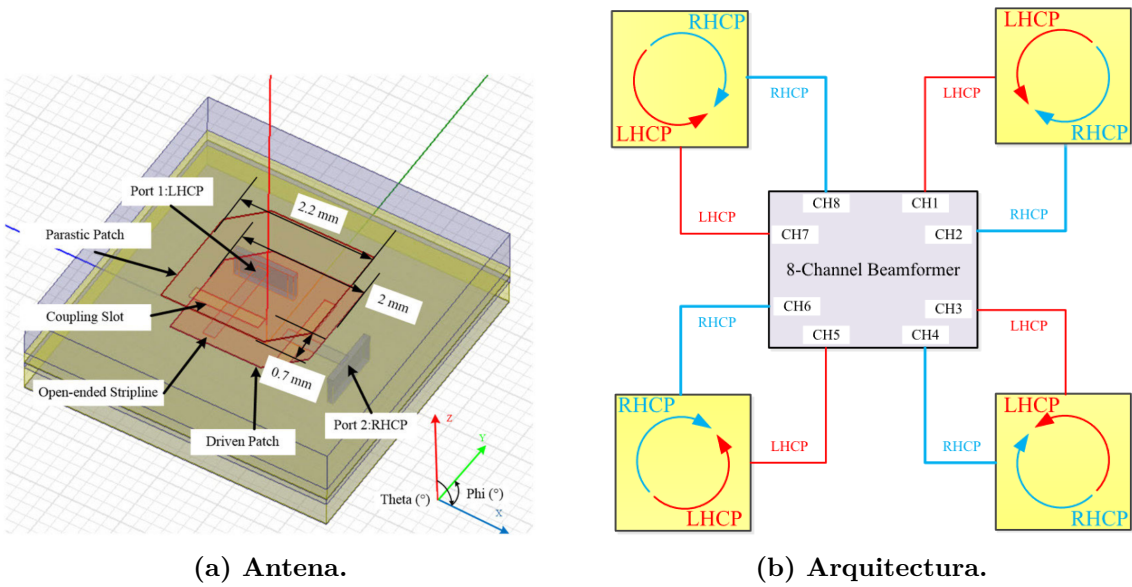
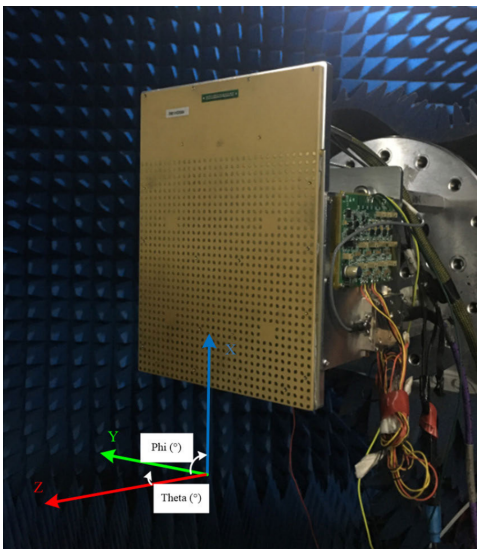
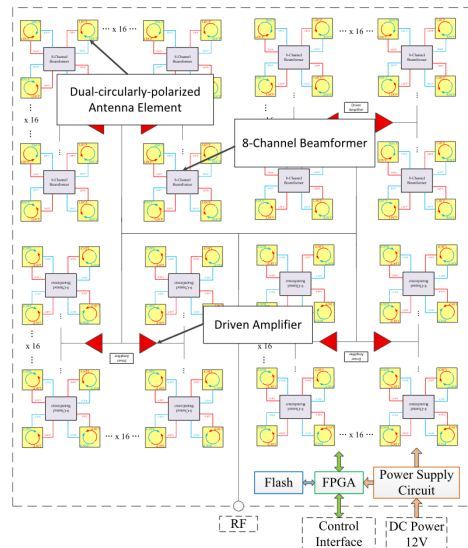


Figura 1.3: Antena y arquitectura para el uso de RFICs en polarización dual circular. [13].

El uso de esta nueva generación de circuitos integrados permite reducir la complejidad de la circuitería de control. La mayor parte de los RFIC disponibles comercialmente son multicanal, de tal forma que cada uno de ellos es capaz de alimentar varios elementos radiantes simultáneamente. Por ejemplo, los RFIC para aplicaciones Satcom suelen disponer de 8 canales, con la finalidad de alimentar 4 radiadores con doble polarización (figura 1.3), ya sea para el terminal de recepción o de transmisión.



(a) Agrupación de 1024 elementos.



(b) Estructura red de alimentación.

Figura 1.4: Agrupación de 1024 antenas de parche de polarización dual en banda Ka [13].



El integrado es capaz de ajustar la amplitud y fase de la señal RF en cada canal de forma independiente. Por otro lado, como ya se ha comentado, los terminales 5G operan en la misma banda en ambos sentidos del enlace, por lo que los RFIC más habituales suelen ofrecer 4 canales bidireccionales. En general, los RFIC proporcionan una potencia máxima de salida entre 10 y 18 dBm [12]. Aunque este valor está limitado tecnológicamente, suele ser suficiente para alcanzar las especificaciones requeridas cuando se consideran todos los radiadores de la apertura. Un ejemplo de estos trabajos es la antena de transmisión de la figura 1.4, donde una agrupación de 1024 antenas de parche reciben señal de radiofrecuencia de los RFICs situados a la otra cara de la antena.

### 1.3. Objetivos

En este contexto, el presente trabajo final de grado investiga en el comportamiento y posibilidades de estas tecnologías, en concreto se ha trabajado con la pareja de chips TRHJ-4011 y TRHJ-4041, producidos por la empresa Chengdu Xphased Technology Co., Ltd. Son dos RFICs diseñados para el control de *phased-arrays*, en las bandas K y Ka respectivamente.

Así pues, para cumplir las metas que propone este trabajo, se pueden distinguir 4 objetivos específicos:

1. Caracterizar los chips mencionados para averiguar sus prestaciones y límites, y en caso de que hubieran problemas, tratar de solventarlos.
2. Desarrollar un software en Matlab con el fin de sustituir el proporcionado por el fabricante y aprender sobre la interfaz de comunicación del chip, ampliando las funcionalidades del software de acuerdo a los intereses de este trabajo.
3. Estudiar la implementación de los *phased-arrays* mediante antenas de parche microstrip, investigando múltiples diseños y métodos de implementación.
4. Validar experimentalmente las características de radiación de una agrupación simple alimentada por uno de los chips conformadores. Este último objetivo supondrá el diseño y fabricación de la agrupación, la configuración del chip mediante el software desarrollado y la medida del conjunto en una cámara anecoica.

### 1.4. Metodología

Los objetivos anteriores se han ido completando de forma secuencial. En cada una de las etapas se ha seguido una metodología distinta:

Para el primer objetivo se han estudiado los manuales y el software proporcionados por XPhased, la empresa distribuidora de los chips. Para las medidas y caracterización de éstos se han usado distintos VNA's (Vector Network Analyzer) en función de la frecuencia de operación. Posteriormente los datos han sido tratados con Matlab mediante el add-on RF Toolbox™.

Para el segundo objetivo se ha desarrollado un software en Matlab usando la herramienta App Designer, tratando de crear una interfaz fácil de usar para un usuario que quiera realizar pruebas con el equipo.

La tercera fase se basa en el aprendizaje del software de simulación electromagnética 3D CST Studio Suite. Se ha estudiado desde el diseño de una celda unidad hasta un array  $1 \times 8$  de parches implementados en tecnología microstrip, para finalmente fabricarlo y probar sus prestaciones.

En cuanto al último objetivo, se han empleado las instalaciones del grupo de investigación donde se enmarca este proyecto, el Antennas and Propagation Lab (APL) del instituto iTEAM de la UPV. Para esta tarea, se ha servido de la ayuda del técnico responsable de las instalaciones utilizadas, en concreto de la cámara anecoica.

## Capítulo 2

# Caracterización de los chips

### 2.1. Introducción

El objetivo de éste capítulo es presentar los resultados de la caracterización de los chips TRHJ-4011 y TRHJ-4041, operativos en las bandas K y Ka respectivamente (para recepción y transmisión), fabricados por Xphased, y contrastar dichos resultados con los parámetros ofrecidos por el fabricante. Para ello, se ha llevado a cabo una campaña de medidas que han permitido evaluar el rendimiento de cada chip en diversas condiciones de operación. Los resultados obtenidos proporcionan información relevante para el máximo aprovechamiento de este componente.

Los chips TRHJ-4011 y TRHJ-4041 (ver figura 2.1) son chips CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) de 8 canales, operativos en los rangos de frecuencia desde 17.5 a 21.4 GHz y 27.2 a 31.4 GHz respectivamente (banda K y Ka). Cada uno ofrece una amplificación variable en cada uno de los canales de hasta 31.5 dB, y un ajuste en fase de 360°, con resoluciones de 6 bits (0.5 dB y 5.625°).

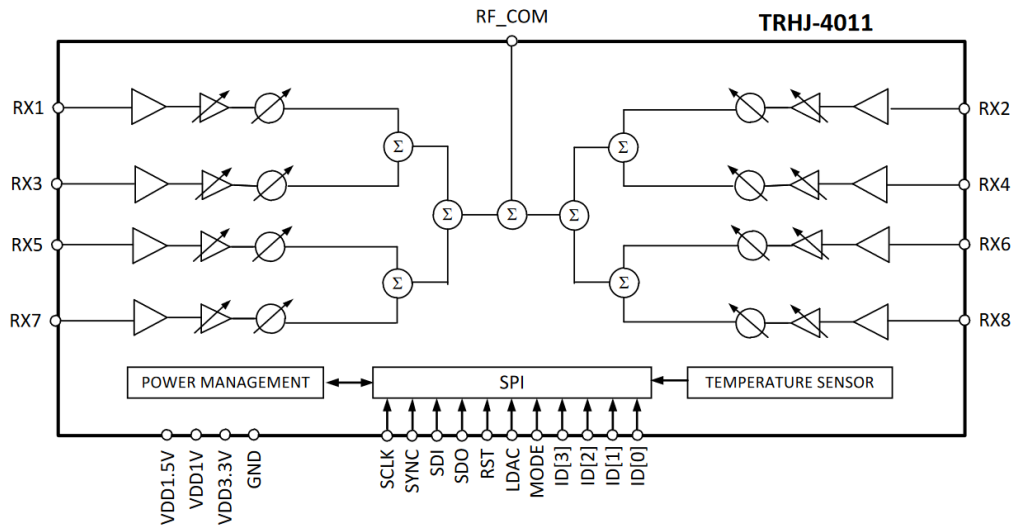


**Figura 2.1:** Chips TRHJ-4011 (Izquierda) y TRHJ-4041 (Derecha) [15] [16].

Para cada chip se hará una introducción de sus características, se presentarán los materiales y métodos usados para la obtención de los resultados y finalmente se cerrará el capítulo con una conclusión.

## 2.2. Chip TRHJ-4011 (Rx)

El chip TRHJ-4011 opera en la banda K, que es la banda de frecuencia típica para enlace descendente en comunicaciones por satélite. La figura 2.2 ha sido extraída del manual del correspondiente chip. En ella se puede apreciar que cada canal pasa por una fase de amplificación fija y por un amplificador y desfasador variables, antes de ser combinados hacia la salida común 'RF\_COM'. El chip también incluye un sensor de temperatura que es posible calibrar desde el software para realizar compensaciones y ajustar el consumo de corriente.



**Figura 2.2:** Diagrama de bloques funcional del TRHJ-4011.

Para cada uno de los chips se dispone de una placa de evaluación proporcionada por el fabricante. Esta placa contiene los chips a evaluar, las líneas RF de entrada y salida y la circuitería de control y alimentación del chip. De acuerdo al manual, la placa está compuesta por 7 capas tal y como se dispone en la tabla 2.1.

No.	Capa	Grosor (mm)	Material
1	Capa para RF	0.035	Cobre
2	Substrato	0.168	Ro4350B
3	Ground	0.035	Cobre
4	Substrato	0.508	Ro4350B
5	SPI y alimentación	0.035	Cobre
6	Substrato	0.168	Ro4350B
7	Ground	0.035	Cobre

**Tabla 2.1:** Capas de la placa de evaluación.

En la capa 1 se encuentra la distribución de las señales de RF, desde los conectores K de cada canal hasta el chip, que las combina hacia 'RF\_COM'. La capa 5 contiene tanto la red de alimentación del chip como la red del SPI (Serial Peripheral Interface), usada

para el control digital. Las capas 3 y 7 actúan de tierra para el aislamiento de la 1 y 5.

Según el manual de este chip, el punto de compresión a 1 dB son -35 dBm en los puertos de entrada (canales) y los coeficientes de reflexión (parámetros  $|S_{ii}|$ ) de los canales y del puerto 'RF\_COM' son -10 dB y -17 dB respectivamente.

### 2.2.1. Materiales y montaje

El kit de evaluación que vende xPhased se muestra en la figura 2.3 (ésta imagen ha sido extraída del manual de usuario). Incluye lo necesario para poder evaluar la funcionalidad de los chips. La tabla 2.2 contiene una descripción de cada uno de los artículos del kit.

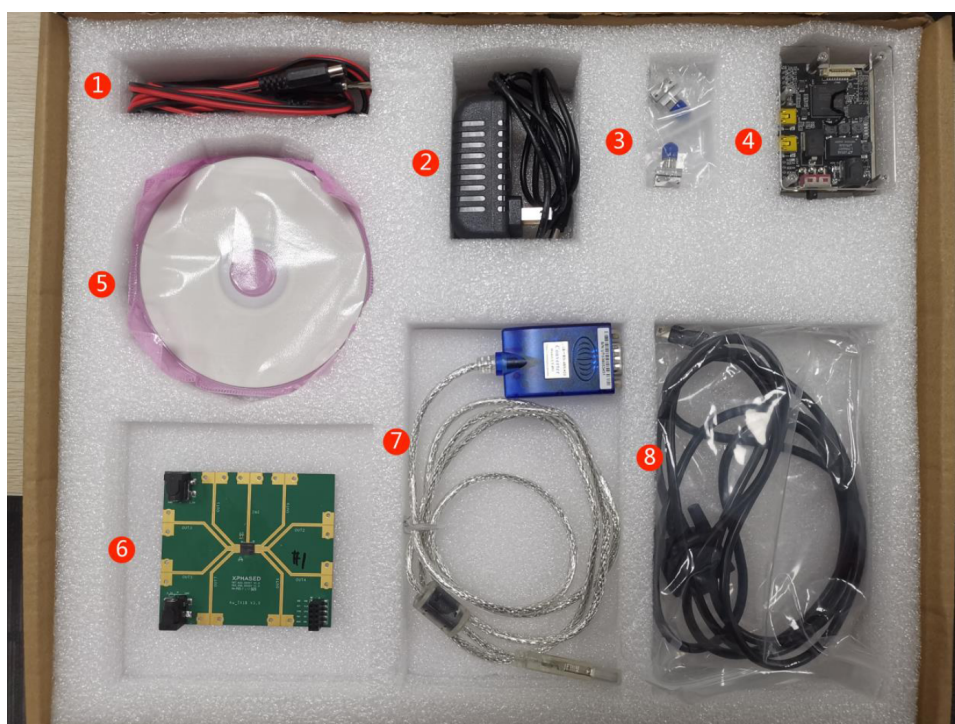
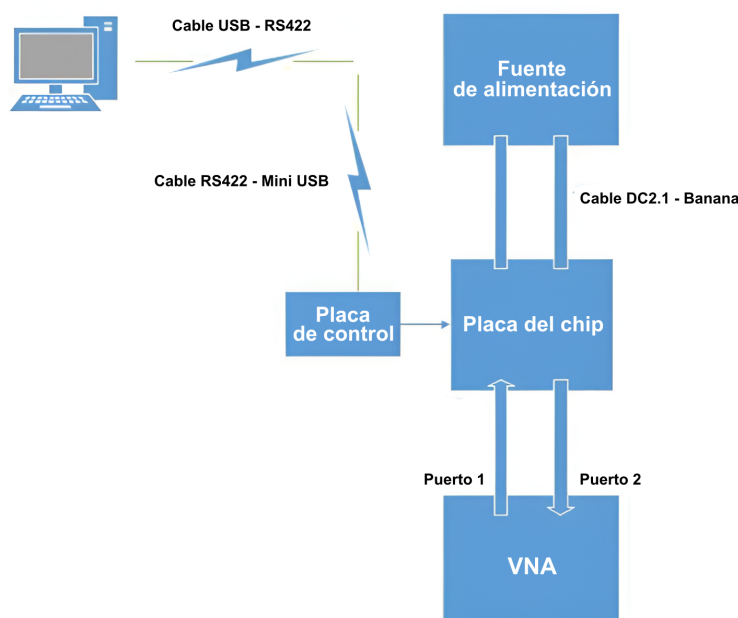


Figura 2.3: Artículos incluidos en el kit de evaluación.

nº	Descripción
1	Cable de alimentación DC2.1 - Banana
2	Alimentación para la placa de control.
3	Conectores para instalar en la placa de evaluación.
4	Placa de control.
5	CD con manuales y programa de instalación del software.
6	Placa de evaluación.
7	Cable USB - RS422
8	Cable RS422 - Mini USB

Tabla 2.2: Materiales incluidos en el kit de evaluación.

Para la toma de medidas y la caracterización de los chips se ha realizado el montaje como queda indicado en el manual de usuario del chip, de donde ha sido extraída la figura 2.4, siguiéndose las instrucciones indicadas.



