



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Diseño y validación de antenas en bandas milimétricas
para sistemas de detección y evitación (DAA) de
aeronaves no tripuladas

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación

AUTOR/A: Ruiz Alapont, Javier

Tutor/a: Balbastre Tejedor, Juan Vicente

Cotutor/a: Ferrando Bataller, Miguel

Cotutor/a externo: CHUQUITARCO JIMENEZ, CARLOS ALEXANDER

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



Agradecimientos

Quisiera, en esta instancia, agradecer a aquellas personas que me han ayudado directa o indirectamente en la recta final de mi titulación. En primer lugar, dar las gracias a Juan Vicente Balbastre Tejedor por darme la oportunidad de realizar un trabajo de fin de grado acorde con mis preferencias y haber confiado en mí para realizar este proyecto. También dar las gracias encarecidamente a Carlos Alexander Chuquitarco Jiménez, que ha estado conmigo guiándome, aconsejándome y echando un cable siempre que lo he necesitado. Además, debo agradecer también a Miguel Ferrando Bataller, porque sin él el diseño no habría salido adelante, ya que ha sido una persona fundamental en la ayuda del diseño de nuestra antena y por ende de este proyecto. Por último, gracias a mi familia y amigos; sin ellos este largo camino habría sido imposible.



Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado, se llevó a cabo el desarrollo de un modelo de antena radar con el objetivo de diseñar, validar y construir un prototipo funcional para la detección de objetos en 360° de acimut. Este tipo de antena se utiliza en sistemas de detección y evitación de colisiones entre aeronaves, conocido como Detect and Avoid (DAA).

El proyecto comenzó estableciendo los objetivos de diseño de la antena, tanto en términos de rendimiento (ganancia, ancho de haz, nivel de lóbulo principal a secundario y adaptación) como de aeronavegabilidad (peso, tamaño y forma). Se propuso un concepto de antena monopulso y se desarrollaron y analizaron varios modelos 3D basados en dicho concepto utilizando el software CST. A través de un proceso iterativo, se logró obtener un diseño que cumplía con los requisitos establecidos.

Posteriormente, se construyó un prototipo del modelo final utilizando impresión 3D metalizada. El prototipo fue sometido a mediciones en la cámara anecoica del instituto ITEAM de la UPV. Los resultados obtenidos en las mediciones fueron muy similares a los predichos por las simulaciones, lo que valida el concepto de antena propuesto en este trabajo de fin de grado.

Resum

En aquest Treball de Fi de Grau, es va dur a terme el desenvolupament d'un model d'antena radar amb l'objectiu de dissenyar, validar i construir un prototip funcional per a la detecció d'objectes en 360° d'acimut. Aquest tipus d'antena s'utilitza en sistemes de detecció i evitació de col·lisions entre aeronaus, conegut com Detect and Avoid (DAA).

El projecte va començar establint els objectius de disseny de l'antena, tant en termes de rendiment (guany, ample de feix, nivell de lòbul principal a secundari i adaptació) com d'aeronavegabilitat (pes, mida i forma). Es va proposar un concepte d'antena monopols i es van desenvolupar i analitzar diversos models 3D basats en aquest concepte utilitzant el programari CST. Mitjançant un procés iteratiu, es va aconseguir obtenir un disseny que complia els requisits establerts.

Posteriorment, es va construir un prototip del model final utilitzant impressió 3D metal·litzada. El prototip va ser sotmès a mesuraments a la cambra anecoica de l'institut ITEAM de la UPV. Els resultats obtinguts en els mesuraments van ser molt similars als predits per les simulacions, cosa que valida el concepte d'antena proposat en aquest treball de fi de grau.

Abstract

In this Final Degree Project, the development of a radar antenna model was carried out with the aim of designing, validating and building a functional prototype for the detection of objects in 360° of azimuth. This type of antenna is used in collision detection and avoidance systems between aircraft, known as Detect and Avoid (DAA).

The project began by setting design goals for the antenna, both in terms of performance (gain, beamwidth, main-to-secondary lobe level, and matching) and airworthiness (weight, size, and shape). A monopulse antenna concept was proposed and several 3D models based on that concept were developed and analyzed using the CST software. Through an iterative process, it was possible to obtain a design that met the established requirements.



Subsequently, a prototype of the final model was built using metallic 3D printing. The prototype was subjected to measurements in the anechoic chamber of the ITEAM Institute of the UPV. The results obtained in the measurements were very similar to those predicted by the simulations, which validates the antenna concept proposed in this final degree project.



Índice

Capítulo 1.	Introducción	1
Capítulo 2.	Contexto y necesidad	2
2.1	Operaciones de aeronaves no tripuladas (UAS).....	2
2.2	Contexto regulatorio.....	3
2.3	Sistemas de detección y evitación (DAA).....	4
2.3.1	Sistemas DAA en el contexto de las operaciones de UAS	4
2.3.2	Sistemas radar para DAA.....	5
2.3.3	Antenas radar aerotransportadas para detección y seguimiento de blancos..	5
2.4	Contribución de las operaciones de UAS a la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas.....	6
Capítulo 3.	Objetivos del trabajo.	8
Capítulo 4.	Metodología de trabajo	9
4.1	Organización del trabajo	9
4.2	Herramienta de simulación (CST STUDIO SUITE).....	9
4.3	Herramientas de impresión 3D.....	11
4.4	Sistema de medida de antenas.....	11
4.5	Planificación del trabajo.....	13
Capítulo 5.	Formulación del concepto de antena radar.....	14
5.1	Requisitos funcionales	14
5.2	Definición razonada del concepto.	15
5.3	Concepto de antena monopulso	16
5.3.1	Arquitectura monopulso.....	17
5.4	Antena sectorial cilíndrica de haces apilados.....	18
5.4.1	Alimentación de la Antena.....	20
Capítulo 6.	Validación por simulación	24
6.1.1	Resultados de los diagramas que se obtuvieron con el primer modelo que se diseñó (modelo preliminar).....	24
6.1.2	Resultados de los diagramas que se obtuvieron con el segundo modelo de diseño. 26	
6.1.3	Resultados de los diagramas que se obtuvieron con el tercer modelo modelo que se diseñó.....	28



6.1.4	Resultados de los diagramas que se obtuvieron con el cuarto modelo que se diseñó.....	33
6.1.5	Resultados de la respuesta para el diseño final (1) a 1 mm de espesor.....	38
6.1.6	Parámetros de reflexión S para el modelo a 1 mm de grosor.....	43
6.1.7	Resultados de la respuesta para el diseño final (2) a 1.5 mm de grosor.....	44
6.1.8	Parámetros de reflexión S para el modelo a 1.5 mm de grosor.....	47
Capítulo 7.	Validación experimental:	50
7.1	construcción del prototipo.....	50
7.1.1	Modelo impresión 3D con 1 mm de grosor	50
7.2	Modelo impresión 3D con 1.5 mm de grosor	50
7.2.1	Modelo impresión 3D metalizado	51
7.2.2	Modelo del soporte utilizado para la medición en cámara anecoica.....	52
7.3	Caracterización experimental del prototipo	52
7.3.1	Proceso de obtención de los resultados en cámara anecoica.....	52
7.4	Exposición de los resultados obtenidos.....	53
7.5	Validación experimental del concepto.	54
Capítulo 8.	Diseminación y explotación de los resultados.	60
Capítulo 9.	Bibliografía	61



Capítulo 1. Introducción

Durante los últimos años y a medida que se ha ido avanzando en las nuevas tecnologías, y con la aparición más notable del uso de aeronaves no tripuladas, ha surgido la necesidad de crear sistemas específicos para evitar colisiones entre estas, así como entre aeronaves tripuladas y no tripuladas, haciendo el espacio aéreo mucho más seguro de cara al futuro. Para ello, se cuenta con los sistemas *Detect and Avoid* (DAA), que se utilizan en sistemas de aéreos no tripulados (UAS) y que pueden activar una serie de respuestas para evitar la colisión, como cambiar la trayectoria del dron o detenerlo por completo. Los sistemas DAA utilizan distintas tecnologías para detectar y seguir la trayectoria (*track*) de las aeronaves (*threat*) que podrían colisionar con la aeronave en la que está instalado el sistema (*ownship*). Uno de los sensores utilizados para DAA son los sistemas radar.