**Figura 2.4:** Esquema del montaje recomendado en los manuales de los chips.

En el montaje se ha usado un analizador de redes de 2 puertos trabajando desde los 15 GHz hasta los 22 GHz. Para cargar los canales que estuvieran encendidos pero no conectados al analizador, se han usado cargas de  $50\Omega$  para evitar posibles reflexiones y daños al chip.

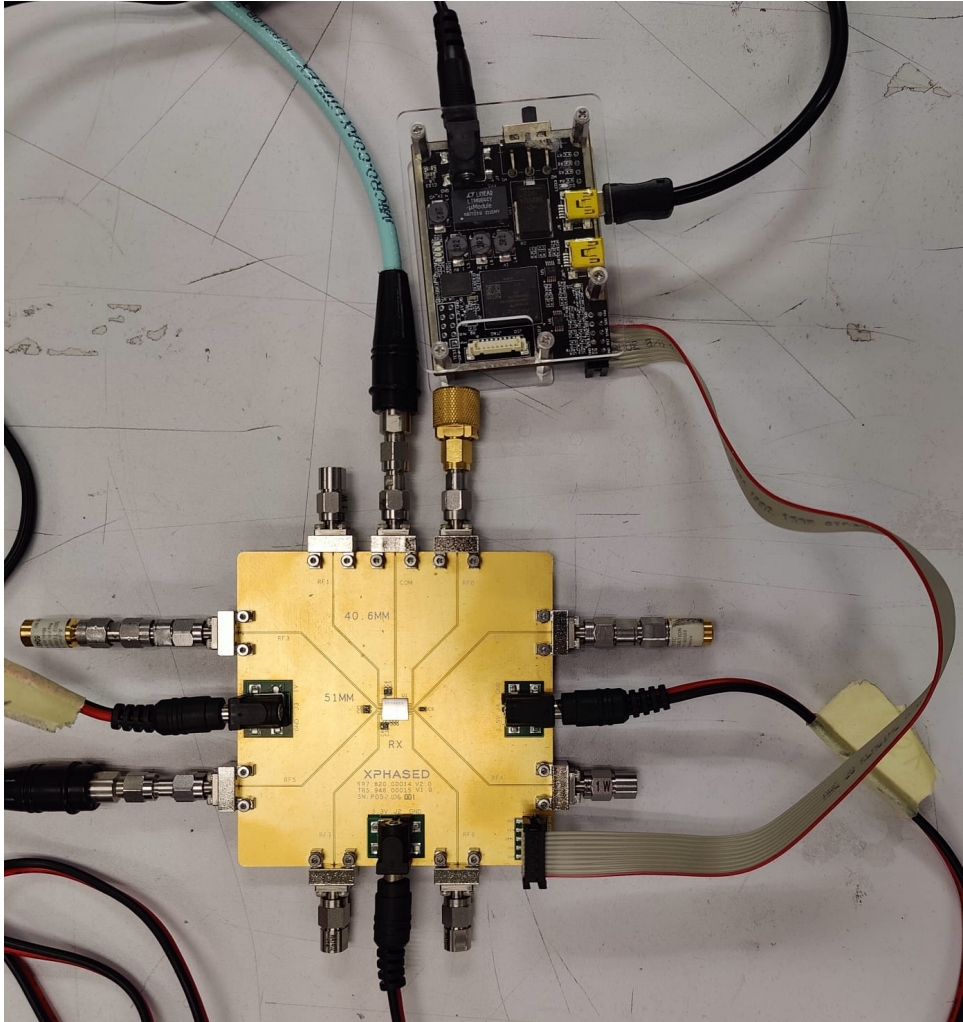
Desde el analizador hasta la placa se han utilizado dos cables que aproximadamente introducen 1.5 dB de pérdidas, y que han sido calibrados para tener en cuenta el desfase que producen. Para inyectar las señales se han instalado unos conectores con pérdidas de 0.5 dB. Además en la propia placa, el tramo de línea coplanar desde el chip hasta el conector provoca aproximadamente unos 3.25 dB de pérdidas, valor calculado mediante el software de simulación CST.

Para alimentar la placa del chip se han usado dos fuentes de tensión, la primera con dos canales para estimular las entradas de 1.2V y 1V, la segunda para estimular la entrada de 3.3V. Estos niveles de tensión continua son los requeridos por el chip para su funcionamiento.

Para poder llevar un seguimiento de la temperatura ambiente y calibrar el chip de acuerdo con ésta, se ha usado también un termómetro colocado al lado de la placa del chip y conectado al equipo con el que se operaba el software de control.

Finalmente, se ha usado un cable de 10 vías para la conexión entre la placa del chip y la placa de control, con el objetivo de facilitar la toma de medidas puesto que los canales 4 y 6 quedaban demasiado cerca de la placa de control. La placa de control se comunica

con la placa de evaluación mediante una comunicación basada en SPI y hace de interfaz entre el ordenador y el chip. El montaje final se muestra en la figura 2.5.

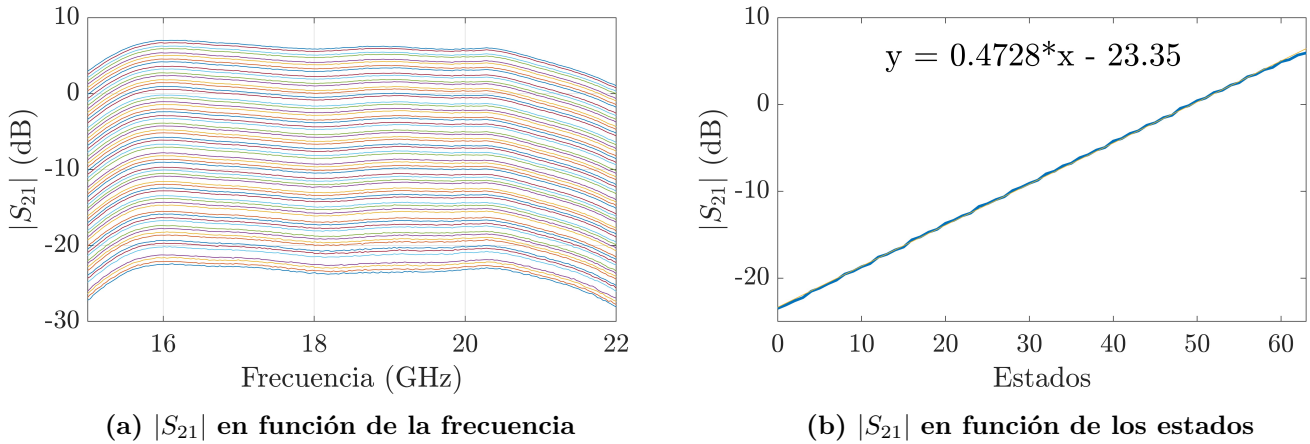


**Figura 2.5: Montaje para las medidas del TRHJ-4011.**

Para la interpretación de las medidas obtenidas con el analizador, se han extraído los archivos .s2p de éste para posteriormente procesarlos con el RF Toolbox de Matlab.

### 2.2.2. Resultados experimentales

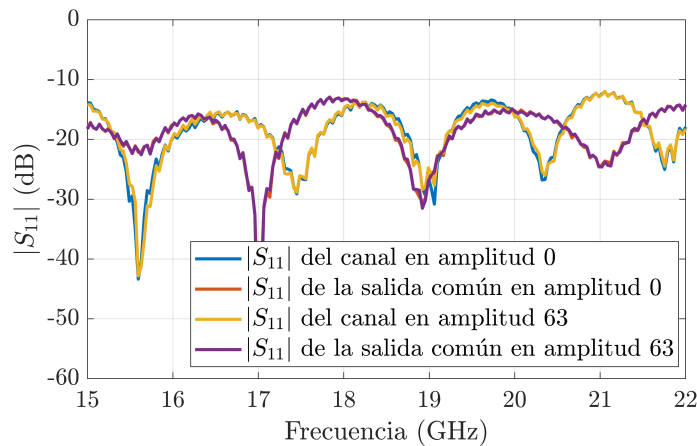
Para comprobar la capacidad del chip de cambiar los estados de amplificación, se conecta el VNA (Vector Network Analyzer) entre un canal y la salida para medir el parámetro  $S_{21}$ , inyectando -40 dBm para las pruebas. Mediante el software se miden los 64 estados de amplificación, desde la ganancia mínima del chip, hasta los 31.5 dB de amplificación adicional.



**Figura 2.6: Variación de la amplitud en Rx.**

En la figura 2.6a representa la amplitud el parámetro  $|S_{21}|$ , donde cada línea corresponde a un estado de amplificación del chip distinto. La figura 2.6b muestra la amplitud del  $|S_{21}|$  en función del estado a la frecuencia de 19 GHz. Se ha incluido la aproximación con una recta mediante mínimos cuadrados para ver la pendiente de este comportamiento. Idealmente la pendiente de esta recta sería la misma que la extraída con las medidas, 0.5 por los 0.5 dB de aumento por estado. Sin embargo, se observa que no funciona perfectamente y es 0.4728, ligeramente menor.

Para la medida del parámetro  $|S_{11}|$  de la entrada a los canales y la salida común se usa el mismo montaje. En la figura 2.7 ha comprobado que el  $|S_{11}|$  no sube de los  $-10$  dB y que el nivel de amplitud configurada (estado) apenas tiene impacto sobre este parámetro.

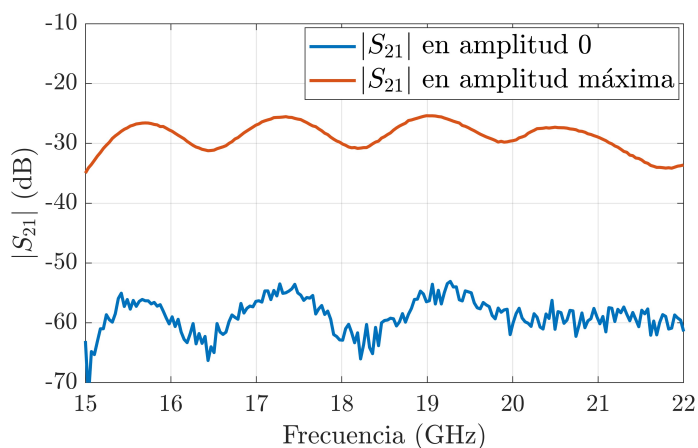


**Figura 2.7: Parámetro  $|S_{11}|$  en Rx.**

Respecto al acoplo entre canales, la figura 2.2 sugiere el posible riesgo de que exista un acoplo entre canales adyacentes pares e impares. Para comprobar si existe este acoplo se tomaron medidas entre los puertos 2 y 4.

La figura 2.8 descarta la posibilidad de un nivel de acoplo entre canales relevante,

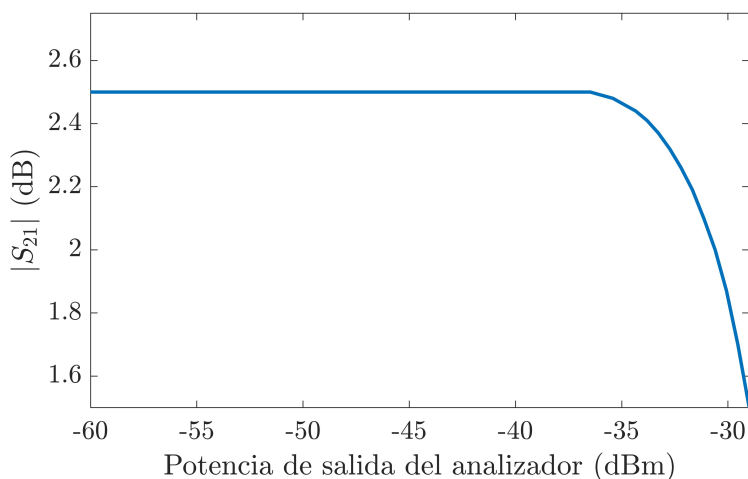




**Figura 2.8: Acoplo entre canales en Rx.**

puesto que el máximo acoplo (con la amplificación máxima) entre dos canales adyacentes es de menos de  $-25$  dB.

El punto de compresión a 1 dB (P1dB) es aquel en el que la potencia a la salida del dispositivo se encuentre 1 dB por debajo del comportamiento lineal. De acuerdo a esta definición, es posible obtenerlo cuando el  $|S_{21}|$  baje 1 dB según se aumenta la potencia de entrada.

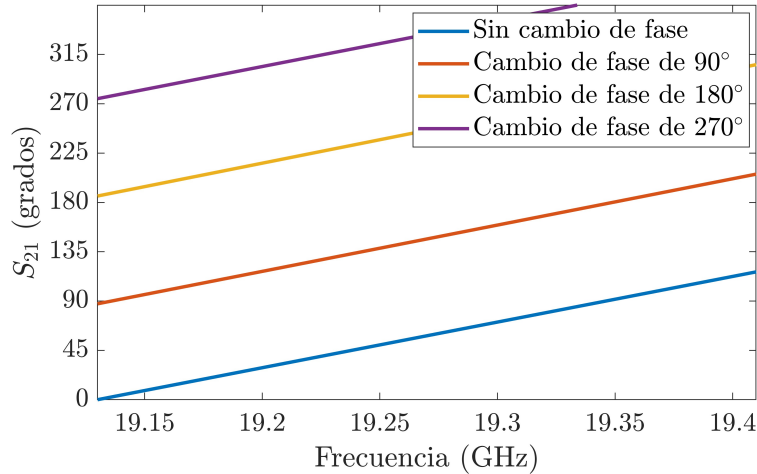


**Figura 2.9: Punto de compresión a 1 dB en Rx.**

En la figura 2.9 se puede observar el comportamiento del parámetro  $|S_{21}|$  en función de la potencia de entrada. Se constata que para una potencia de salida desde el VNA de  $-30$  dBm, el  $|S_{21}|$  baja 1 dB, y que teniendo en cuenta las pérdidas producidas por cables, conector y coplanar (aproximadamente 8 dB en total), se obtiene un valor lo bastante cercano al indicado en el manual.

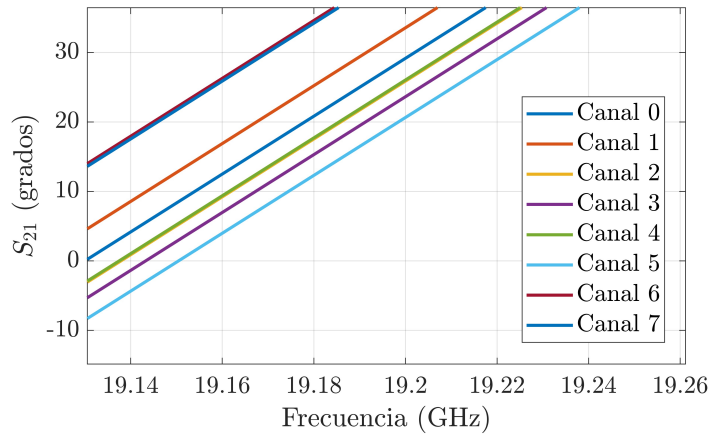
Para comprobar la capacidad del chip de variar la fase, se tomaron 4 medidas distintas aplicando una diferencia de fase de  $90^\circ$  entre estas. En la figura 2.10 se observa la fase del

$|S_{21}|$  en función de la frecuencia. Cada curva es un estado del desfasador distinto. Se puede comprobar que el chip se comporta de la forma esperada en todo el margen de frecuencias de operación.



**Figura 2.10: Variación de fase en Rx.**

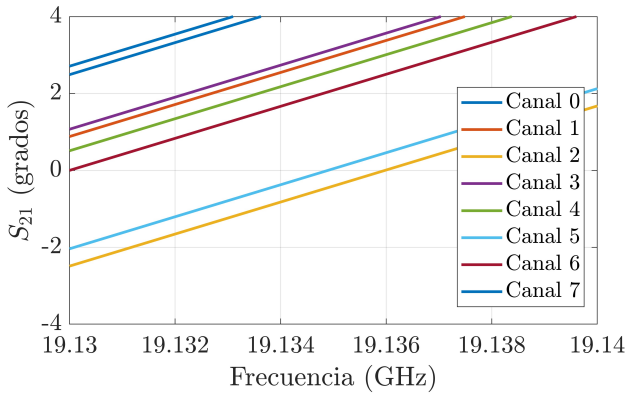
Dado que el propósito de este chip es usarse en agrupaciones de antenas, es importante que la diferencia de fase entre canales sea la correcta para lograr un buen apuntamiento. Para comprobar que el chip cumple este requisito se han tomado medidas de todos los canales configurando la misma fase para todos ellos.



**Figura 2.11: Comprobación de fase entre canales en Rx.**

Se puede apreciar en la figura 2.11 que para lo que se supone que es la misma fase entre todos los canales del chip, existen diferencias de hasta  $22.3^\circ$  (entre los canales 5 y 6), por lo que resulta evidente que para su uso como conformador de haz es necesaria una calibración. Para llevar a cabo la calibración se configuró la misma fase en todos los canales y se tomaron 5 medidas en cada uno. La tabla 2.3 recoge los resultados de las medidas mencionadas.

CHn	Medida 1 Fase $ S_{21} $ (°)	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Fase media (°)
6	-38.7	-37.4	-38.6	-37	-35.6	-37.46
4	-55.6	-50.83	-56.36	-49.69	-49.89	-52.47
2	-55.76	-59	-57.23	-55.1	-53.4	-56.1
0	-52.48	-53.2	-53.75	-51	-49.83	-52.05
1	-48.09	-48.3	-49.78	-46.65	-45.45	-47.65
3	-58.01	-58.91	-58.86	-57.45	-56.31	-57.9
5	-61	-62.21	-62.82	-61.12	-59.19	-61.27
7	-39.1	-44.48	-39.86	-42.43	-42.6	-41.69

**Tabla 2.3: Medidas para la calibración de la fase en Rx**

**Figura 2.12: Medida Calibrada en Rx.**

CHn	Fase $ S_{21} $ respecto CH6(°)	Ajuste de estados
6	-	0
4	0.51	+3
2	2.49	+3
0	2.49	+3
1	0.88	+2
3	1.07	+4
5	2.04	+4
7	2.71	+1

**Figura 2.13: Calibración en Rx.**

Realizando un promedio de las medidas se puede establecer una calibración. Es posible mediante el software inducir estas diferencias para tener los 8 canales en fase. Es una funcionalidad que también es posible añadir fácilmente en el software a desarrollar. La tabla 2.13 recoge la diferencia de estados de fase que se debe de introducir en el software para la calibración, así como los nuevos resultados obtenidos aplicándola.

Con esta prueba se observa que los canales tras la calibración tienen una diferencia de fase muy pequeña. Se ha comprobado que la calibración es válida para diferentes temperaturas del chip.

### 2.3. Chip TRHJ-4041 (Tx)

El chip TRHJ-4041 opera en la banda Ka, la banda de frecuencia para enlace ascendente en comunicaciones satélite. La figura 2.14 ha sido extraída del manual del correspondiente chip. A diferencia del chip para recepción, el TRHJ-4041 divide la señal de entrada en 8 partes, que atraviesan una etapa de ganancia y otra de desfase variables y posteriormente se amplifican antes de salir. Este chip también incluye un sensor de temperatura, sin embargo en posteriores pruebas se descubrió que malfuncionaba.

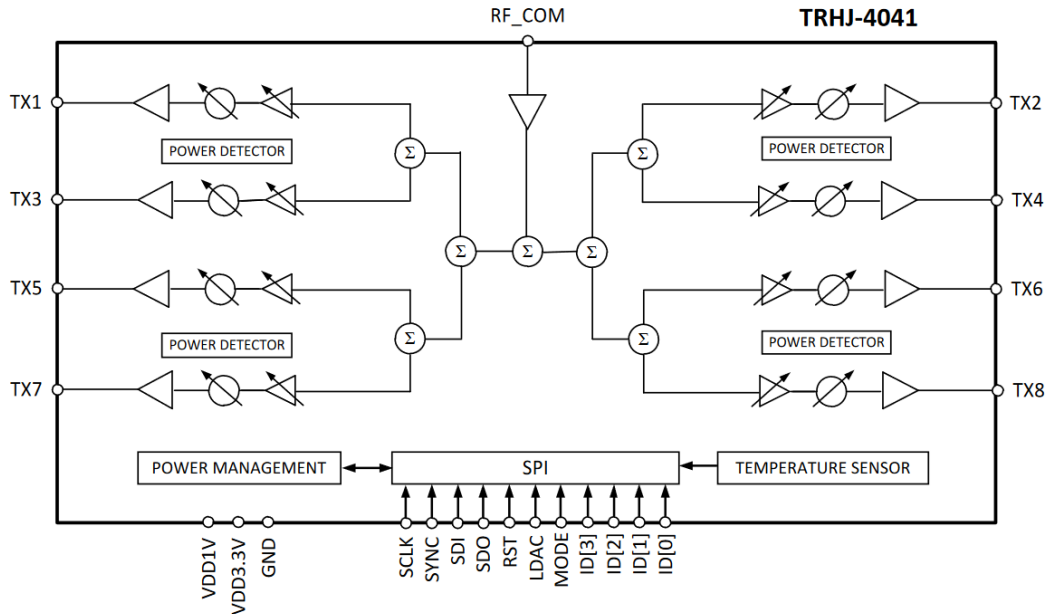


Figura 2.14: Diagrama de bloques funcional del TRHJ-4041.

La estructura de la placa de evaluación es idéntica a la del chip Rx, véase la tabla 2.1. De acuerdo al manual, el punto de compresión a 1 dB en el puerto de entrada ('RF\_COM') en está en los 10.7 dBm, y los coeficientes de reflexión (parámetros  $|S_{ii}|$ ) de los canales y del puerto 'RF\_COM' son  $-7.6$  dB y  $-20$  dB respectivamente.

### 2.3.1. Materiales y montaje

La estructura del montaje para la toma de medidas sigue al de la figura 2.4. Para este chip se ha empleado un VNA de 4 puertos y que opera desde los 10 MHz hasta los 50 GHz. De nuevo, se han usado cargas de  $50\Omega$  en los puertos abiertos para evitar reflexiones y se ha alimentado la placa con una fuente de tensión de dos canales, uno a 1V y otro a 3.3V, que son las que necesita este chip según el fabricante.

A frecuencias más altas, los elementos del montaje introducen pérdidas mayores. Los conectores en banda Ka introducen unas pérdidas aproximadas de 0.8 dB, las guías de onda coplanares de 3.75 dB y los cables del analizador 1.5 dB. El montaje final se muestra en la figura 2.15.

### 2.3.2. Resultados experimentales

Las pruebas que se han realizado en este chip pretenden sacar las mismas conclusiones que las del receptor. Primero se comprobó la capacidad para manipular la amplitud de las salidas. En este caso, se inyectan 0 dBm de potencia en 'RF\_COM' por el puerto 1 del analizador, el puerto 2 se conecta al canal 0 y mediante el software se modifica la amplitud del amplificador variable de dicho canal.

De nuevo, en la figura 2.16a se puede ver el  $|S_{21}|$  para los distintos estados de amplifi-

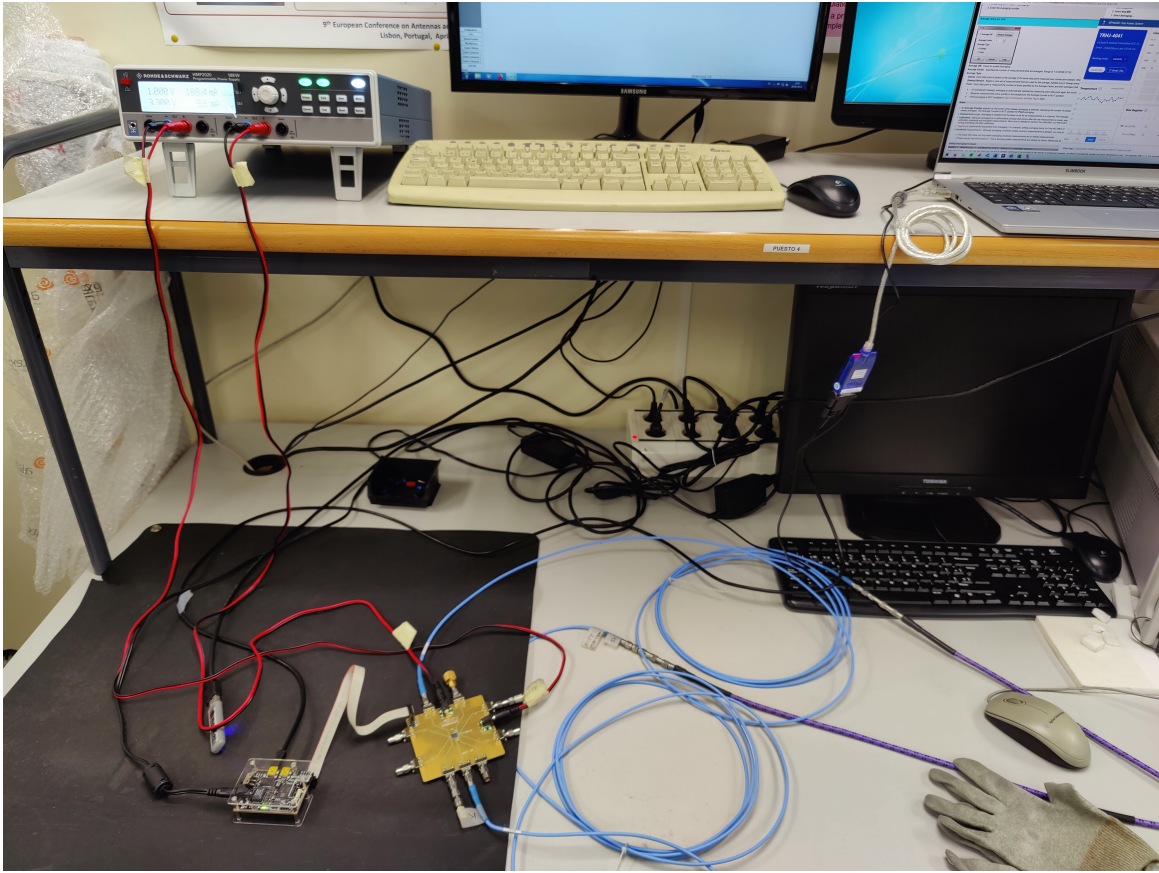
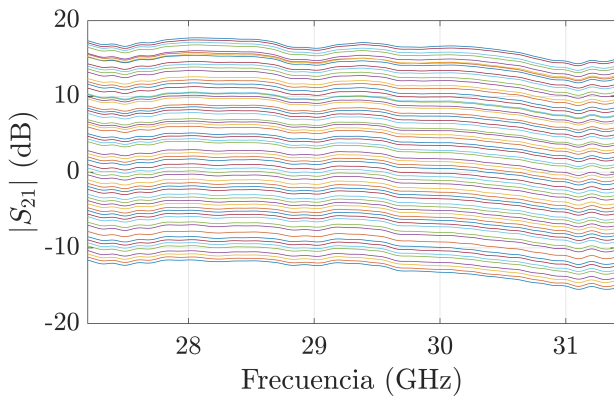
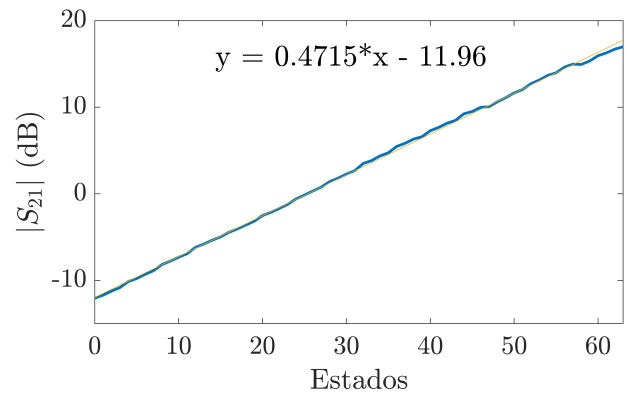


Figura 2.15: Montaje para las medidas del TRHJ-4041.



(a)  $|S_{21}|$  en función de la frecuencia



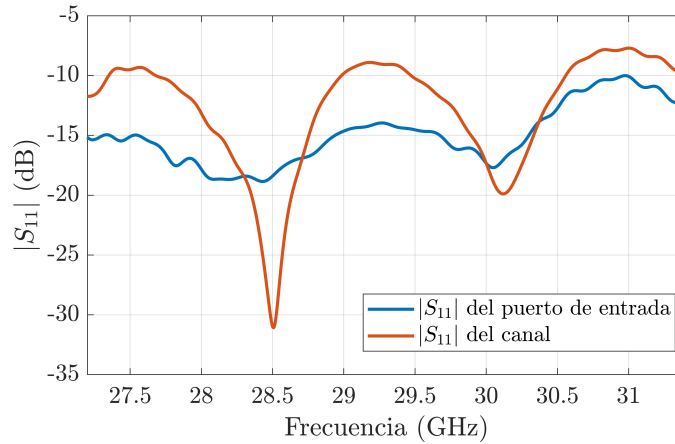
(b)  $|S_{21}|$  en función de los estados

Figura 2.16: Variación de la amplitud en Tx.

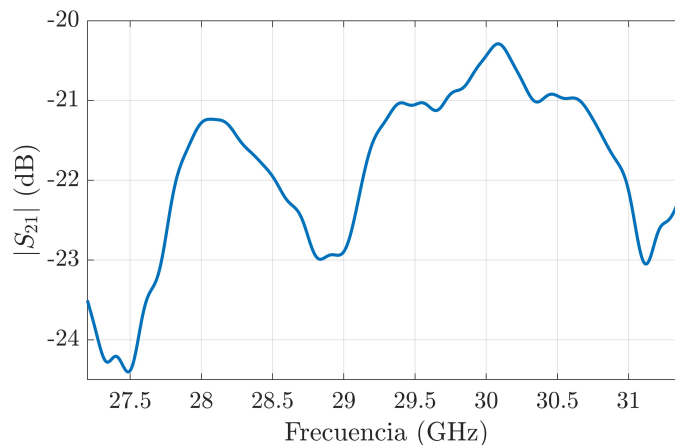
cación. La figura 2.16b muestra la amplitud en función del estado a la frecuencia de 29.3 GHz. La curva resultante tiene una pendiente de 0.4715, por lo que la amplificación que se consigue por cada estado en promedio se aproxima a los 0.5 dB deseados.

En este chip comprobamos en la figura 2.17 que el  $|S_{11}|$  del puerto de entrada, el

‘RF\_COM’, se mantiene por debajo de los  $-10$  dB y el de los canales por debajo de  $-7.8$  dB. En este sentido, es peor de lo esperado.



**Figura 2.17: Parámetro  $|S_{11}|$  en Tx.**



**Figura 2.18: Acoplo entre canales en Tx.**

Respecto al acoplo entre canales, se tomó una medida entre los puertos 2 y 4, con la máxima amplificación en ambos. En la figura 2.8 podemos ver que el nivel de acoplo entre canales es bajo, puesto que el máximo acoplo entre los dos canales adyacentes es menor a  $-20$  dB.

El punto de compresión a 1 dB del puerto de entrada se calcularía mediante el mismo método, es decir, observando cuándo el  $|S_{21}|$  cae 1 dB según aumentemos la potencia de entrada. El manual del chip indica que la potencia de entrada de la señal de radiofrecuencia debe estar de entre 0 y 11 dBm, sin embargo también indica que el máximo absoluto para no dañar el chip son 6 dBm. Es muy probable que esto sea debido a un error en el manual, pero debido al riesgo de dañar el chip de manera irreversible, esta prueba no se ha llevado a cabo.

Para medir la precisión del chip al realizar los cambios de fase, se tomaron 4 medidas y

se configuró una diferencia de fase de  $90^\circ$  entre ellas. En la figura 2.10 se puede comprobar que el chip Tx también es preciso con estos cambios.

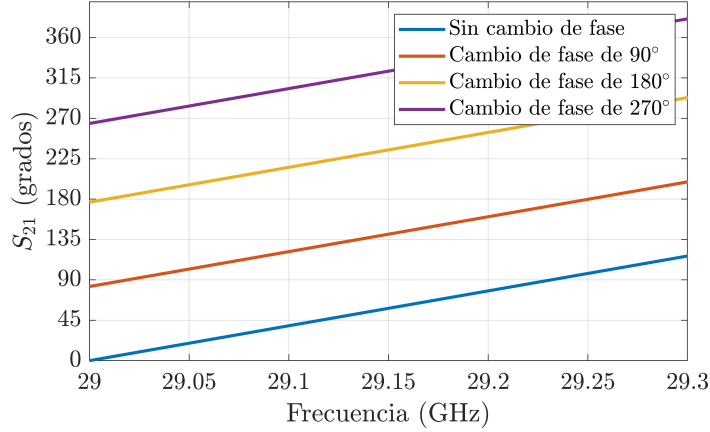


Figura 2.19: Variación de fase en Tx.

Con este chip también se ha comprobado que la diferencia de fase entre canales no es la misma, por lo que también es necesaria una calibración. Para llevarla a cabo con el analizador de 4 puertos se tomaron un gran número de medidas, con el objetivo de discernir si las diferencias de fase estaban provocadas por la posición de los cables o por el propio chip.

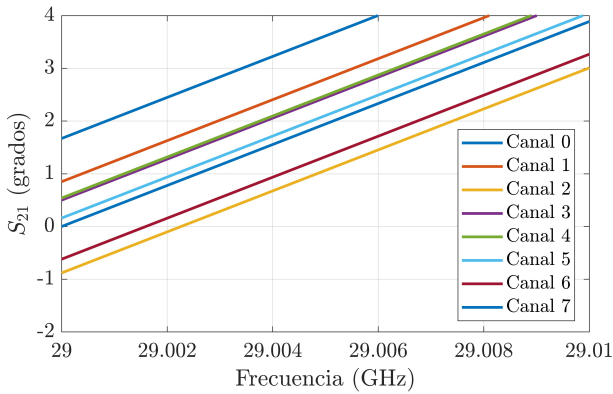


Figura 2.20: Medida Calibrada en Tx.

CHn	Fase $ S_{21} $ respecto CH0( $^\circ$ )	Ajuste de estados
0	-	0
1	0.85	-2
2	0.88	+1
4	0.5	+4
6	0.54	+1
3	0.16	0
5	0.62	-1
7	1.67	-1

Figura 2.21: Calibración en Tx.

Tomar las medidas de esta forma permitió ver que determinados puertos creaban diferencias en distintas medidas, factor que se tuvo en cuenta a la hora de calcular las diferencias de fase que se tendrían que introducir en el software. Los resultados de esta calibración se exponen en la figura 2.20, y el ajuste de los estados que deben introducirse en el software en la 2.21. Con esta prueba se observa que los canales tienen ahora una diferencia de fase muy pequeña después de la calibración.