Un problema que presentan los radares para DAA es que, debido a restricciones de espacio y aeronavegabilidad, sus antenas deben ser compactas y de bajo peso, al tiempo que deben proporcionar una resolución angular suficiente como para discriminar dos drones separados lateralmente por la distancia mínima de separación aplicable.

El propósito de este trabajo es validar un concepto de antena radar de bajo perfil aerodinámico y bajo peso que permita al radar detectar blancos en las condiciones requeridas por los sistemas DAA. La resolución angular se conseguirá mediante procesamiento monopulso para evitar tamaños de antena excesivos. La validación se ha realizado mediante simulación de diseños basados en el concepto propuesto mediante haciendo uso de la herramienta de diseño CST® y mediante medidas en laboratorio de un prototipo basado en el mismo.

Capítulo 2. Contexto y necesidad

2.1 Operaciones de aeronaves no tripuladas (UAS).

Los sistemas aéreos no tripulados (UAS) han experimentado un aumento significativo de interés en el ámbito civil desde principios del siglo XXI. Se espera que su uso tenga una amplia gama de aplicaciones profesionales en campos como la movilidad urbana, la entrega de paquetes, la seguridad pública, el entretenimiento, la agricultura y la inspección de infraestructuras. A nivel de la Unión Europea, se prevé una alta demanda de UAS, lo que podría generar la creación de más de 400.000 empleos altamente calificados para 2050.

Se estima que la flota de UAS para uso comercial y gubernamental superará las 400.000 aeronaves, y se espera que el número de usuarios de ocio alcance los 7 millones. En el futuro, se espera que las horas de vuelo de los UAS en el espacio aéreo de baja altitud (VLL) sobre áreas urbanas densamente pobladas superen el 75% del total de horas de vuelo, incluyendo aeronaves tripuladas y no tripuladas.

Sin embargo, el uso de UAS conlleva riesgos que deben abordarse, como accidentes terrestres y aéreos, problemas de privacidad, seguridad cibernética e impacto ambiental. Aunque los beneficios esperados del uso de UAS superan ampliamente estos riesgos, es importante gestionarlos adecuadamente.

La Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA) ha propuesto conceptos para estandarizar la comunicación en Europa. Estos conceptos incluyen los Servicios Aéreos Innovadores (IAS) que benefician a los ciudadanos y al mercado de la aviación, la Movilidad Aérea Innovadora (IAM) que busca una movilidad aérea segura, eficiente y sostenible, y la Movilidad Aérea Urbana (UAM) que se centra en operaciones en entornos urbanos.

En resumen, los UAS tienen un enorme potencial en diversos sectores, pero es necesario abordar los riesgos asociados para aprovechar plenamente sus beneficios. Se están desarrollando normas y conceptos para regular y estandarizar su uso en Europa.

Aunque los beneficios esperados del uso de UAS son mucho mayores que los riesgos asociados, es importante abordar estos riesgos para aprovechar plenamente los beneficios. La Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA) ha introducido conceptos para estandarizar la comunicación a nivel europeo y desarrollar normas relacionadas. Estos conceptos incluyen los Servicios Aéreos Innovadores (IAS), que benefician a los ciudadanos y al mercado de la aviación mediante operaciones y servicios habilitados por nuevas tecnologías aéreas. También se encuentra la Movilidad Aérea Innovadora (IAM), que busca una movilidad aérea segura, eficiente y sostenible de pasajeros y carga mediante tecnologías de nueva generación integradas en un sistema de transporte multimodal. Además, se considera la Movilidad Aérea Urbana (UAM), que se refiere a las operaciones IAM realizadas dentro, dentro o fuera de entornos urbanos. Estos conceptos buscan regular y estandarizar el uso de UAS en Europa.

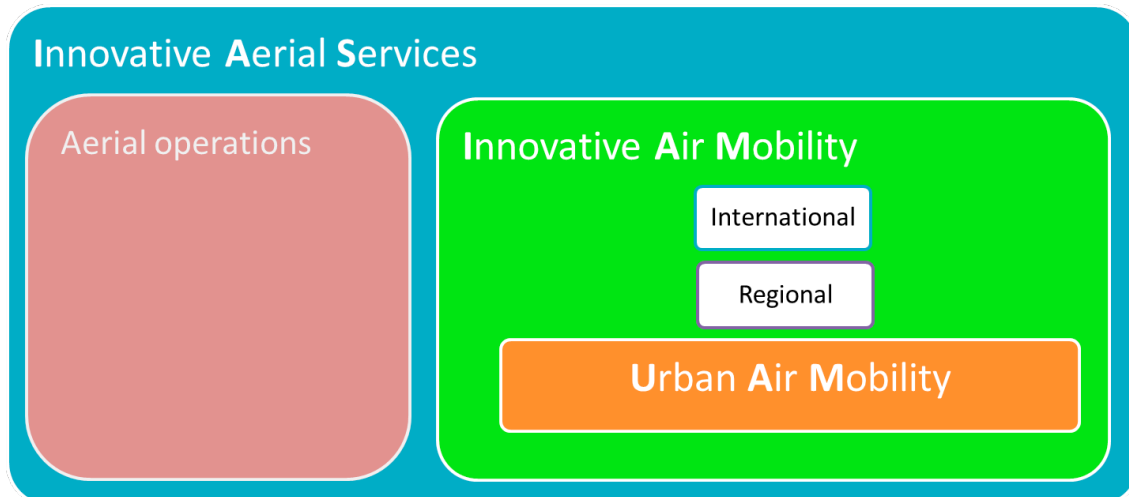


Figura 1. Dominios de operaciones de los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) y aeronaves de despegue y aterrizaje vertical (VTOL)

2.2 Contexto regulatorio

El siguiente apartado proporciona una visión general de la regulación de las operaciones de UAS en la UE, incluyendo los modos de operación, las categorías de operación y los requisitos asociados.

1. Regulación de UAS en la UE:

- La Agencia de Seguridad Aérea de la Unión Europea (EASA) es responsable de establecer una regulación común sobre las operaciones de UAS en la UE.
- La EASA trabajó en conjunto con la Comisión Europea para aprobar dos reglamentos:
 - a) Reglamento Delegado (UE) 2019/945: Se refiere a los sistemas de aeronaves no tripuladas y a los operadores de terceros países de sistemas de aeronaves no tripuladas.
 - b) Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947: Trata sobre las normas y procedimientos para la operación de aeronaves no tripuladas.

2. Modos de operación de UAS:

- Visual Line of Sight (VLOS): El piloto remoto mantiene contacto visual directo con la aeronave no tripulada.
- Beyond Visual Line of Sight (BVLOS): Operaciones que no se realizan dentro del rango de visión directa. Puede involucrar el uso de observadores remotos o el modo "sígueme".
- Modo autónomo: La aeronave no tripulada opera sin intervención directa del piloto remoto.

3. Zonas geográficas y capacidades requeridas:

- Las zonas geográficas para UAS se definen por motivos de seguridad, protección, privacidad y medio ambiente.
- Las capacidades requeridas para ciertas operaciones incluyen la geo-conciencia y la identificación remota directa.