## 2.4. Conclusión

Finalmente se exponen las conclusiones de éste capítulo. Debido a la caracterización realizada del chip:

- Se ha comprobado que los chips THRJ-4011 y THRJ-4041 son funcionales y cumplen con la mayoría de las especificaciones indicadas en los manuales de manera satisfactoria.
- Se ha encontrado que los chips no mantienen una fase relativa entre los distintos canales correcta. Problema que ha podido ser solventado mediante una calibración para cada chip.



## Capítulo 3

# Diseño de elementos radiantes

### 3.1. Introducción

Las antenas reapuntables electrónicamente juegan un papel fundamental en el campo de las comunicaciones por satélite en movimiento. Este concepto se ha expuesto brevemente en el capítulo 1. El siguiente paso consiste en diseñar una agrupación sencilla que sirva como demostrador para comprobar la funcionalidad del chip y del software desarrollado para una reconfiguración satisfactoria del apuntamiento del haz. En este capítulo se va a presentar el diseño de la antena realizado.

Obviamente, el diseño de los elementos radiantes desempeña un papel fundamental en el funcionamiento de un *phased array*. Sus propiedades deben satisfacer los requisitos del sistema en cuanto a ancho de banda, polarización, ganancia e integrabilidad. En este sentido, el control del apuntamiento del haz impone unos severos condicionantes en el diseño, que pueden limitar el rango de apuntamiento o el ancho de banda.

Entre los diferentes aspectos que condicionan el diseño se encuentran: el espaciado entre elementos, las propiedades del sustrato, el proceso de fabricación, el interfaz de entrada o la compatibilidad termomecánica. Entre los elementos radiantes más usados en este tipo de antenas se pueden citar las ranuras, las antenas de rejilla, los dipolos magnetoeléctricos, las antenas Yagi planares o los dipolos (ver figura 3.1). Pero sin duda, el elemento más versátil es el parche microstrip con diferentes formas. Este elemento permite conseguir de forma sencilla la dualidad en polarización, tanto lineal como circular, y su alimentación se suele implementar mediante sondas o aperturas. Esta segunda opción permite separar la línea de alimentación y el parche mediante un plano de masa, lo que facilita su diseño en un entorno multicapa.

Una agrupación de antenas en tecnología de microstrip puede estar diseñada en una configuración de una única capa o de múltiples capas. Los factores que determinan esta elección son la complejidad y coste, los niveles de polarización cruzada y lóbulo secundario, el número de componentes discretos, diversidad de polarización, ancho de banda, etcétera. Cuando los requisitos eléctricos son laxos, un diseño de una única capa es por lo general suficiente. Si todas las líneas de transmisión y parches se encuentran en la misma capa, habrá un coste de fabricación reducido. Sin embargo, cuando se requiere un nivel de lóbulo secundario o de polarización cruzada muy bajos, un diseño de más de una capa suele ser

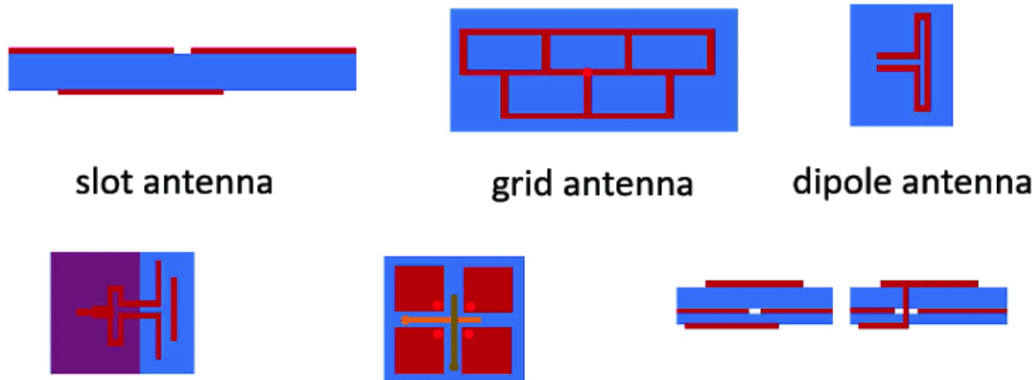


Figura 3.1: Diferentes tipos de elementos radiantes empleados en los *phased-arrays* [17].

la mejor opción [18].

En vista de esto, se ha decidido diseñar una antena basada en tecnología microstrip de una sola capa, con una formación de  $1 \times 8$  parches, un elemento radiante por cada canal del chip. El principal propósito de este experimento es demostrar el correcto funcionamiento de los chips desfasadores. Por compatibilidad con el sistema de medida, se escogió la banda de transmisión, la banda Ka. En este sentido, gracias a las instalaciones del Antennas and Propagation Lab (APL) de la UPV, las medidas experimentales podrán hacerse sin necesidad de encargos externos. Al estar este TFG enmarcado en este grupo de investigación se puede disponer de la cámara anecoica de dicho laboratorio para el posterior montaje del chip TRHJ-4041 y sus diferentes periféricos necesarios para el experimento (fuentes de alimentación, equipo de control, analizadores de redes, ...).

## 3.2. Diseño de la antena

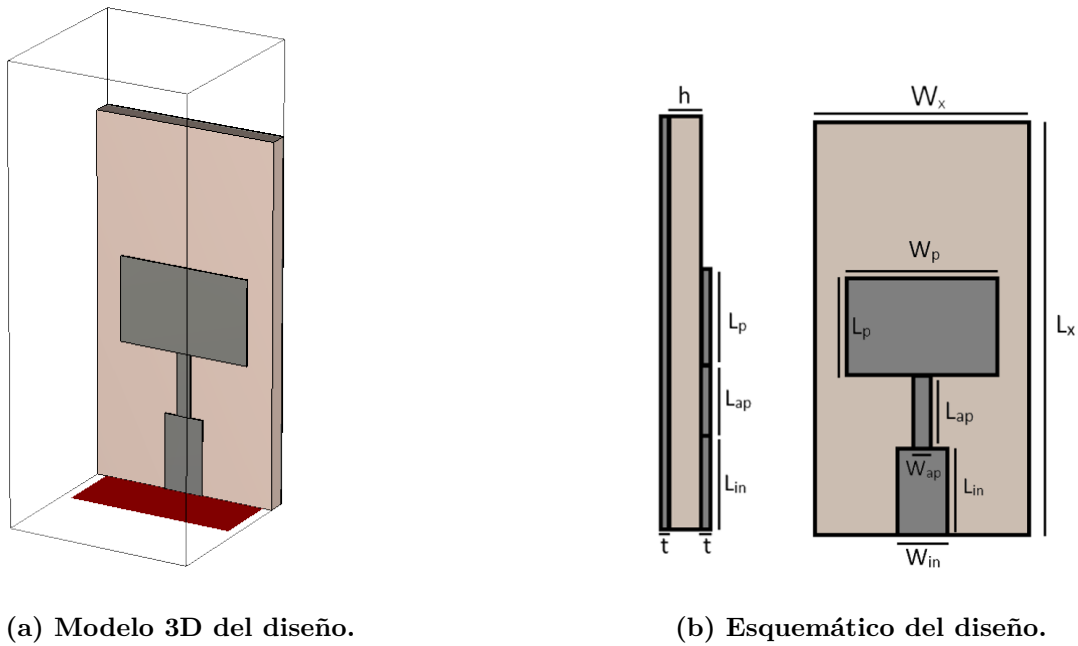
Los diseños y simulaciones se han llevado a cabo con CST Studio Suite, un software de análisis electromagnético de alto rendimiento para diseñar, analizar y optimizar dispositivos de alta frecuencia y antenas.

### 3.2.1. Diseño de la celda unidad

En primer lugar se diseñó la celda unidad, es decir, la estructura fundamental que formará la agrupación. Con este diseño se pretende conseguir en torno a 1 GHz de ancho de banda centrado en 29 GHz, dentro del rango de frecuencias de operación del TRHJ-4041. El ancho de la celda será  $0.5\lambda_0$  para tener una separación entre parches de media longitud de onda en espacio libre. Se diseñó con un sustrato Rogers RO4003C, con una permitividad relativa de  $\epsilon_r = 3.55$ , mientras que el plano de masa, las líneas y el parche se consideran conductor perfecto. El ancho de la línea de entrada será el correspondiente a una impedancia de 50 Ohmios para dicho sustrato, por lo que es necesaria una línea de adaptación entre la de entrada y el parche (este último suele tener una impedancia

de entrada más alta). Se han configurado unas condiciones de contorno periódicas que emulará parches contiguos para tener en cuenta los acoplos mutuos que se produzcan.

Después de usar la herramienta de optimización del CST se consiguen unos resultados satisfactorios. En la figura 3.2a se presenta el modelo 3D del diseño del parche final, y en la figura 3.2b el esquemático, cuyas dimensiones se encuentran en la tabla 3.1. En la figura 3.3 se puede observar ver que el parámetro S11 del parche se encuentra por debajo de los  $-10$  dB para algo más de 2 GHz.



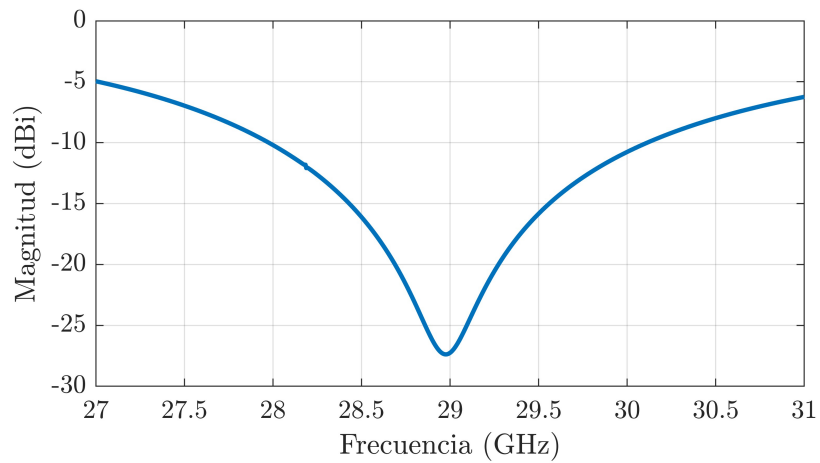
(a) Modelo 3D del diseño.

(b) Esquemático del diseño.

Figura 3.2: Diseño del parche.

Parámetro	Valor (mm)
$h$	0,51
$t$	0,035
$L_x$	10
$W_x$	5,1724
$L_p$	2,35
$W_p$	3,71
$L_{ap}$	1,73
$W_{ap}$	0,4
$L_{in}$	2,09
$W_{in}$	1,1

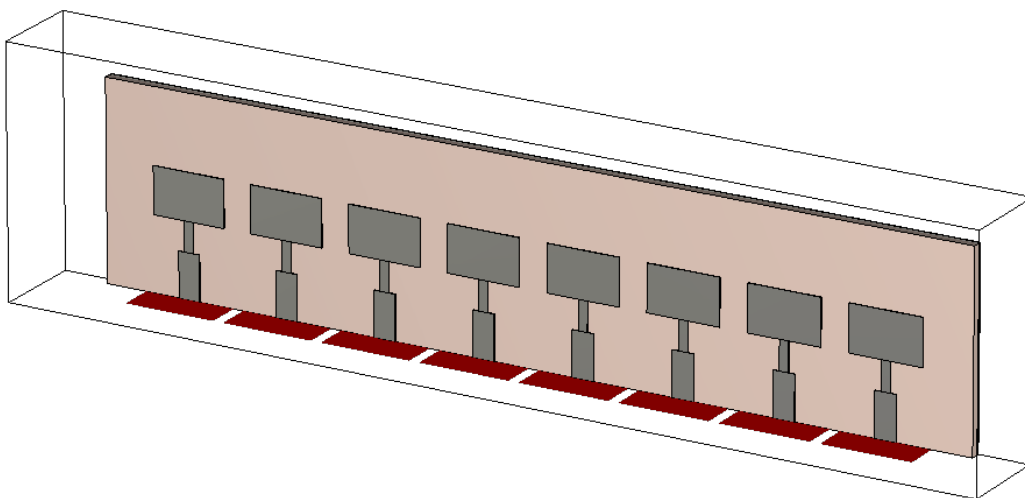
Tabla 3.1: Dimensiones del modelo celda unidad



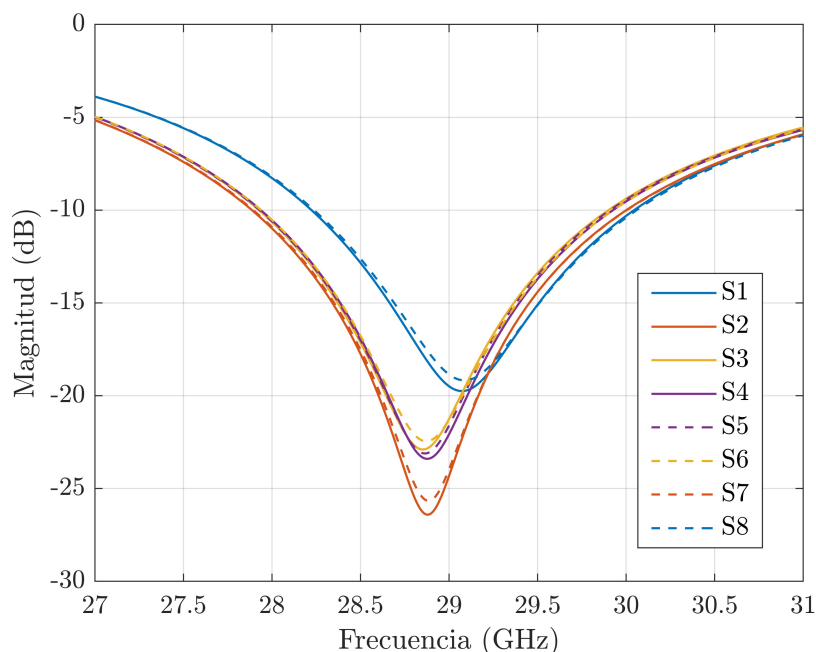
**Figura 3.3:** Parámetro S11 de la celda unidad.

### 3.2.2. Diseño de la agrupación

Después de comprobar que obtenemos buenos resultados con la celda unidad se diseñó la agrupación de 8 parches. Este diseño consiste simplemente en la celda unidad de la sección 3.2.1 replicada 7 veces. Posteriormente se ha simulado y se han combinado los parámetros S de los 8 puertos con la herramienta 'Combine Results' del CST para obtener los parámetros S activos.



**Figura 3.4:** Modelo 3D del array de parches.



**Figura 3.5: Parámetros S activos del array de parches.**

Los parámetros S activos tienen en cuenta la excitación del resto de los puertos. Esto hace que el comportamiento empeore ligeramente en los parches de los extremos debido a un acoplamiento desigual. Se espera además que los parches simétricos tengan un comportamiento muy similar. Esto se puede observar en la figura 3.5. Los parches 1 y 8 tienen un ancho de banda menor y las curvas de parches simétricos también son prácticamente paralelas. Aún con esto, la agrupación tiene un ancho de banda de aproximadamente 1.75 GHz.

### 3.2.3. Diseño de una red de alimentación

Trabajar en estas frecuencias pone un problema sobre la mesa. La separación entre los puertos de entrada es de  $0.5\lambda_0$ , que a 29 GHz son 5.17 milímetros, y los conectores Ka son demasiado grandes para poder soldarlos a la placa uno al lado del otro. Una solución a este problema consiste en diseñar una red de alimentación en microstrip que aumente la separación entre puertos tratando de mantener la diferencia de fase entre caminos lo más baja posible. La red consistirá en una extensión de la línea microstrip de cada puerto.

Para diseñar estas líneas se ha recurrido a AWR MicroWave Office (MWO), un software de diseño de circuitos de alta frecuencia basado en equivalentes circuitales. Este software nos permite optimizar de forma muy rápida circuitos microstrip como el requerido, en este caso para buscar la mínima diferencia de fase entre caminos. La figura 3.6 muestra el esquemático diseñado desde el MWO.

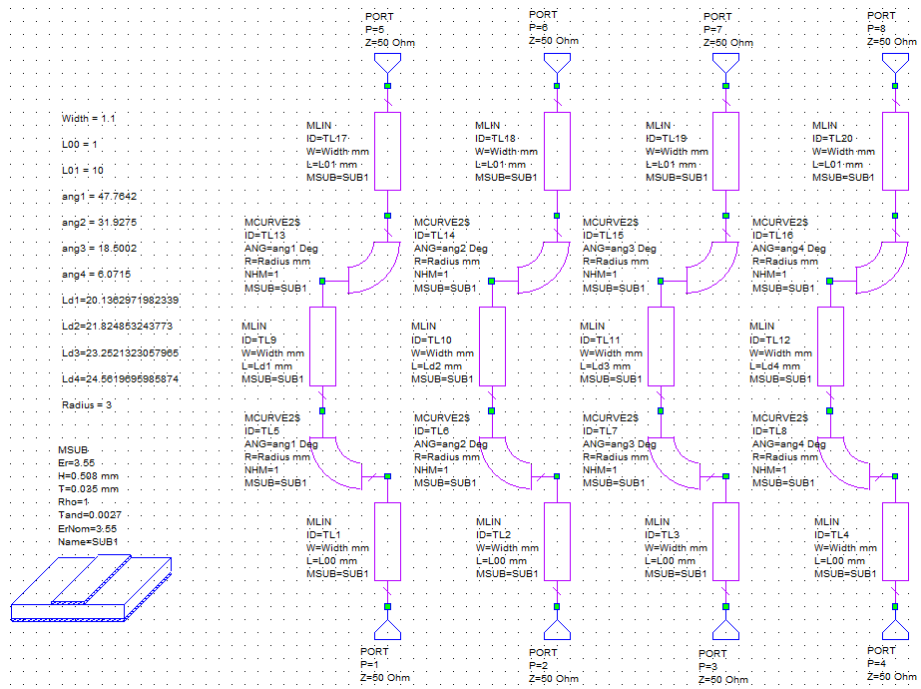


Figura 3.6: Esquemático del diseño en Microwave Office.