4. Categorías de operación:

- a) Categoría abierta: Operaciones de menor riesgo que no requieren procedimientos de cumplimiento aeronáutico estándar.
 - b) Categoría certificada: Operaciones que requieren certificación del operador, licencia de pilotos remotos y certificación de la aeronave.
 - c) Categoría específica: Operaciones que presentan un nivel medio de riesgo y requieren una evaluación de riesgos detallada y medidas de mitigación específicas.
- Para operar en la categoría específica, los operadores deben solicitar una Autorización Operativa (OA) y realizar una evaluación de riesgos.
 - Las operaciones de menor riesgo pueden basarse en Escenarios Estándar (STS) o en una Evaluación de Riesgos Predefinida (PDRA) publicada por la EASA.

2.3 Sistemas de detección y evitación (DAA).

2.3.1 Sistemas DAA en el contexto de las operaciones de UAS

El concepto de detección y evasión (DAA) se originó cuando la FAA comenzó el desarrollo del sistema de evasión de colisiones en vuelo (ACAS X) para mejorar las capacidades de evitación de colisiones. Mientras que ACAS X mejoró la capacidad de evitación de colisiones para aeronaves tripuladas, ACAS Xu se desarrolló para sistemas no tripulados y se convirtió en un sistema completo de DAA que integra funciones de mantenerse a distancia segura (RWC) y evitación de colisiones (CA).

La función RWC se refiere a maniobras tácticas realizadas para mitigar el riesgo de colisión al operar junto con aeronaves tripuladas en espacios aéreos no segregados. La función CA implica maniobras urgentes realizadas como último recurso para evitar colisiones en el aire cuando otros modos de separación han fallado.

El desarrollo del concepto de DAA involucró los trabajos de los comités RTCA SC-147 y SC-228, centrándose en ACAS y RWC, respectivamente. Hubo una necesidad de definir y armonizar los límites entre RWC y CA. ACAS sXu se desarrolló como una extensión de ACAS Xu para sistemas de aeronaves no tripuladas pequeñas.

En términos regulatorios, solo se requiere que los UAS certificados que vuelan fuera de las clases A a C en espacios aéreos controlados bajo reglas de vuelo instrumental estén equipados con sistemas de evitación de colisiones. En espacios aéreos de muy baja altitud, el uso de DAA se puede considerar para reducir el riesgo aéreo en operaciones más allá de la línea de visión visual (BVLOS). En Europa, el EUROCAE WG 105 SG 1 ha desarrollado una descripción de servicios y entorno operativo (OSED) para DAA en el espacio aéreo de muy baja altitud.

En resumen, DAA es un sistema que integra funciones de RWC y CA para mejorar la capacidad de evitación de colisiones de los sistemas de aeronaves no tripuladas. Se han realizado esfuerzos para definir y armonizar los límites entre RWC y CA, y se están desarrollando estándares operativos y reglamentarios para su implementación.

2.3.2 Sistemas radar para DAA

Los sistemas DAA están compuestos de dos módulos:

- **Módulo de vigilancia y seguimiento** (STM, del inglés *surveillance and tracking module*), que detecta potenciales amenazas (*intruders*) y genera informes con su posición y la del *ownship*.
- **Módulo de resolución de amenazas** (TRM, del inglés *threat resolution module*), que utiliza los reports proporcionados por el STM para detectar cuándo un *intruder* supone realmente una amenaza (*threat*) y genera las alertas de colisión y/o las maniobras de evitación.

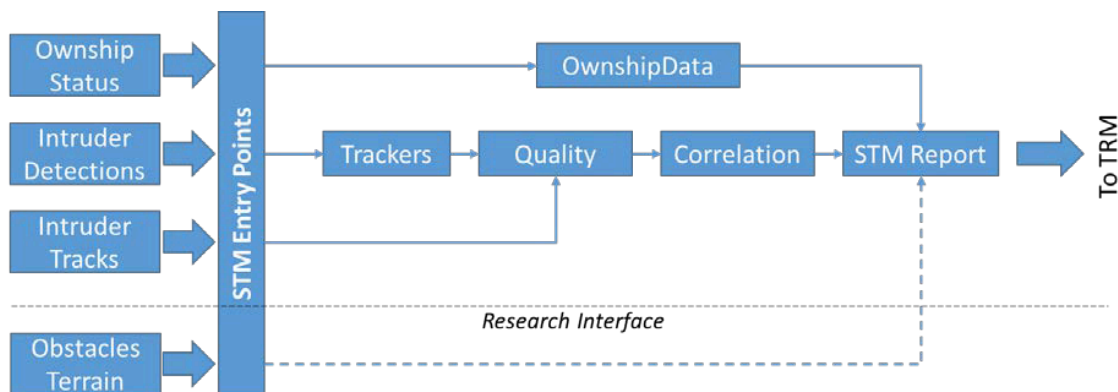


Figura 2. Arquitectura del STM

La Figura [2] muestra la arquitectura del STM, que está compuesto de distintos sensores y *trackers* para obtener la posición del *ownship* y de los *intruders* para generar los *STM reports*. Los sistemas DAA utilizan una variedad de sensores para detectar *intruders* que puedan terminar siendo clasificados como *threats* y provocando la generación de alertas de colisión y/o instrucciones de evitación:

- Sensores electroópticos.
- Sensores acústicos.
- Sensores radar

Cada una de estas tecnologías tiene ventajas e inconvenientes que hacen necesaria una plataforma multisensor. La principal ventaja de los sistemas radar frente a los otros sistemas es que funcionan a grandes distancias y en condiciones de visibilidad reducida. Su principal desventaja es que tienen problemas para detectar *intruders* pequeños (i.e., de baja sección radar). Además, requieren el uso de antenas embarcadas que podrían afectar a la aeronavegabilidad del *ownship*.

2.3.3 Antenas radar aerotransportadas para detección y seguimiento de blancos.

Las aeronaves militares utilizan antenas activas de barrido electrónico (AESA, del inglés *active electronically scanned array*) en radares multifunción, como se muestra en la Figura [3]. Las aeronaves no tripuladas militares utilizan radares especificados para operaciones en espacio aéreo controlado de clase A y tienen costes y presentaciones no compatibles con las operaciones de UAS civiles en el VLL.

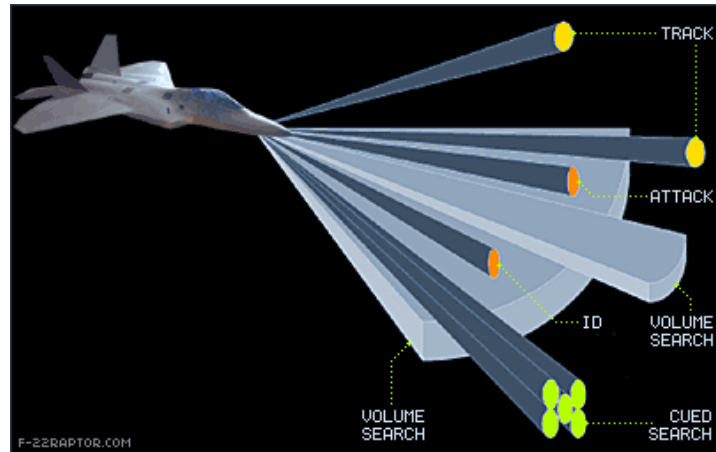


Figura 3. Antena de barrido electrónico para aeronaves militares

Por otro lado, una tecnología ampliamente utilizada en radares de vigilancia en tierra es la de antenas de haces apilados, que consiste un conjunto de haces fijos alrededor de la dirección de apuntamiento, cada uno de ellos apuntando en una dirección diferente, de manera que se cubra el rango de detección requerido, como se muestra en la Figura [4]. Con este tipo de diagrama de radiación, el radar puede funcionar en modo conmutado (cada haz se utiliza en transmisión y recepción de manera secuencial) o en modo *ubiquitous* (se emite y recibe por todos los haces simultáneamente) y el sistema selecciona el haz que mejor servicio proporcione en términos de potencia recibida, relación señal a ruido o relación señal a interferencia.



Figura 4. Sistema de seguimiento por haz conmutativo

2.4 Contribución de las operaciones de UAS a la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas.

En relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la agenda 2030 de las Naciones Unidas, la antena-radar monopolso y el sistema de DAA pueden contribuir a varios de estos objetivos de la Figura [5].



Figura 5. Objetivos de la agenda 2030

1. Objetivo 9 (Industria, Innovación e Infraestructura): Los radares monopulsos y el sistema DAA son tecnologías innovadoras que pueden mejorar la seguridad y la eficiencia en el sector de la aviación, facilitando la integración segura de drones y otros sistemas aéreos no tripulados en el espacio aéreo.
2. Objetivo 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles): La implementación de sistemas DAA en drones y aeronaves puede ayudar a evitar accidentes y mejorar la seguridad en las áreas urbanas y comunidades, lo cual es fundamental para promover un entorno urbano sostenible.
3. Objetivo 13 (Acción por el Clima): Al permitir una mayor eficiencia y seguridad en el transporte aéreo, los radares monopulsos y el sistema DAA pueden contribuir a la reducción de las emisiones de gases asociados al tráfico aéreo.
4. Objetivo 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres): La implementación adecuada de sistemas DAA en aeronaves y drones puede ayudar a proteger la vida silvestre y los ecosistemas terrestres al evitar colisiones con aves migratorias u otros animales en el espacio aéreo.



Capítulo 3. Objetivos del trabajo.

El **objetivo principal** de este trabajo es desarrollar hasta un nivel de madurez tecnológica TRL3 el concepto de una antena radar que se pueda instalar en una aeronave no tripulada, como puede ser un aerotaxi, y que sea capaz de determinar el ángulo en azimut y elevación del *threat* mediante procesamiento monopulso.

El nivel de madurez tecnológica TRL3 implica una prueba de concepto experimental. Para alcanzar este objetivo principal es necesario abordar los siguientes subobjetivos (SO):

- SO1. Definir los requisitos funcionales (*performance*) y mecánicos (*airworthiness*) de una antena radar para su uso en sistemas de detección y evitación (DAA, del inglés *detect and avoid*) embarcados en aeronaves eléctricas de aterrizaje y despegue no tripuladas (e-VTOL, del inglés *electric vertical take-off and landing*) no tripuladas para movilidad aérea urbana.
- SO2. Formular el concepto de una antena radar que pueda cumplir los requisitos definidos en el subobjetivo SO1 (TRL1).
- SO3. Validar mediante herramientas de simulación que el concepto formulado en el SO2 cumple con los requisitos establecidos en el SO1 (TRL2).
- SO4. Validar mediante técnicas experimentales que el concepto formulado en el SO2 cumple con los requisitos establecidos en el SO1 (TRL3).
- SO5. Plantear una estrategia de diseminación y explotación de los resultados obtenidos en el trabajo.

Capítulo 4. Metodología de trabajo

4.1 Organización del trabajo

Para alcanzar los subobjetivos descritos en el capítulo 2 y de esa manera lograr el objetivo principal del trabajo. En la Tabla 1 se enumeran las tareas en las que se ha estructurado el trabajo a realizar y se indican los subobjetivos específicos abordados por cada una de ellas.

Tarea 1	Definir los objetivos y requisitos para la Antena-Radar (SO1).
Tarea 2	Diseñar (SO2) y evaluar en CST distintos modelos de Antena-Radar (SO3).
Tarea 3	Construir la Antena-Radar (maqueta en 3D y modelo final metalizado) (SO4).
Tarea 4	Medir el comportamiento del modelo metalizado en la cámara anecoica (SO4).
Tarea 5	Comparar las simulaciones (CST) con las mediciones reales (SO4).
Tarea 6	Redacción de la memoria del TFG (SO5).

Tabla 1. Lista de tareas realizadas para el proyecto

Tarea 1: en esta tarea se ha realizado una revisión bibliográfica y se han planteado los requisitos de la antena en base a trabajos previos del grupo de investigación.

Tarea 2: en esta tarea se ha planteado el concepto de antena en base a una revisión bibliográfica y al análisis de los requisitos definidos en la tarea 1. Además, en esta tarea se realizaron diversos modelos 3D de antenas basadas en el concepto planteado con la herramienta de simulación electromagnética y se refinó el diseño mediante iteraciones sucesivas de diseño-validación.

Tarea 3: en esta tarea se generaron los ficheros .stl necesarios para la impresión 3D de la antena. En primer lugar, se imprimió un modelo en filamento de material termoplástico con una impresora disponible en el laboratorio del grupo para verificar el diseño mediante inspección visual. Una vez verificado el diseño, se contrató la impresión en material metálico a un proveedor externo.

Tarea 4: en esta tarea se diseñó y fabricó un útil para fijar la antena al posicionador disponible en la cámara anecoica del instituto ITEAM de la UPV y se procedió a caracterizarla en dicho laboratorio.

Tarea 5: en esta tarea se procesaron los datos obtenidos en el laboratorio para obtener los parámetros de diseño definidos en la tarea 1 y se compararon con los resultados simulados y con los valores especificados en dicha tarea.

Tarea 6: en esta tarea se recopiló toda la información generada a lo largo del desarrollo del proyecto en un documento que describe el trabajo realizado, se presentan y discuten los resultados obtenidos y se plantea una estrategia para explotarlos. Dado el bajo nivel de madurez tecnológico perseguido en este trabajo, la explotación de los resultados pasa por llevar a cabo un trabajo adicional para llevarlos a un nivel de madurez tecnológica (TRL5) que permitan su transferencia para su explotación por terceros o por la propia universidad mediante los instrumentos adecuados. En esta tarea también se ha abordado la difusión de los resultados escribiendo un resumen que ha sido aceptado para su presentación en el XXVIII simposio del capítulo español de la URSI en septiembre de 2023.

4.2 Herramienta de simulación (CST STUDIO SUITE)

El software que se ha utilizado para el diseño y validación y de esta antena-radar es el CST Studio, un software para diseñar, analizar y optimizar componentes electromagnéticos.

Entre las aplicaciones más destacadas para el uso de este tipo de sistemas se encuentra el análisis de antenas y filtros.

Se ha escogido este software por facilidad a la hora de construir la antena es intuitivo, además permite una gran variedad de herramientas como por ejemplo la capacidad de simular únicamente los puertos alimentados que interesan.

Este programa ha permitido obtener los resultados que se querían, como por ejemplo la obtención de los parámetros S, tanto el coeficiente de reflexión como el coeficiente de desacoplo, este software también es capaz de mostrar los diagramas en 3D, 2D y 1D de la radiación de la antena, pudiendo identificar de esta manera si los resultados arrojados por el software son los correctos o no, y de esta manera comparar cada una de las señales que nos interesan en los distintos casos de diseño.