Después de diseñar y optimizar el esquemático podemos exportar el diseño a CST para obtener unos resultados de simulación mucho mas precisos que los que nos daría el MWO.

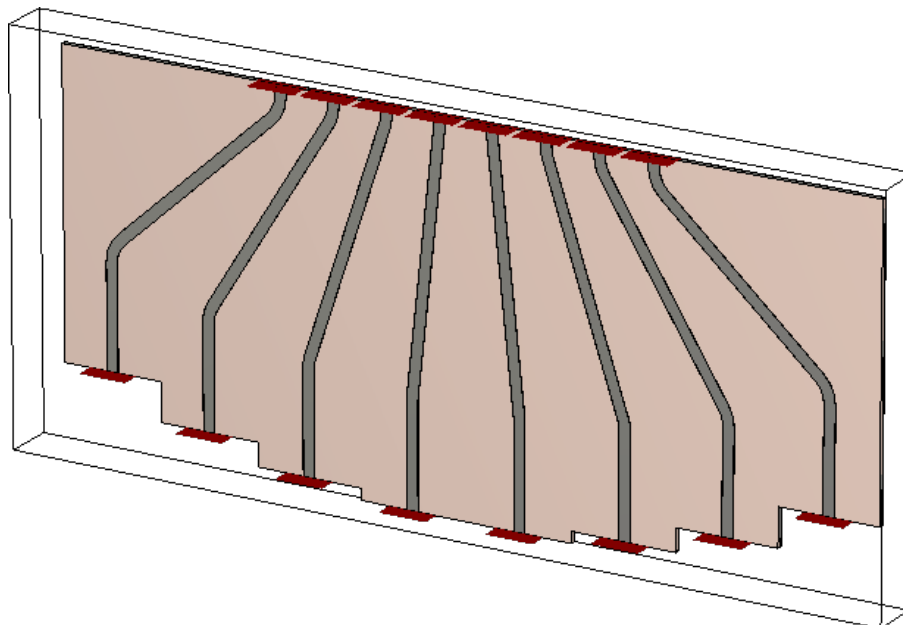
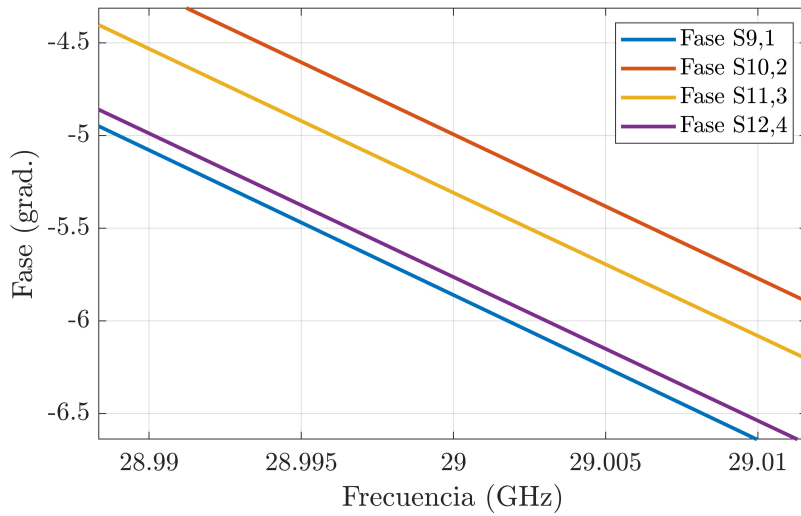


Figura 3.7: Modelo 3D de la red de alimentación diseñada.

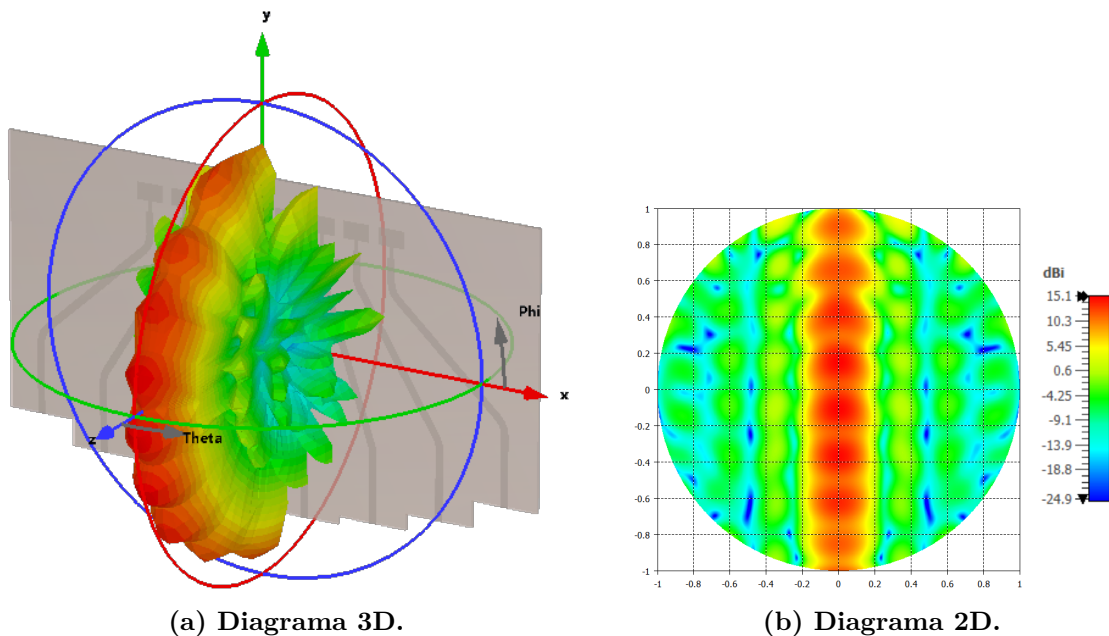


**Figura 3.8: Diferencia de fase entre caminos.**

Se puede observar en la figura 3.8 que la máxima diferencia de fase entre caminos es de menos de  $0.9^\circ$ , por lo que podemos darnos por satisfechos con el resultado.

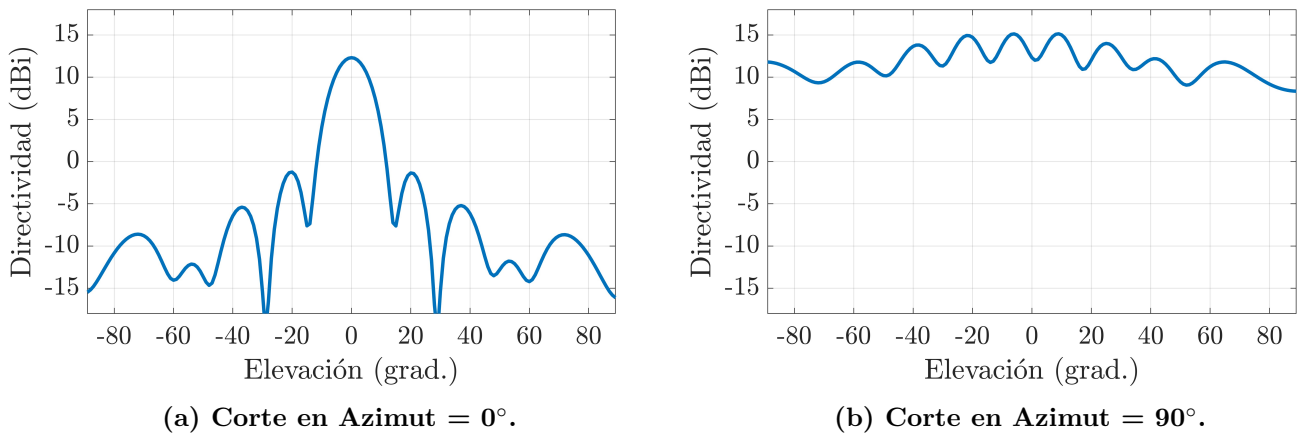
### 3.2.4. Primer diseño

Este primer diseño es la combinación de la agrupación de parches de la sección 3.2.2 y la red separadora anterior. El modelo y diagrama de radiación en 3D y 2D cuando todos los elementos están alimentados en fase pueden verse en la figura 3.9.



**Figura 3.9: Diagramas de radiación del diseño de parches con red.**

Este diseño tiene una directividad máxima de 15.1 dBi (12.3 dBi en dirección broad-side). Sin embargo, como se puede apreciar en la figura 3.10b, aparece un rizado bastante pronunciado causado por el efecto de bordes del sustrato. En el corte Azimut =  $90^\circ$  el lóbulo principal no está en Elevación =  $0^\circ$  sino en  $8.8^\circ$ . De todas formas, este efecto se desvanecería en una agrupación bidimensional. Para esta prueba de validación con una agrupación unidimensional sólo estamos interesados en el corte que contiene el eje de la agrupación.



**Figura 3.10:** Cortes en Azimut del diagrama de radiación del diseño de parches con guías.

### 3.2.5. Segundo diseño

Para simplificar la estructura, se estudia un diseño alternativo de la agrupación. Como se ha visto anteriormente, disponer los parches con la misma orientación hace que no sea posible instalar conectores en puertos adyacentes y sea necesaria una red separadora. Sin embargo, si se invierte la orientación de los parches pares de manera que quedan 4 puertos por cada lado de la placa, se deja suficiente espacio entre líneas de entrada para poder instalar los conectores sin problemas.

Para que las contribuciones entre los parches adyacentes no se anulen entre sí, habrá que introducir un desfase de  $180^\circ$  entre éstos, función que es posible añadir al software muy fácilmente.



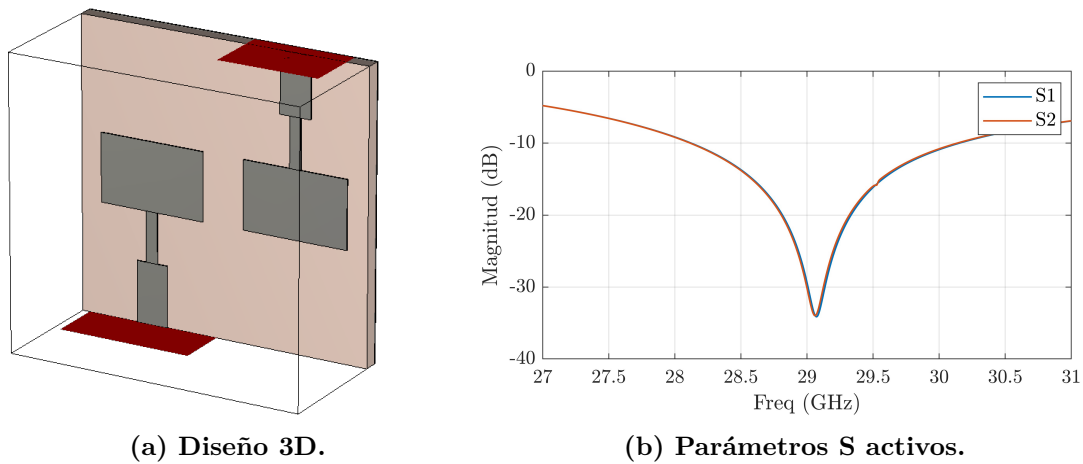


Figura 3.11: Diseño de los parches invertidos.

Para aumentar la rigidez física de antena y que sea más fácil de fabricar se extendió la longitud de las líneas, por lo que este diseño tiene unas dimensiones finales de 40 mm x 46.88 mm.

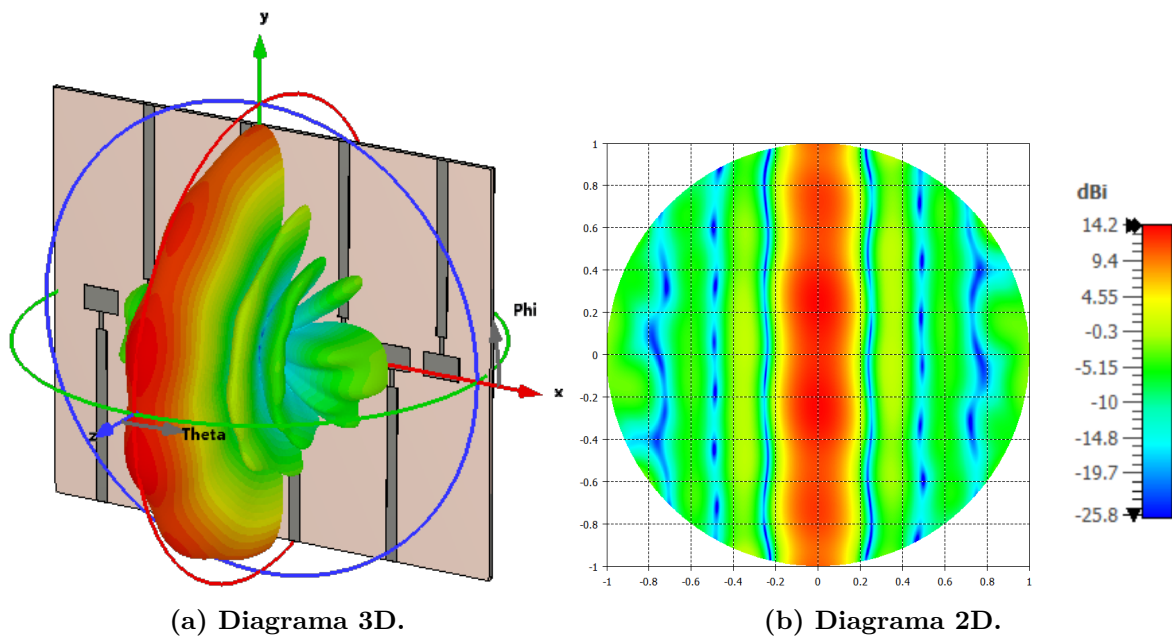
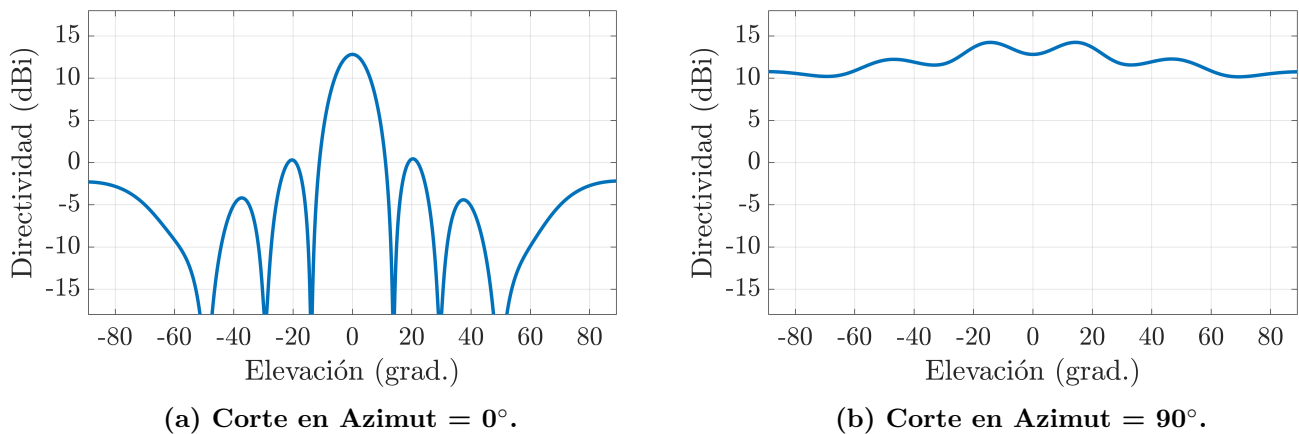


Figura 3.12: Diagramas de radiación del diseño de parches invertidos.

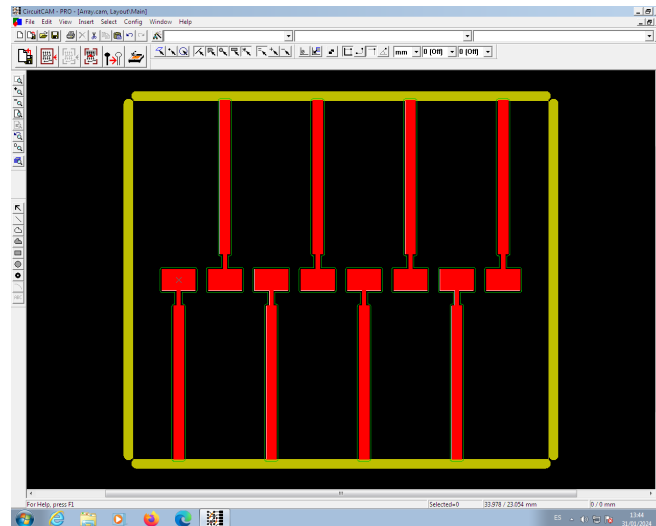
Con este diseño se obtiene una directividad máxima de 14.25 dBi, pero el rizado en el corte de  $90^\circ$  (subfigura 3.13b) es menos pronunciado. En dirección broadside la directividad es 12.8 dBi contra los 12.3 dBi del diseño anterior. Debido a que el rizado es menor y su fabricación más sencilla, finalmente se ha decidido seguir adelante con este diseño.