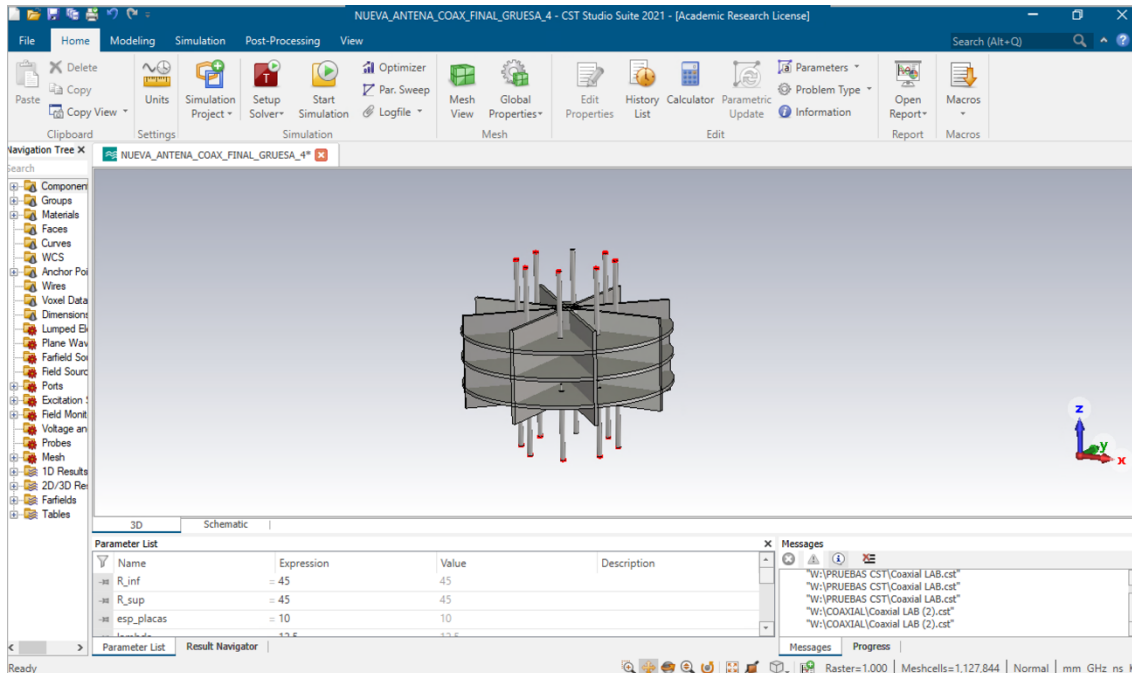


Figura 6. Interfaz del software de CST Studio

Este software se utiliza en diversas industrias como las de telecomunicaciones, aeroespacial, defensa y electrónica. Permite a ingenieros e investigadores simular y analizar fenómenos electromagnéticos complejos, como el diseño de antenas, compatibilidad electromagnética (EMC) o interferencia electromagnética (EMI).

Este software ofrece una interfaz de usuario fácil de entender y una variedad de técnicas de simulación. También proporciona una amplia biblioteca de materiales, componentes y modelos predefinidos, lo que facilita la configuración de las simulaciones y la obtención de resultados precisos.

4.3 Herramientas de impresión 3D.

A continuación, se muestra el modelo de impresora 3D utilizado para la maquetación y modelado de una primera prueba de la antena radar que. Modelo el cual se mostrará más adelante. La impresora es una impresora 3D Bambu Lab X1 Carbon.



Figura 7. Modelo de impresora 3D del laboratorio

Para el proceso de impresión de impresión del modelo final en metálico de la antena se utilizó una impresora 3D de metalizado, el proceso se encargó a una empresa externa de la UPV y el material de la antena metálica se imprimió en aluminio AlSi 10 mg.

Existen variaciones en cuanto al proceso de impresión en metálico por una impresora 3D, pero lo más común es lo siguiente:

1. Diseño del modelo: se crea el modelo en un software adicional de diseño 3D, este modelo define la forma y geometría del objeto que se desea imprimir en metal.
2. Preparación del modelo: el modelo 3D se prepara para su impresión, lo cual puede incluir la subdivisión en capas o secciones que serán impresas de forma incremental.
3. Selección del material: se elige el material metálico adecuado para la impresión 3D.
4. Preparación del material: el material metálico en forma de polvo o alambre se prepara para su uso en impresora 3D. Esto puede implicar el tratamiento del polvo metálico para mejorar sus propiedades o el corte y preparación del alambre.
5. Impresión 3D: el proceso de impresión comienza con la carga del material metálico en la impresora 3D en metálico, incluyendo la sinterización selectiva por láser (SLS), la fusión selectiva por láser (SLM) y el enlace de metal en frío.
6. Postprocesamiento: una vez completada la impresión 3D, el objeto metálico impreso puede requerir un postprocesamiento adicional, como puede ser incluir el retiro de soportes de impresión, tratamiento térmico para mejorar la resistencia y propiedades mecánicas, pulido, acabado superficial, entre otros.

4.4 Sistema de medida de antenas.

Se trata de un sistema de roll sobre azimut y generalmente consta de los siguientes componentes:

1. Antena: es el objeto de estudio y se monta en un dispositivo giratorio que permite su rotación en el plano horizontal.

2. Motor de rotación: es el componente encargado de girar la antena en incrementos específicos de ángulo de acimut. Puede ser controlado manualmente o de forma automática mediante un sistema de control
3. Sistema de control: en los sistemas automáticos, se utiliza un sistema de control que permite programar la secuencia de rotación de la antena y registrar los datos de medición. Puede ser un controlador electrónico que envía señales al motor de rotación.
4. Dispositivo de medición: se utiliza para medir los parámetros de radiación de la antena en cada ángulo de acimut. Puede ser un analizador de redes o un equipo de medición especializado.
5. Software de análisis: después de realizar las mediciones, se utiliza software especializado para analizar los datos y generar gráficos o informes que muestran el patrón de radiación de la antena en diferentes ángulos de acimut

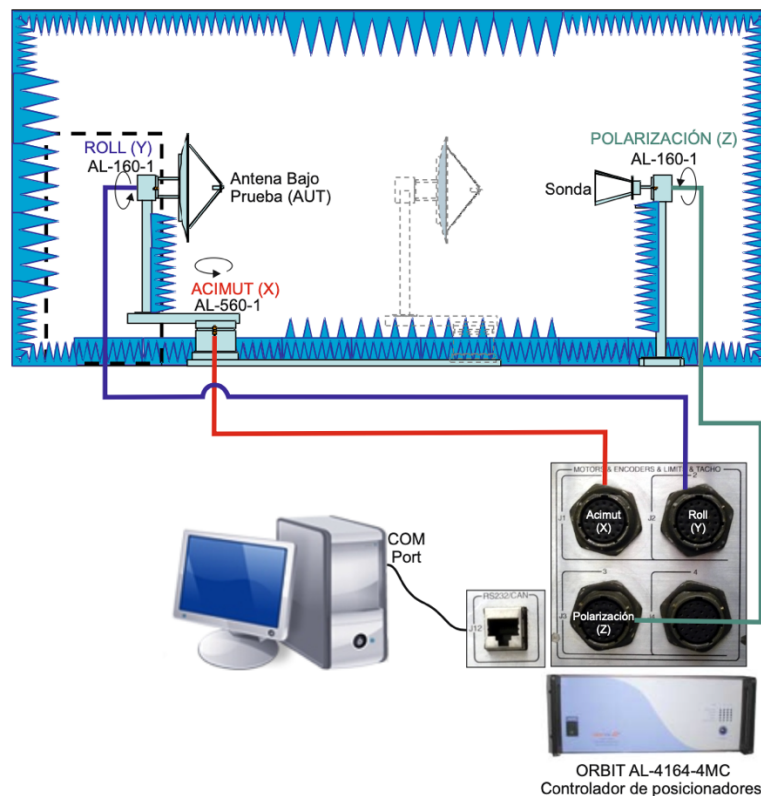


Figura 8. Esquemático del proceso de medición de la antena

4.5 Planificación del trabajo

Para alcanzar el objetivo planteado en el tiempo disponible (segundo cuatrimestre del curso académico 2022/23) se llevó a cabo una planificación temporal de las tareas detalladas en la sección 3.1 que se muestra en el diagrama de Gantt de la Tabla [2].

	Febrero			Marzo			Abril			Mayo			Junio		
Tarea 1															
Tarea 2															
Tarea 3															
Tarea 4															
Tarea 5															
Tarea 6															

Tabla 2. Organización de las tareas del proyecto por meses de trabajo

Capítulo 5. Formulación del concepto de antena radar

5.1 Requisitos funcionales

Frecuencia	24 GHz
Ancho de banda	3 MHz
NLPS	< -15 dB
Profundidad de los mínimos	20 dB
Ancho de haz (-3 dB)	90°
Parámetros S_{11} y S_{21}	< -10 dB
Ganancia	15 dBi
Eficiencia total	1 en lineal (ideal)

Tabla 3. Requisitos a cumplir de la antena radar

En la Tabla [3] se muestran los requisitos que conformarían la antena que se desea diseñar, en ella se plasman las características más importantes para un funcionamiento óptimo.

La elección de la frecuencia en estos casos es muy importante para garantizar una comunicación eficiente y confiable, es uno de los parámetros importantes de la antena y nos indica la frecuencia a la que la antena está diseñada para transmitir o recibir señales.

La frecuencia portadora corresponde a una banda ISM (de uso libre) lo suficientemente alta como para que las dimensiones de la antena sean pequeñas para no afectar la aeronavegabilidad del dron, como se estudió en uno de los trabajos de fin de grado del año pasado propuesto por el mismo grupo de trabajo, y en el cual se descartaron diversas bandas no licenciadas, se llegó a la conclusión de utilizar la banda de 24 GHz además de que tiene buenos antecedentes para este tipo de actividades, ya que se ha utilizado en múltiples ocasiones con éxito por la comunidad del dron.

El ancho de banda se ha determinado por la resolución en rango, el cual se ha establecido en 50 m, distancia necesaria para que dos aeronaves no tripuladas puedan entrar en colisión (a partir de ese umbral únicamente la providencia puede evitar una colisión). Este requisito se ha extraído de un TFG que se realizó el año pasado y que tiene que ver con el desarrollo de un concepto de radar, realizado por mi compañero del grupo ITACA-UPV.

$$Br = \frac{1}{\tau} = \frac{C_0}{2 * \delta_{RANGO}} = \frac{3 * 10^8}{2 * 50} = 3 \text{ MHz} \quad (2)$$

El nivel de lóbulo principal a secundario también es otro de los parámetros a tener en cuenta, el lóbulo principal es la dirección hacia la cual la antena emite la mayor parte de su energía mientras que los lóbulos secundarios son direcciones adicionales donde también se transmite o se recibe energía pero en menor medida que en el principal, interesa que este parámetro sea bajo, puesto que esto indica una mejor directividad en el lóbulo principal ya que concentrará toda su energía en el lóbulo principal y no en los secundarios, evitando así falsas detecciones. Un nivel por debajo de -15 dB sería un resultado razonable.

Si se habla del nulo generado por los diagramas diferencia característico de una antena monopulso, es necesario que la profundidad del nulo tenga al menos una diferencia de 20 dB para tener una sensibilidad suficiente en la función monopulso.

Otro de los parámetros importantes es el ancho de haz, este parámetro puede ajustarse según las necesidades que se buscan, en este caso se desea buscar un ancho de haz de 90° por cada sector, puesto que el objetivo era que pudiera detectar en 360° azimutales, el ancho de haz determinará la cobertura que tiene la antena.

Los parámetros S permitirán evaluar la cantidad de señal que se refleja en la antena así como su calidad, y además también que cantidad de señal se acopla de un sector a su sector adyacente, es necesario que en los parámetros S_{11} la señal esté por debajo de -10 dB a la frecuencia de trabajo, pues esto indicará un buen nivel de comportamiento, así como un parámetro S_{21} también por debajo de -10 dB y además desacoplado, puesto que cada sector transmite de manera independiente con su sector adyacente, cuanto más desacoplado esté mejor puesto que eso significa que no se traspasa señal de un sector a otro y transmite como toca.

El requisito de la ganancia tiene que ser cercana a 15 dBi, esta es una ganancia aceptable para una antena de estas características, que permita tener una intensidad de radiación en el lóbulo principal, lo cual indicaría una buena capacidad para concentrar la energía en la dirección de apuntamiento que se quiere. El requisito de ganancia se ha obtenido del estudio para un TFG en el mismo grupo de trabajo, realizado por un compañero el año pasado.

En cuanto a la eficiencia total, se trata de la relación entre la potencia radiada de la antena y la potencia que finalmente entrega, esta se usa para tener en cuenta las pérdidas en los terminales de entrada y dentro de la estructura de la antena dichas pérdidas se pueden deber a la reflexión debidas al desacoplamiento entre la línea de transmisión y la antena o también debido a la pérdida durante la conducción. El valor que se busca está dentro del rango de 0 a 1 , siendo el valor cercano a 1 en lineal lo que se considera como ideal.

5.2 Definición razonada del concepto.

- Antena de haces apilados (versatilidad: permite el barrido electrónico secuencial y la emisión y recepción simultánea por todos los haces).

La antena de haces apilados permite el barrido electrónico secuencial y la emisión y recepción simultánea por todos los haces.

La principal característica de estas antenas es su capacidad para formar haces de radiación direccionales mediante la manipulación de fases de los elementos radiantes. Al controlar las fases de los elementos y ajustarlos de manera adecuada, se puede generar un haz principal que se puede dirigir a un ángulo específico en el espacio. Esto permite una comunicación o detección más precisa y selectiva en comparación con una antena convencional.

- Antena monopolso (permite una buena resolución angular con un menor tamaño de la apertura).

Una antena monopolso radica en su capacidad para lograr una buena resolución angular con un tamaño de apertura menor en comparación con otras antenas. La apertura de una antena se refiere al tamaño físico del área que recibe las señales, y generalmente se considera que una apertura más grande proporciona una mayor resolución angular. Sin embargo, las antenas monopolso utilizan técnicas de procesamiento de señales y algoritmos especializados para lograr una resolución angular comparable o incluso superior, a pesar de tener una apertura más pequeña.

Esta capacidad de lograr una buena resolución angular con un menor tamaño de apertura es especialmente beneficiosa en aplicaciones donde el espacio o el tamaño físico son

limitados. Por ejemplo, en sistemas de radar o comunicaciones móviles, donde el espacio en las antenas puede ser limitado, las antenas monopulso ofrecen una solución compacta y eficiente.

- Antena circular sectorial (facilidad de fabricación en materiales de bajo peso, buen perfil aerodinámico).

Una antena circular sectorial es un tipo de antena que tiene forma circular y se divide en sectores, cada uno de los cuales cubre un ángulo específico. Estas antenas son conocidas por su facilidad de fabricación utilizando materiales de bajo peso y su buen perfil aerodinámico.

La forma circular de la antena sectorial permite una distribución equitativa de la energía de la señal en múltiples direcciones. Esto es especialmente útil en aplicaciones donde se requiere una cobertura de 360 grados o en sectores específicos. Cada sector de la antena puede tener su propio patrón de radiación y ganancia, lo que permite adaptarse a las necesidades de cobertura específicas de cada sector.

Una ventaja importante de las antenas circulares sectoriales es su facilidad de fabricación. Al utilizar materiales de bajo peso, como plásticos o materiales compuestos, se logra una estructura más liviana en comparación con antenas de otros diseños. Esto es especialmente beneficioso en aplicaciones donde el peso es un factor crítico, como en aeronaves o vehículos no tripulados, donde se busca minimizar la carga adicional.

Además, el diseño circular y el perfil aerodinámico de estas antenas ayudan a reducir la resistencia al aire y el arrastre. Esto es especialmente importante en aplicaciones aeroespaciales, donde se busca mantener una alta eficiencia y reducir la interferencia con la aerodinámica del vehículo.