**Figura 3.13:** Cortes en Azimut del diagrama de radiación del diseño de parches invertidos.

### 3.3. Fabricación de la antena

Para la fabricación de la antena se exportó el diseño de CST a un archivo .dxf y se trabajó con CircuitCAM, un software que genera las líneas que dan forma a los parches. La figura 3.14 es una captura del software en cuestión.



**Figura 3.14:** Captura del software CircuitCAM.

Ahora este diseño se exporta a BoardMaster, el software que controla la fresadora y cortará por las líneas generadas por CircuitCAM.

El sustrato Rogers RO4003C está formado por el material dieléctrico y una capa de cobre de 0.035 mm por cada lado. Una de ellas es la que se fresa para dar forma al circuito. La capa de cobre inferior se ha soldado a otra placa de cobre de 1 mm para dar más rigidez a la estructura y facilitar el soldado de los conectores Ka.

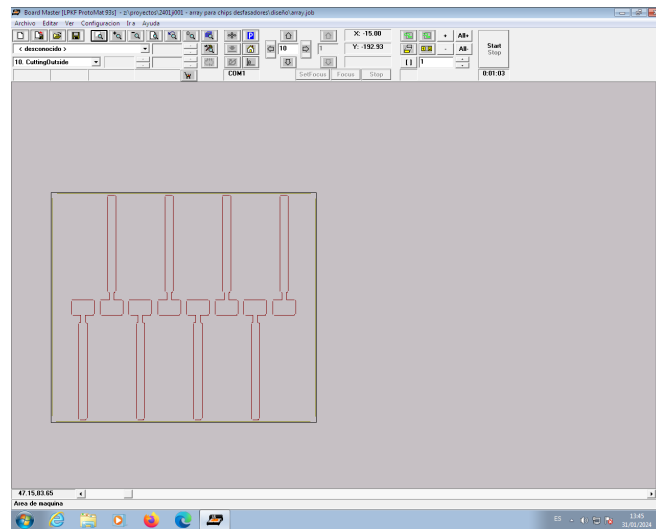


Figura 3.15: Captura del software BoardMaster.

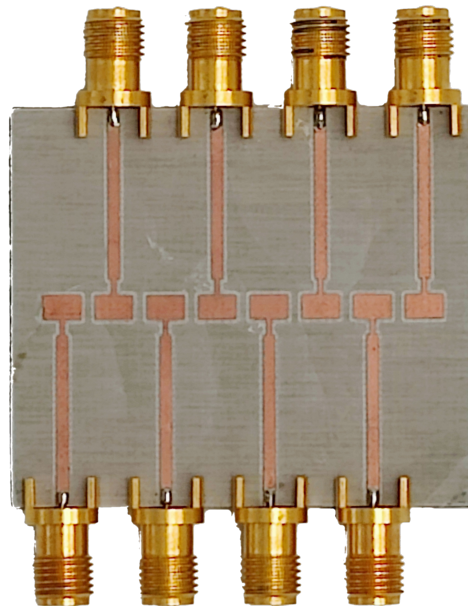
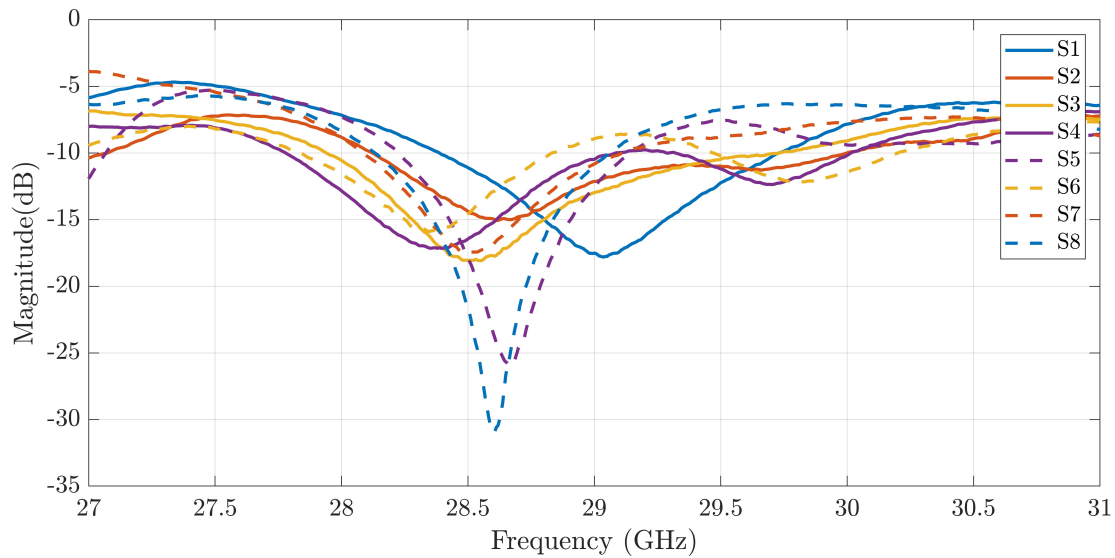


Figura 3.16: Foto de la antena.

Finalmente se tomaron medidas de los parámetros S activos de la antena (figura 3.17). Los resultados muestran que los mínimos se han desplazado, probablemente debido a la influencia de los conectores, puesto que no se tuvieron en cuenta en las simulaciones, y/o la incertidumbre en la permitividad del dieléctrico en esta banda de frecuencias. También

se debe de tener en cuenta que el método utilizado para la fabricación de este diseño no es el adecuado, y es que una antena de una frecuencia tan alta debería haberse fabricado mediante fotolitografía. Sin embargo, en vista de que el objetivo de este diseño es probar el funcionamiento de los chips desfasadores, se pueden considerar estos resultados como aceptables.



**Figura 3.17: Parámetros S activos medidos de la antena.**

### 3.4. Conclusión

A continuación se exponen las conclusiones más importantes extraídas de este capítulo:

- Se ha realizado el diseño de una celda unidad para una agrupación de antenas en tecnología microstrip a 29 GHz.
- Se ha estudiado una red de distribución para separar los puertos de entrada. Esto ha sido necesario para la implementación real del prototipo teniendo en cuenta los conectores disponibles en el mercado.
- Se ha estudiado y fabricado un diseño de antena que alterna la ubicación de los parches para generar el espacio necesario de los conectores. La directividad máxima de esta antena es de 14.25 dBi.

## Capítulo 4

# Desarrollo del software

Este capítulo tiene como propósito explicar el funcionamiento básico, función y uso del software desarrollado para controlar los chips TRHJ-4011 y TRHJ-4041. La funcionalidad del software original es conectarse al chip, controlar qué canales se abren, configurar una amplitud y fase para cada uno de ellos, hacer un seguimiento de la temperatura y permitir manipular los ‘Control Registers’ del chip. Al desarrollar un código propio no solo se consigue entender mejor el funcionamiento del chip y su SPI, sino que además se espera poder sacar mayor provecho de ellos.

### 4.1. Resumen y estructura del código

El código está escrito en Matlab y se ha usado Matlab App Designer como *framework* del programa. Además se usa el *Data Acquisition Toolbox app* para poder entablar comunicación con el SPI del chip. El programa consiste en dos aplicaciones, siendo la principal (ver figura 4.1) la encargada de emular las funciones básicas del software original. La aplicación secundaria (ver figura 4.2), es menos extensa y está destinada a los cálculos del factor de agrupación necesarios para la reconfiguración del haz. Esta segunda aplicación contiene todas las nuevas funcionalidades no presentes en el software original del fabricante.

El programa está diseñado de manera que existen dos tipos de funciones, las que interactúan con el chip y las que interactúan con la interfaz de la app.

### 4.2. Funcionalidad de la app principal

La app principal del programa se subdivide en 4 partes, cada una de ellas con el propósito de ejecutar un tipo distinto de función. Con estas funciones es posible encender y apagar los canales, configurarlos en una determinada amplitud y fase cada uno, mantener un seguimiento de la temperatura registrada por el chip y manipular los registros de control de éste.

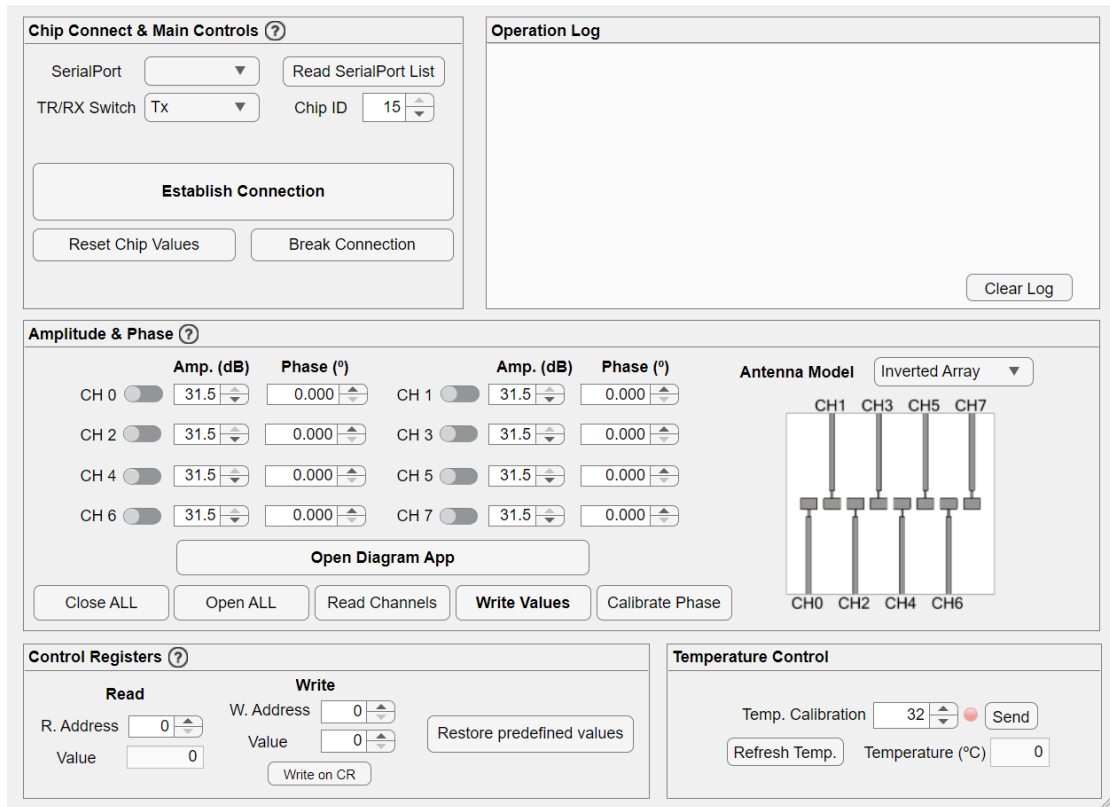


Figura 4.1: Interfaz de la app principal.

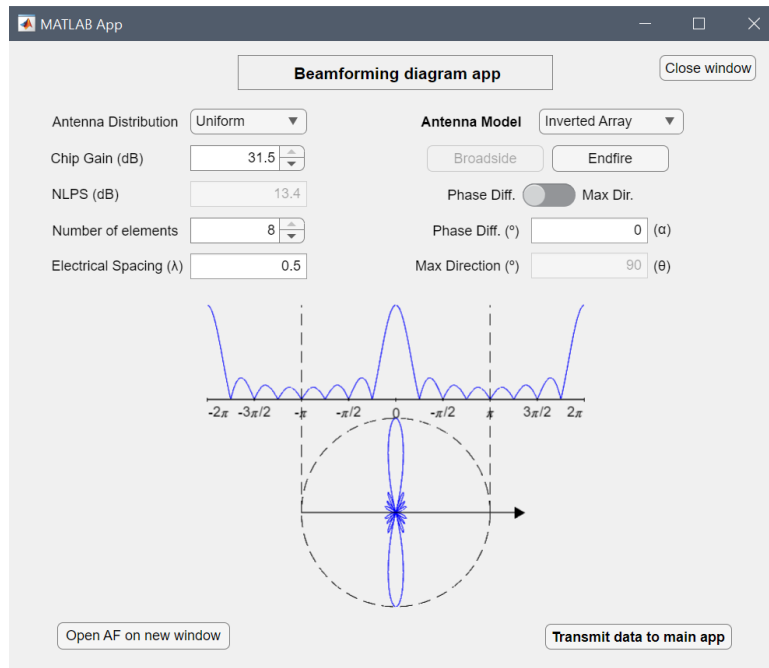
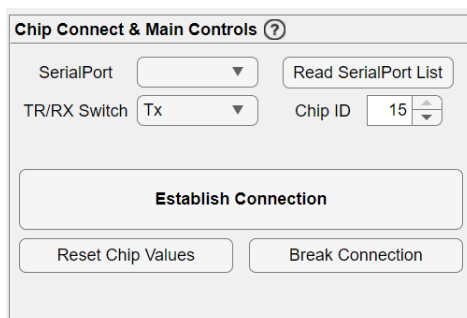


Figura 4.2: Interfaz de la app secundaria.

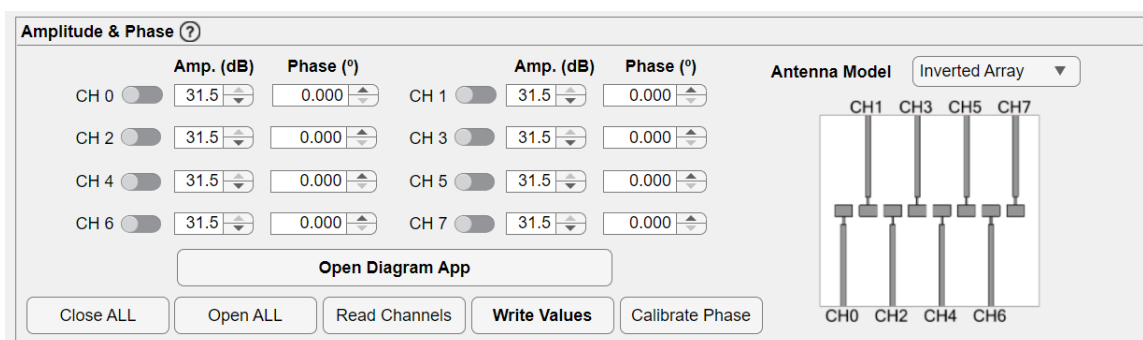
### 4.2.1. Establecimiento de la conexión



**Figura 4.3: Interfaz del programa para comenzar la conexión.**

El cuadro ‘Chip Connect & Main Controls’ permite al usuario establecer la conexión con el chip TRHJ-4011 o 4041. El cuadro ‘SerialPort’ se actualizará al inicio del programa o al pulsar el botón ‘Read SerialPort List’ con el puerto USB en el que detecte una conexión compatible. El campo ‘Chip ID’ permite elegir a qué chip se está conectando el usuario, pese a que por defecto el ID del chip de prueba es 15. ‘Establish Connection’ ejecuta la serie de funciones necesarias para establecer conexión con el SPI del chip y así poder usar el resto de funcionalidades del programa. ‘Break Connection’ finalizará la conexión con el chip y ‘Reset Chip Values’ restablecerá los valores por defecto de los ‘Control Registers’ del chip.

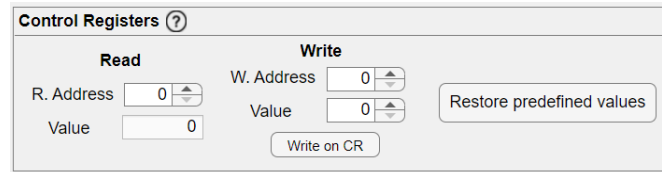
### 4.2.2. Control de amplitud y fase



**Figura 4.4: Interfaz del programa para configurar los canales.**

El cuadro ‘Amplitude & Phase’ recoge las funcionalidades necesarias para, una vez establecida la conexión, encender cada uno de los canales y ajustar su amplitud y fase. Los 5 botones de la parte inferior permiten cerrar o abrir todos los canales, leer del chip la amplitud y fase de cada canal, escribir los valores introducidos en los campos y calibrar la fase con los valores calculados en la parte de caracterización. El botón ‘Open Diagram App’ abre la aplicación secundaria. Por último, permite seleccionar el modelo de la antena con el que se está trabajando y muestra la forma en la que se debe de conectar cada canal.

### 4.2.3. Manipular los Control Registers

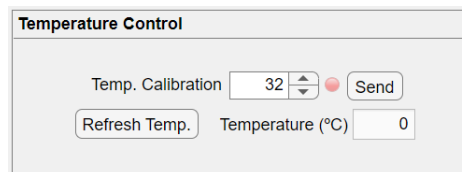


**Figura 4.5: Interfaz del programa para configurar los canales.**

Este panel (figura 4.5) está dedicado a la manipulación de los Control Registers del chip. Los valores de estas direcciones tienen como función determinar el comportamiento base del chip. Este cuadro permite leer cada una de las 64 direcciones de memoria y sobrescribir el valor que hubiera. También incluye un botón que vuelve a cargar los valores predeterminados si así se quisiera.

El botón 'Reset Chip Values' del panel 'Chip Connect & Main Controls' también restaura los valores predeterminados de los Control Registers, pero reiniciando todo el chip en el proceso.

### 4.2.4. Registro de temperatura



**Figura 4.6: Panel para controlar la calibración de temperatura.**

El chip necesita calibrarse con la temperatura ambiente para ajustar la corriente que consume. El usuario puede modificar el campo 'Temp. Calibration' y enviarla al chip hasta que la temperatura que detecte éste sea próxima a la ambiente. El color del LED indica si el valor del campo coincide con el del registro de memoria del chip, verde si lo hace y rojo en caso contrario.

Por último, la interfaz incluye un registro de operaciones con el que el usuario podrá hacer un seguimiento de las operaciones ejecutadas así como ver el resultado de las instrucciones de lectura.

## 4.3. Funcionalidad de la app secundaria

Por otro lado, la app secundaria (figura 4.2) permite al usuario manipular las amplitudes y fases de los canales teniendo en cuenta las características de la antena en uso. Es posible configurar una distribución uniforme o de Taylor (para diagramas de bajos lóbulos secundarios). De nuevo, el desplegable 'Antenna Model' permite seleccionar el modelo de



antena que se esté usando y así tener en cuenta los desfases por defecto que le correspondan si es necesario.

En caso de tener una distribución uniforme, el usuario podrá introducir la diferencia de fase entre las antenas, o bien la dirección de apuntamiento que desee, en cuyo caso el programa se encargará de calcular la diferencia de fase necesaria. En cualquier caso, en la parte inferior de la interfaz podrá encontrar una previsualización del diagrama de radiación en unidades lineales, o si lo deseara, pulsar el botón 'Open AF on new window' para verlo en unidades logarítmicas, así como un botón para transmitir los datos a la app principal.

La configuración de distribución de Taylor permite configurar una distribución de amplitud para reducir la amplitud de la radiación en las direcciones fuera del haz principal, con un nivel de lóbulo principal a secundario (NLPS) dado.

En la figura 4.7 se ha configurado una diferencia de fase de  $40^\circ$  y posteriormente se ha presionado el botón 'Open AF on new window' para tener una previsualización del factor de array.

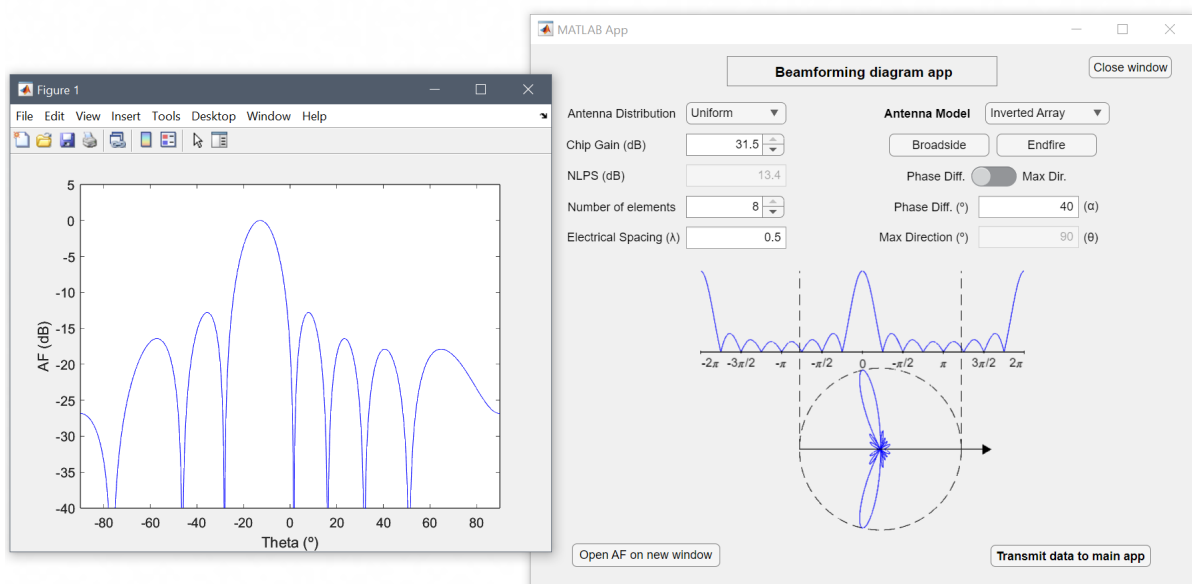


Figura 4.7: Ejemplo de uso de la app secundaria.

#### 4.4. Instrucciones codificables

El programa funciona en base a una serie de funciones que se usan de forma recurrente. En ocasiones se usan varias de ellas para una sola funcionalidad. Fundamentalmente, la comunicación con el SPI del chip se realiza con tramas de 20 bytes, de los cuales 3 (los bytes 7, 8 y 9) contienen la información de la instrucción que se va a ejecutar. Estos 24 bits se codifican para formar las instrucciones que hacen funcionar al chip. La estructura para componer las instrucciones se muestra en la tabla 4.8. Esta tabla se ha extraído del manual de los chips.

Sending order	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20	D21	D22	D23
Channel switch	Chip ID			Read and write		Function selection			NULL								Channel number							
	MSB	LSB		Read 1 and write 0		0	0	0									MSB	LSB						
Amplitude phase	Chip ID			Read and write		Function selection			NULL	Channel selection			Amplitude						Phase					
	MSB	LSB		Read 1 and write 0		0	0	1		MSB	LSB		MSB			LSB			MSB	LSB				
Phase meter	Chip ID			Read and write		Function selection			Phase table address				MLSB	NULL	Data									
	MSB	LSB		Read 1 and write 0		0	1	1	MSB			LSB				MSB		LSB						
Signal register	Chip ID			Read and write		Function selection			Register address			Register data												
	MSB	LSB		Read only 1		0	1	0	1	MSB		LSB		MSB										LSB
Control register	Chip ID			Read and write		Function selection			Register address				Register data											
	MSB	LSB		Read 1 and write 0		0	1	0	0	1	MSB			LSB		MSB						LSB		

Figura 4.8: Estructura general de las instrucciones.

Como se puede observar, tenemos 5 tipos de instrucciones distintas. No obstante, el fabricante recomendó abstenerse de usar las instrucciones 'Phase meter'. Estas instrucciones cargan un desfase por defecto entre los canales, y se abstuvieron de dar más explicaciones.

- **Channel Switch:** Controla el suministro de potencia, los bits de D16 a D23 corresponden a cada uno de los canales, siendo el MSB el canal 7 y el LSB el 0, nivel alto significa encendido y bajo apagado.
- **Amplitude Phase Register:** Las instrucciones de registro de amplitud configuran la amplitud y fase de cada canal. La instrucción debe indicar el canal que se va a configurar con los bits D9 a D11, y la amplitud y fase deseadas con los bits D12 a D23.
- **Control Register:** Las instrucciones de control de registros permiten manipular los 64 controles de registro que tiene el chip. El manual incluye una tabla con una descripción de cada uno de ellos, aunque no se recomienda manipular la mayoría de ellos ya que definen el comportamiento normal del chip. El único que conviene cambiar es el registro 63 puesto que es el que define la calibración de temperatura del chip.
- **Signal Register:** Es una instrucción solo de lectura y sirve para poder calcular la temperatura que los ADC (Analog-To-Digital) miden de los sensores del chip.

Excepto las instrucción 'Signal Register', el resto pueden usarse para lectura o escritura. En caso de lectura, los bits posteriores a la línea negra de la figura 4.8 serán ignorados.

## 4.5. Funciones del software

En esta sección se cubrirán las funciones básicas del software. De la trama de 20 bytes, los dos primeros bytes siempre serán **0x0014**, el siguiente byte dependerá del tipo de instrucción que se desea ejecutar, siendo **0x31** para operación de escritura, **0x32** para lectura, y **0x33** para reset. Además, únicamente en el caso de ejecutar una función de escritura, la siguiente trama de 20 bytes enviado deberá empezar por **0x001435** para confirmar la operación. El resto de los bytes de este envío se ignoran.

El siguiente ejemplo es la función ChannelSwitch, usada para cambiar qué canales están encendidos.

```
1 function ChannelSwitch(app)
2
3 cmd = zeros(1, 20, 'uint8');
4 cmd(2) = 0x14;
5 cmd(3) = 0x31;
6
7 cmd35 = zeros(1, 20, 'uint8');
8 cmd35(2) = 0x14;
9 cmd35(3) = 0x35;
```

En primer lugar se crea un vector de 20 bytes vacío, el segundo byte se instancia como 0x14 y el tercero como 0x31 debido a que queremos escribir en el chip que abra los canales. También se monta el vector con el tercer byte de valor 35 para confirmar la operación. A continuación se forma la instrucción de acuerdo a la tabla de la figura 4.8.

```
1 Read_Write = 0;
2 FunctSelection = [0 0 0]
3
4 SPI_bin = [app.chipID Read_Write FunctSelection
           decimalToBinaryVector(0,8) app.ChannelsStatus];
```

donde `app.chipID` es el identificador del chip en binario y `app.ChannelsStatus` es un vector de 8 bits, donde el MSB corresponde al canal 7 y el LSB al 0 y el nivel alto indicará que se debe encender el canal. Una vez tenemos el vector de 24 bits, lo codificamos en hexadecimal y se introduce a la trama de 20 bytes.

```
1 SPI_hex = binaryVectorToHex(SPI_bin);
2 cmd(7) = hex2dec(SPI_hex(1:2));
3 cmd(8) = hex2dec(SPI_hex(3:4));
4 cmd(9) = hex2dec(SPI_hex(5:6));
5
6 write(app.s,cmd, 'uint8');
7 write(app.s,cmd35, 'uint8');
```

Finalmente, el comando `write` envía el vector con la instrucción así como la confirmación a través de `app.s`, el objeto que hace la función de interfaz entre Matlab y el puerto serie.

Todas las instrucciones que interactúen con la memoria del chip tienen una estructura similar. Se crea un vector de bytes que se rellena de acuerdo a la instrucción que se quiera construir. Junto a *ChannelSwitch*, algunas de las funciones más importantes son:

- **ReadChannelStatus(app)**: Esta función realiza una operación de lectura para determinar qué canales están actualmente abiertos. Se usa de forma recurrente para otras instrucciones, por ejemplo para la lectura de amplitudes y fases de los canales activos.
- **SetControlRegisters(app)**: Cuando se ejecute esta función se escribirán sobre los 64 registros de control los valores predeterminados. Se ejecuta con la función reset o al presionar el botón ‘Restore predefined values’ del cuadro ‘Control Registers’.
- **AmpPhsRegister(app,channel,Amp\_dB,Phs\_deg)**: Esta función tiene como entradas el canal que se desea manipular, la amplificación y la fase que se le aplicarán.
- **ReadAmplitudeAndPhase(app)**: En primer lugar leerá los canales activos con *ReadChannelStatus*. Si no hay canales activos lo indicará, pero si los hay ejecutará una instrucción de lectura por cada canal abierto, mostrando por el Operation Log la amplitud y fase de cada canal.
- **UpdateAmpAndPhsFromDiagramApp(app,Amplitudes,Phases)**: Esta función tiene la tarea de leer los valores de los campos de la app secundaria, aplicar cambios en función de la antena seleccionada y rellenar los campos de la app principal para que puedan ser escritos en el chip con *AmpPhsRegister*.

## 4.6. Uso del software

El software puede ser usado para ambos chips. Una vez esté listo el montaje y se encienda el *switch* de la placa de control, se puede ejecutar el programa, que leerá los puertos USB disponibles buscando la conexión del chip. ‘Establish connection’ ejecuta una serie de funciones que preparan la conexión con el chip. A partir de ahí y si todo ha ido bien, se indicará el éxito de la operación en el ‘Operation Log’ (figura 4.9). Finalmente se desbloquearán el resto de las funciones del chip y el programa debería ser completamente operacional.

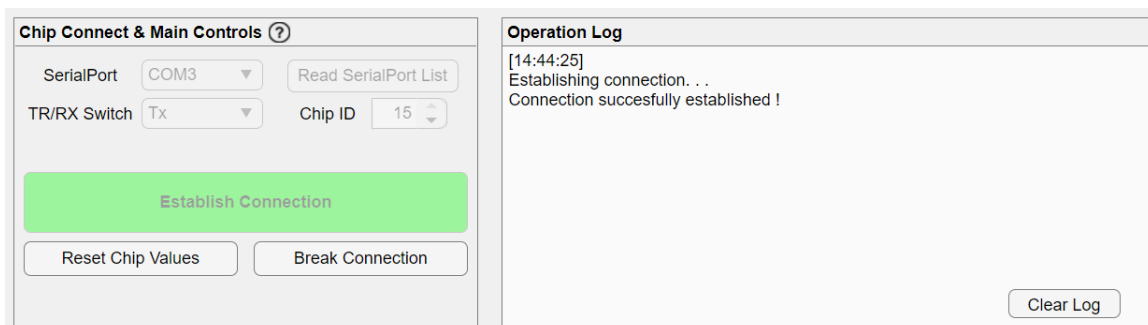


Figura 4.9: Ejemplo de conexión al chip.

Además, como se puede observar en las capturas, todos los cuadros tienen un botón de ayuda en la parte superior que de ser pulsados se abrirá una ventana de texto con indicaciones de uso para cada uno de los cuadros.

## 4.7. Conclusión

En este capítulo se ha presentado el desarrollo un software propio usando el App Designer de Matlab. Este software original es capaz de manejar los chips de manera funcional. Con el programa desarrollado es posible:

- Iniciar una conexión con el chip y establecer una interfaz para el envío y recepción de mensajes.
- Manipular los registros de control del chip para definir su funcionamiento.
- Leer el sensor de temperatura del chip y adaptar el consumo de corriente de acuerdo a la temperatura ambiente.
- Modificar la amplitud y fase de los canales y configurarlos fácilmente de acuerdo a una dirección de apuntamiento o un nivel de lóbulo secundario deseados.

## Capítulo 5

# Validación experimental

### 5.1. Introducción

El trabajo expuesto en los anteriores capítulos converge en una validación experimental en la cámara anecoica. El objetivo es comprobar que la caracterización del chip proporciona unos valores de calibración correctos, que la antena funciona correctamente y que el software en Matlab es capaz de controlar el chip.

### 5.2. Montaje en la cámara anecoica

Puesto que este TFG está enmarcado en un grupo de investigación que dispone de una cámara anecoica, ha sido posible realizar unas medidas para evaluar las prestaciones de la antena, así como la capacidad del chip para cambiar la dirección de apuntamiento de ésta.

Para el montaje de la antena en la cámara se unió la placa con el chip de transmisión a un soporte mediante una brida para asegurar la sujeción. La placa de control se colocó sobre el soporte también y se conectó mediante los cables USB Micro - RS422 y RS422 - USB a un ordenador portátil con el software desarrollado. La antena se instaló en el extremo del soporte y las señales de RF se conectaron a la placa mediante unos latiguillos coaxiales, todos ellos de la misma longitud para que no originar desfases. Finalmente se colocó una fuente de alimentación sobre la base del brazo que mueve el motor de la cámara para alimentar la placa. La antena receptora consiste en una bocina colocada en el extremo opuesto de la cámara. El resultado montaje se puede apreciar en las figuras 5.1 y 5.2. Las medidas se han tomado haciendo girar la antena en el plano horizontal, en elevación, manteniendo el acimut constante, y posteriormente se han procesado mediante Matlab.

### 5.3. Resultados

En primer lugar se tomaron medidas de cada uno de los parches individuales.

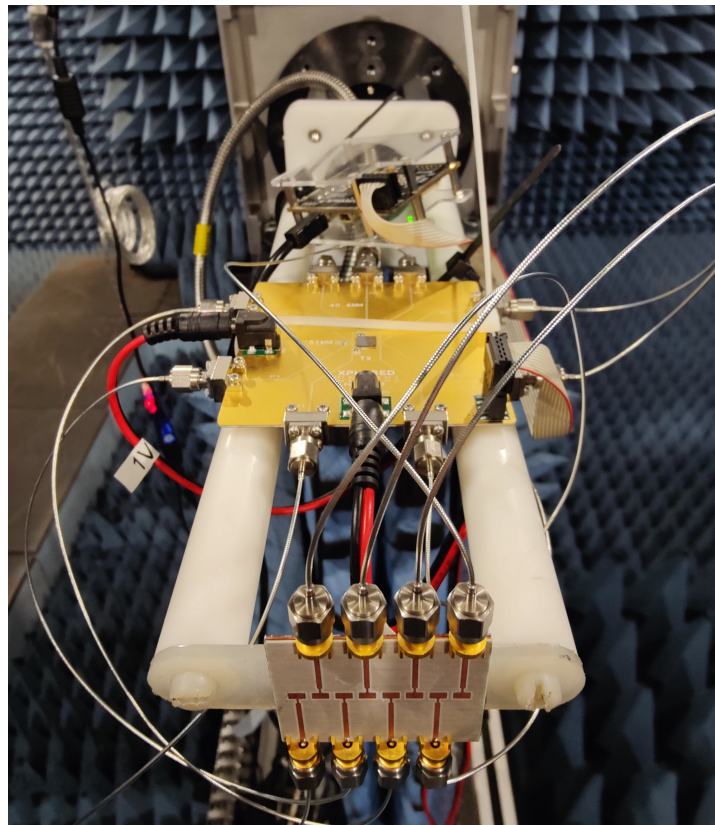


Figura 5.1: Fotografía del montaje en el soporte.