5.3 Concepto de antena monopulso

El principal objetivo de este proyecto es validar el concepto de una antena radar que se pueda instalar en una aeronave no tripulada, como puede ser un aerotaxi, y que sea capaz de determinar el ángulo en azimut y elevación del *threat* mediante procesamiento monopulso. Esta antena está dividida en cuatro cuadrantes que transmiten y reciben de manera independiente. Los elementos de cada uno de estos cuadrantes deben transmitir con la misma fase, mientras que las señales recibidas por estos cuatro sectores deben sumarse o restarse para determinar la posición angular del *threat* respecto al *ownship*, tal y como se aprecia en la Figura [9].

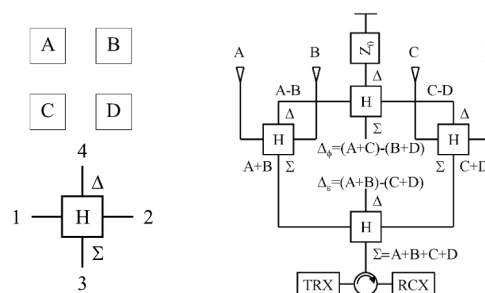


Figura 9. Diagrama de funcionamiento de una antena monopulso

La posición angular del *threat* se obtiene sumando a una dirección de apuntamiento nominal los ángulos de desapuntamiento (BOA, del inglés *off-boresight angle*) en azimut y en elevación. Para

ello, las señales recibidas por los distintos cuadrantes deben combinarse en recepción siguiendo el esquema que se muestra en la Figura [10].

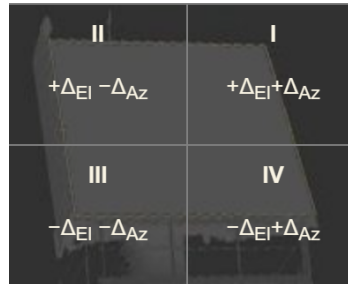


Figura 10. Esquema de subconjuntos para las combinaciones suma y diferencia

5.3.1 Arquitectura monopulso

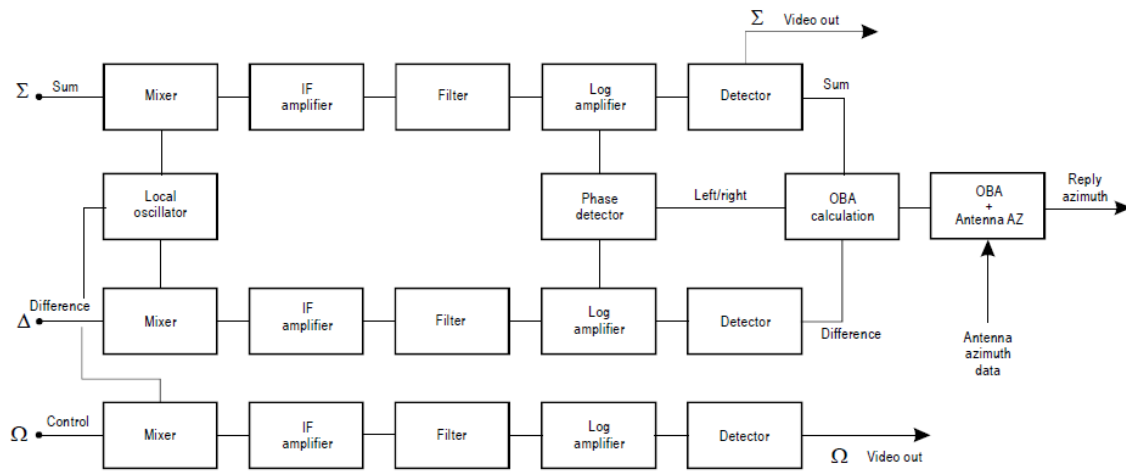


Figura 11. Arquitectura del procesador monopulso

La antena monopulso cuenta con un canal suma y dos canales diferencia (uno para el ángulo de elevación y otro para el ángulo de azimut). La Figura [11] muestra (sin pérdida de generalidad) el procesamiento que realiza para el cálculo del ángulo de azimut del *threat*. En primer lugar, las señales suma y diferencia de radiofrecuencia se trasladan a una frecuencia intermedia para mezclarlas con el oscilador local y, posteriormente amplificarlas con un amplificador logarítmico. La desviación respecto de la dirección de apuntamiento nominal u OBA se obtiene a partir de la resta de las salidas de los amplificadores de los canales suma y diferencia, como indica la Eq. (1)

$$\theta = 2 \operatorname{atan} \left(\frac{\Sigma}{\Delta} \right) \quad (1)$$

Para la obtención del signo se debe detectar la fase de la resta, de manera que si la salida es negativa, el *threat* se encontrará a la izquierda de la dirección nominal de apuntamiento, mientras que si la salida es positiva, el *threat* se encontrará a la derecha de la misma.

Los distintos canales suma y elevación se obtendrán a partir de las siguientes combinaciones de las señales detectadas por los distintos cuadrantes en que se ha dividido la apertura de la antena, definidos en la Figura [10].

Combinación [1] (Suma): $I + II + III + IV$

Combinación [2] (Diferencia Azimut): $(I + IV) - (II + III)$

Combinación [3] (Diferencia Elevación): $(I + II) - (III + IV)$

5.4 Antena sectorial cilíndrica de haces apilados

El diseño que se ha elaborado es el de una antena que emite y recibe señales en todas las direcciones ya que este tipo de antenas es útil en aplicaciones en las que se requiere una cobertura de 360 grados.

Cabe destacar que se parte de un diseño preliminar realizado en otro proyecto en el que se implementaron dos planos perpendiculares que dividían la antena en cuatro sectores de 90°, tal y como se puede apreciar en la Figura [12].

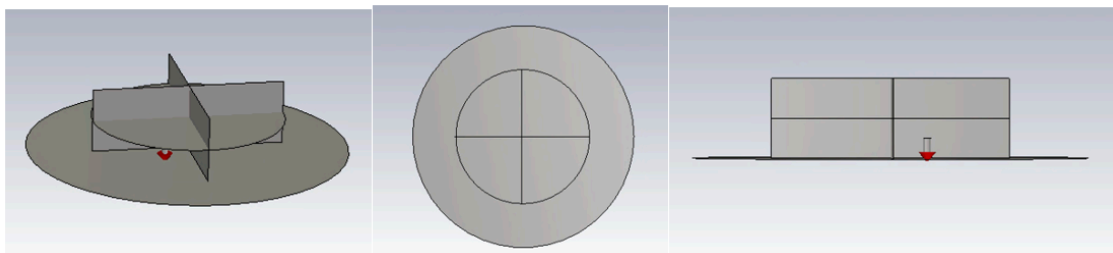


Figura 12. Diseño preliminar de la antena-radar

Este nuevo diseño consta de 3 placas en forma de círculo, paralelas entre sí con un tamaño de 45 mm y con un grosor de 1.5 mm, la separación entre placas es de 10 mm. Las placas están divididas por cuatro planos de 40 mm de altura y 1.5 mm de grosor, formando en las placas 8 sectores, tanto en la parte superior de la antena como en la parte inferior.

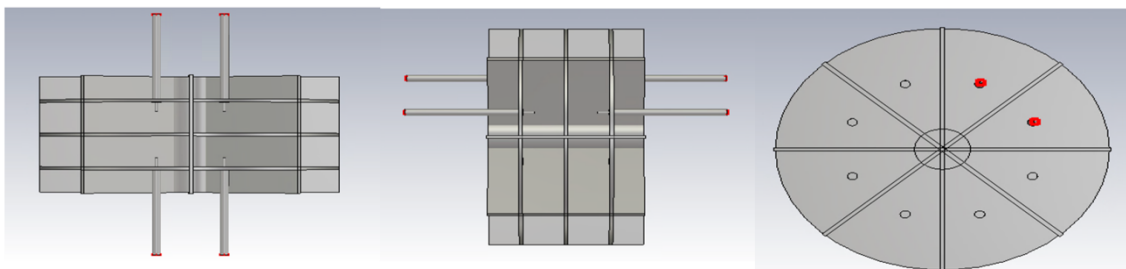


Figura 13. Diseño final de la antena-radar

Después de haber realizado diversas simulaciones con un abanico grande de diseños como los que se pueden ver en la Figura [13] se ha llegado a un diseño final óptimo en el que se ven reflejados los resultados que se buscaba desde un principio. Más adelante se va a mostrar un recorrido por los resultados de algunos de los diseños que se han realizado hasta llegar al modelo final.