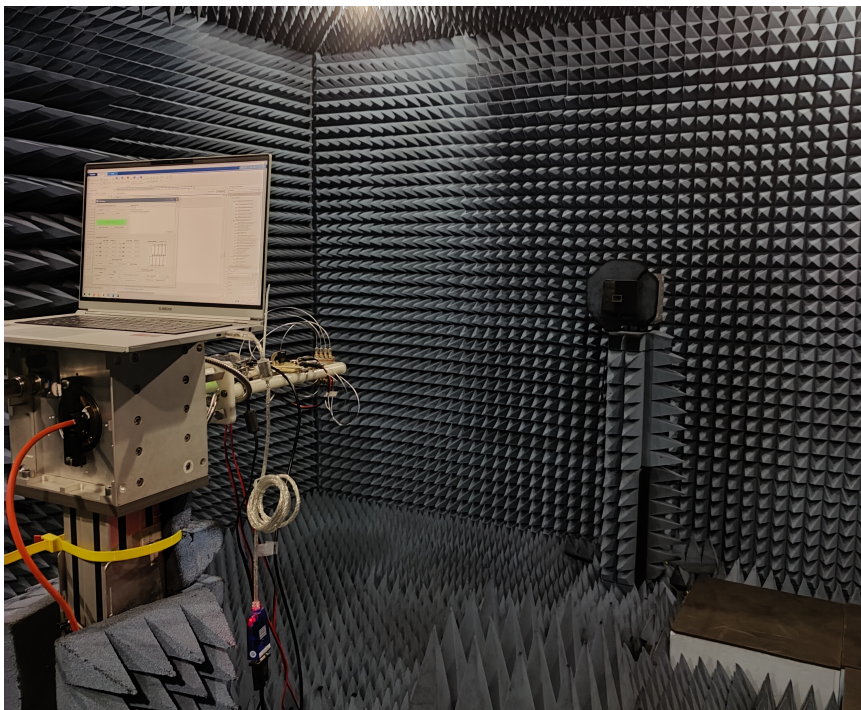
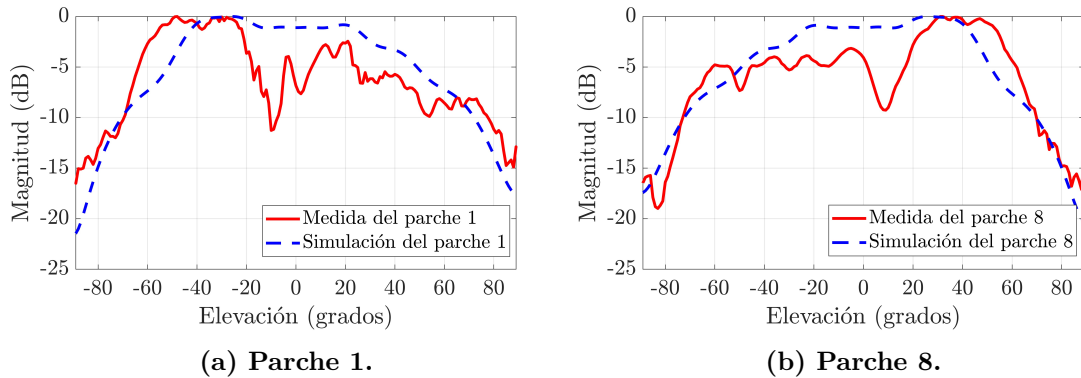
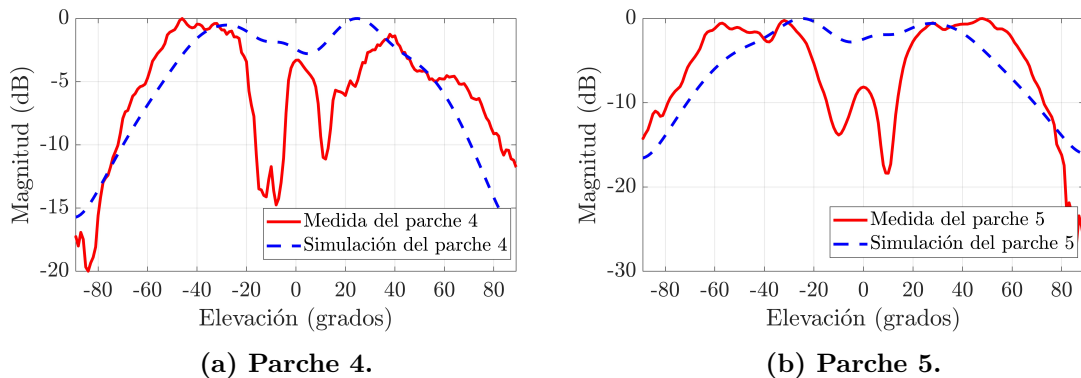


Figura 5.2: Fotografía de la cámara anecoica.

Los resultados de estas pruebas revelan que los diagramas de radiación de cada parche no se corresponden a los de las simulaciones en CST. Las figuras 5.3a y 5.3b comparan los diagramas de radiación de los parches ubicados en los extremos de la placa y las figuras 5.4a y 5.4b de los del centro. Se puede observar que por lo general se obtienen buenos resultados para rangos de apuntamiento entre  $-60^\circ$  y  $-20^\circ$  y entre  $20^\circ$  y  $60^\circ$ . Sin embargo, precisamente en el centro del diagrama, las medidas muestran caídas de 10 o incluso 15 dB, especialmente a los  $-10^\circ$  y  $10^\circ$  de apuntamiento.



**Figura 5.3:** Diagramas de radiación de los parches a los extremos de la placa.

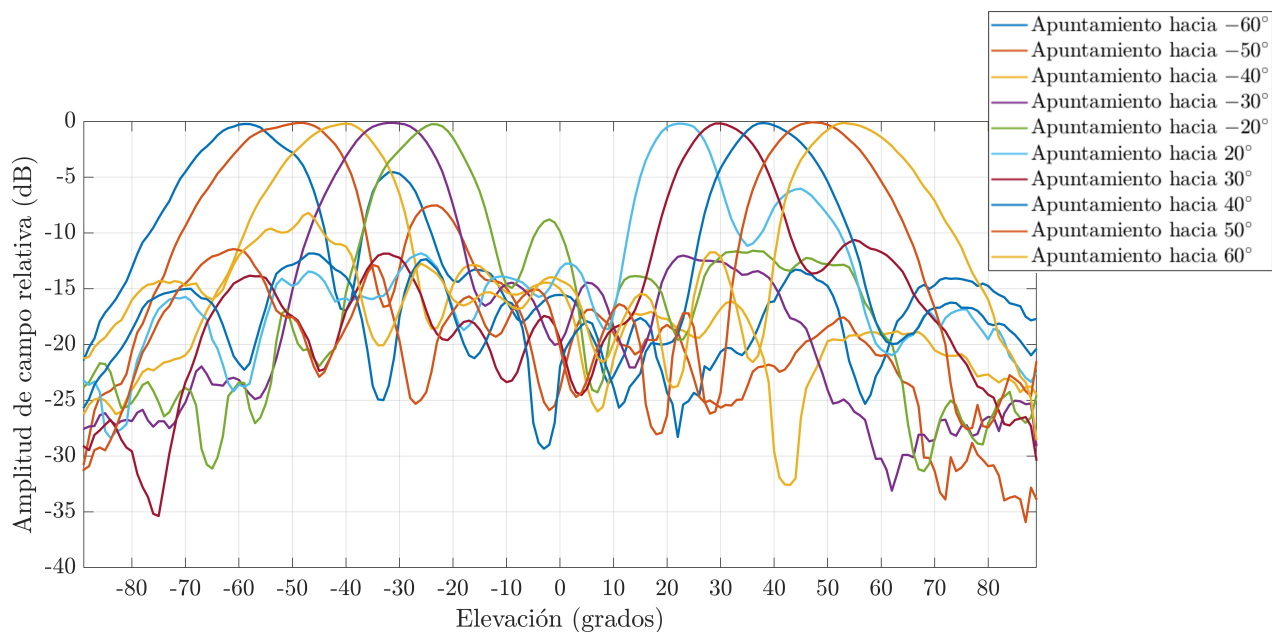


**Figura 5.4:** Diagramas de radiación de los parches en el centro de la placa.

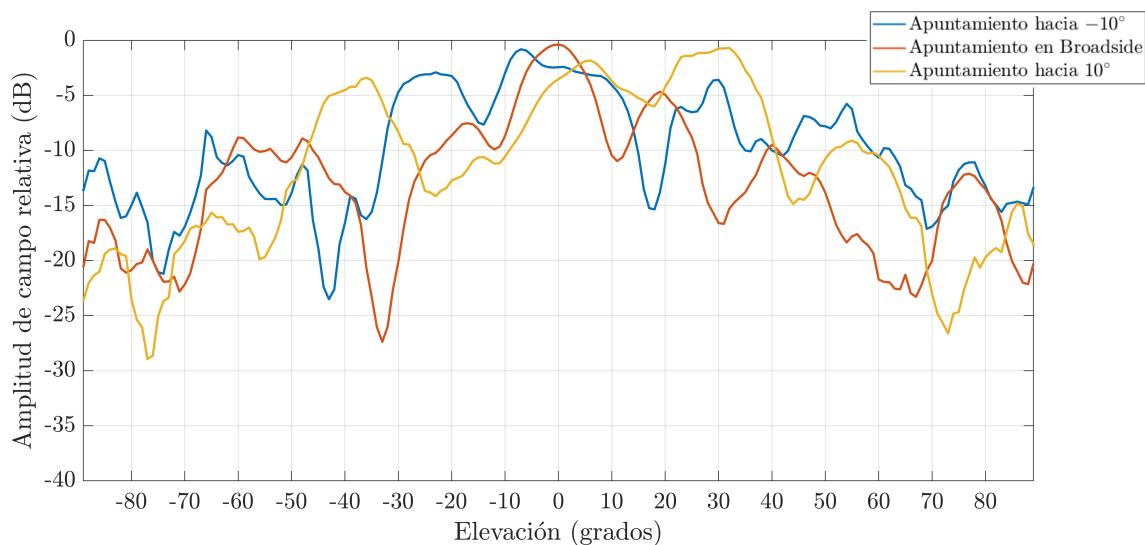
Muy probablemente el origen de este problema esté en el proceso de fabricación o en la influencia de los conectores. Este defecto provoca que la agrupación sea ineficiente a la hora de apuntar en broadside o a los  $-10^\circ$  o  $10^\circ$  de elevación.

Posteriormente se tomaron medidas de la agrupación completa, usando todos los parches para variar la dirección de apuntamiento del haz. Las figuras 5.5 y 5.6 recogen los resultados de estas pruebas. Al apuntar en direcciones entre los  $-60^\circ$  y  $-20^\circ$  y entre  $20^\circ$  y  $60^\circ$  se alcanzan muy buenos resultados. No obstante, al apuntar a los  $-10^\circ$ ,  $10^\circ$  o broadside los diagramas no presentan la forma esperada y están muy distorsionados.





**Figura 5.5:** Diagrama de radiación con apuntamientos desde  $-60^\circ$  hasta  $-20^\circ$  y desde  $20^\circ$  hasta  $60^\circ$ .



**Figura 5.6:** Diagrama de radiación con apuntamientos entre  $-10^\circ$  y  $10^\circ$ .

Independientemente de este defecto, se ha demostrado de manera satisfactoria que el chip conformador THRJ-4041 es capaz de variar la dirección de apuntamiento de un haz y además bajo el control del software desarrollado.

## 5.4. Conclusión

Las pruebas realizadas en la cámara anecoica revelan que:

- El chip THRJ-4041 sí puede ser utilizado para la formación de haces de apuntamiento variable.
- La antena diseñada cumple con las especificaciones deseadas pese a tener rango de  $20^\circ$  en el que no radia de forma adecuada.
- El software desarrollado en Matlab es capaz de controlar las funcionalidades del chip y la herramienta para calcular el desfase en función de la dirección de apuntamiento deseada funciona satisfactoriamente.

## Capítulo 6

# Conclusiones y líneas futuras

### 6.1. Conclusiones

Del presente trabajo fin de grado se puede concluir que:

- Se ha realizado la caracterización de los chips desfasadores THRJ-4011 y THRJ-4041 para medir sus prestaciones y corregir los defectos en desajuste de fase relativa entre canales.
- Se ha realizado el diseño de una antena reapuntable electrónicamente basada en tecnología microstrip consistente en una agrupación de  $1 \times 8$  parches radiantes invertidos y posteriormente se ha fabricado.
- Se ha desarrollado un software en Matlab utilizando el Matlab App Designer como *framework* para el control de los chips mencionados y ampliar en funcionalidades que son de interés para las pruebas.
- Finalmente se han realizado mediciones en una cámara anecoica para verificar el correcto funcionamiento de los chips, la antena y el software.

Es por estos puntos que es posible afirmar que los objetivos establecidos en este trabajo de fin de grado han sido alcanzados.

### 6.2. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Respecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, este trabajo se centra en herramientas y aplicaciones que serían capaces de proporcionar cobertura de comunicaciones por satélite a áreas subdesarrolladas o urbanas. Es por ello que este trabajo aplica al objetivo de industria, innovación y desarrollo sostenible (ODS 9).

### 6.3. Lineas futuras

El objetivo de este trabajo era evaluar el correcto funcionamiento de los chips desfasadores. Con esta tarea realizada, el siguiente paso consiste en investigar la implementación de estos chips en sistemas de un gran número de elementos radiantes, con el objetivo de conseguir antenas de alta capacidad de apuntamiento y elevada ganancia. Una red de alimentación de múltiples capas como la que se propone en [13] podría ser capaz de proporcionar potencia a los chips, así como distribuir la señal RF hasta unas antenas con doble polarización circular o lineal diseñadas con condiciones de contorno periódicas.

# Bibliografía

- [1] Tobias Chaloun et al. “Electronically Steerable Antennas for Future Heterogeneous Communication Networks: Review and Perspectives”. En: *IEEE Journal of Microwaves* PP (oct. de 2022), págs. 545-581. DOI: 10.1109/JMW.2022.3202626.
- [2] Ulf Gustavsson et al. “Implementation Challenges and Opportunities in Beyond-5G and 6G Communication”. En: *IEEE Journal of Microwaves* 1 (ene. de 2021), págs. 86-100. DOI: 10.1109/JMW.2020.3034648.
- [3] Sandra Roger et al. “5G V2V Communication With Antenna Selection Based on Context Awareness: Signaling and Performance Study”. En: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23.2 (2022), págs. 1044-1057. DOI: 10.1109/TITS.2020.3019530.
- [4] Amitava Ghosh et al. “Millimeter-Wave Enhanced Local Area Systems: A High-Data-Rate Approach for Future Wireless Networks”. En: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 32.6 (2014), págs. 1152-1163. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328111.
- [5] Federica Rinaldi et al. “Non-Terrestrial Networks in 5G & Beyond: A Survey”. En: *IEEE Access* 8 (sep. de 2020), págs. 165178-165200. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3022981.
- [6] Shicong Liu et al. “LEO Satellite Constellations for 5G and Beyond: How Will They Reshape Vertical Domains?” En: *IEEE Communications Magazine* 59 (jul. de 2021), págs. 30-36. DOI: 10.1109/MCOM.001.2001081.
- [7] Gunes Karabulut Kurt et al. “A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future”. En: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 23.2 (2021), págs. 729-779. DOI: 10.1109/COMST.2021.3066905.
- [8] Hideki Kirino y Koichi Ogawa. “A 76 GHz Multi-Layered Phased Array Antenna Using a Non-Metal Contact Metamaterial Waveguide”. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 60.2 (2012), págs. 840-853. DOI: 10.1109/TAP.2011.2173112.
- [9] Erio Gandini et al. “SIW Slotted Waveguide Array With Pillbox Transition for Mechanical Beam Scanning”. En: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 11 (2012), págs. 1572-1575. DOI: 10.1109/LAWP.2012.2235057.
- [10] Daniel Sánchez-Escuderos et al. “True-Time-Delay Mechanical Phase Shifter in Gap Waveguide Technology for Slotted Waveguide Arrays in Ka-Band”. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 69.5 (2021), págs. 2727-2740. DOI: 10.1109/TAP.2020.3030993.

- [11] Kevin Kai Wei Low et al. “A 17.7–20.2-GHz 1024-element K-band SATCOM phased-array receiver with 8.1-dB/KG/T,  $\pm 70^\circ$  beam scanning, and high transmit isolation”. En: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 70.3 (2022), págs. 1769-1778.
- [12] Kevin Kai Wei Low et al. “A 27–31-GHz 1024-element Ka-band SATCOM phased-array transmitter with 49.5-dBW peak EIRP, 1-dB AR, and  $\pm 70^\circ$  beam scanning”. En: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 70.3 (2022), págs. 1757-1768.
- [13] Xuan Luo et al. “A Scalable Ka-Band 1024-Element Transmit Dual-Circularly-Polarized Planar Phased Array for SATCOM Application”. En: *IEEE Access* 8 (2020), págs. 156084-156095. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3019174.
- [14] WM Abdel-Wahab et al. “A modular architecture for wide scan angle phased array antenna for K/Ka mobile SATCOM”. En: *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. IEEE. 2019, págs. 1076-1079.
- [15] *Ka Band 8-Channel Phased-Array Receiver IC [TRHJ-4011]*. Accessed: 2024-02-08. URL: <http://www.xphased.com/Products/mmic/9.html>.
- [16] *Ka Band 8-Channel Phased-Array Transmitter IC [TRHJ-4041]*. Accessed: 2024-02-08. URL: <http://www.xphased.com/Products/mmic/8.html>.
- [17] Xiaoxiong Gu, Duixian Liu y Bodhisatwa Sadhu. “Packaging and Antenna Integration for Silicon-Based Millimeter-Wave Phased Arrays: 5G and Beyond”. En: *IEEE Journal of Microwaves* 1 (ene. de 2021), págs. 123-134. DOI: 10.1109/JMW.2020.3032891.
- [18] Constantine A Balanis. *Modern antenna handbook*. John Wiley & Sons, 2011.