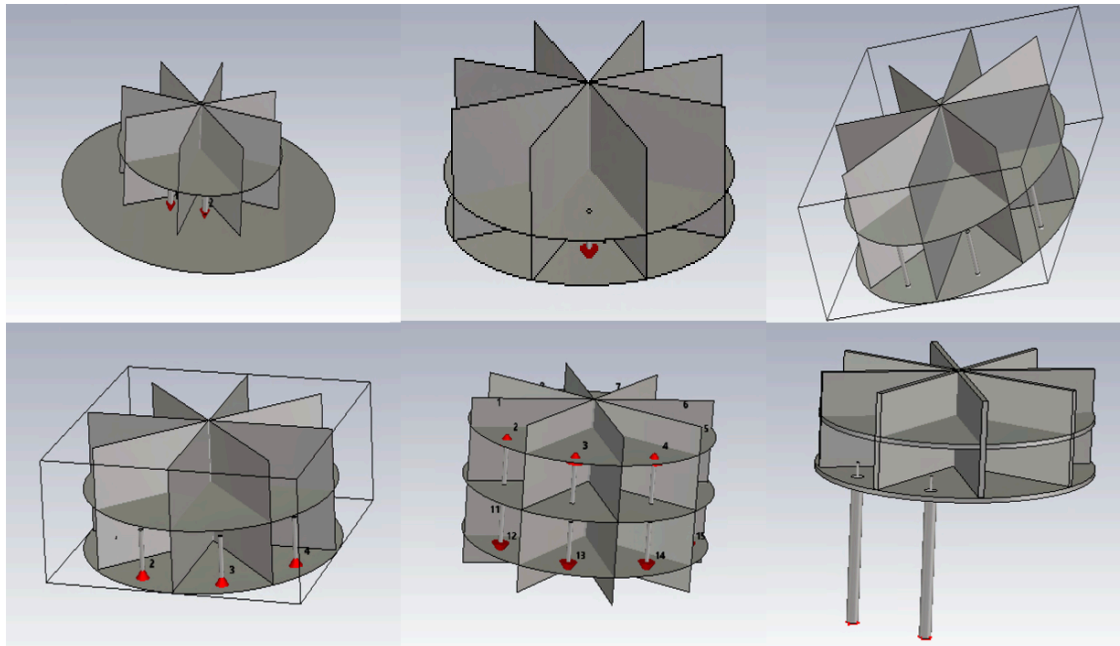


Figura 14. Diseños de Antena-Radar

Una vez se tiene todo el diseño confeccionado, la estructura a ojos del usuario es la que se muestra en la Figura [15], tener todo bien diseñado y parametrizado facilita mucho a la hora de poder construir o ver cómo se comporta una parte de la antena u otra, ocultando las partes que queramos o simplemente ver de qué partes se compone la antena que se ha diseñado para un usuario que no conoce la estructura de la misma.

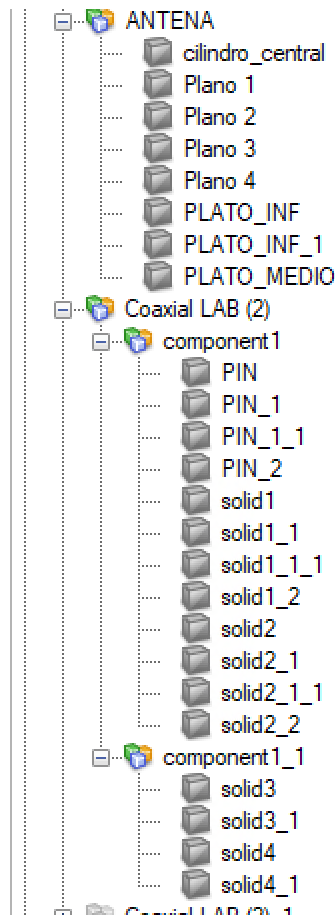


Figura 15. Estructura del diseño de la antena-radar

Como se aprecia en la Figura [15], el diseño cuenta con dos partes fundamentales, la primera es la antena como tal, compuesta por los planos sectoriales y los platos, la segunda parte de la antena es el coaxial, compuesto por la cubierta, el dieléctrico y el vivo o núcleo central.

5.4.1 Alimentación de la Antena

Además se debe añadir que durante el proceso de diseños de los modelos de antena, se ha pasado de utilizar monopolos en cada uno de los sectores alimentados por puertos discretos a utilizar como alimentación el uso de cables coaxiales como el que se muestra en la Figura [16] y que sustituye el funcionamiento del monopolo que se venía usando y que tendrá una altura del vivo (conductor central) de 3 mm.

Como se ha dicho anteriormente para la alimentación de esta Antena, el cable coaxial funciona como un canal de transmisión de señales a alta frecuencia y la calidad de este se mide por su impedancia, que es la resistencia que el cable presenta a la señal, en nuestro caso tenemos una impedancia de 50 Ohmios adaptada.

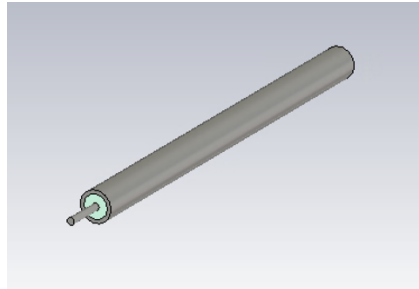


Figura 16. Cable coaxial de alimentación para la antena

En el simulador de CST se puede alimentar la antena utilizando un puerto de guía de onda, es una función dentro del software en el que se está trabajando, que se utiliza para acoplar la señal a la estructura de guía de onda de la antena y simular el comportamiento de propagación de las ondas electromagnéticas. Lo que se va a mostrar a continuación es un proceso imprescindible para poder alimentar la antena de manera correcta y para la creación de los puertos con los que posteriormente se trabajará para buscar las señales del diagrama suma y diferencia que se buscan.

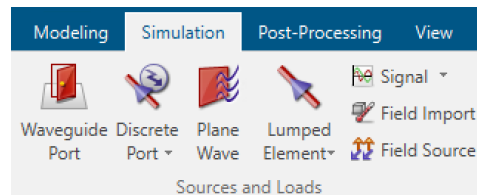


Figura 17. Captura de donde se encuentra el Waveguide Port en la interfaz

Primero se debe configurar el puerto de la manera correcta, para ello se deberá tener en cuenta:

1. La geometría de la guía de onda
2. Definir las propiedades del material
3. Configurar el puerto de guía de onda
4. Definir las condiciones de frontera

Tal y como se muestra en la siguiente Figura [18]:

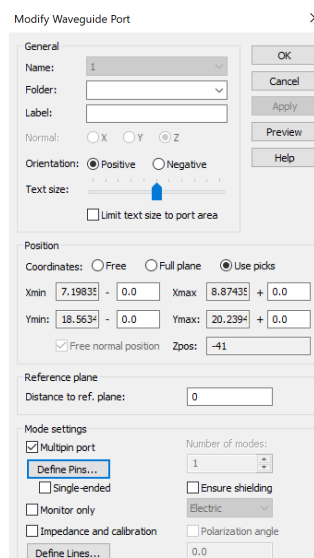


Figura 18. Definir los parámetros del puerto de guía de onda

Una vez se tiene el puerto creado, se puede ver en el diseño de la propia antena caracterizado con un punto de color rojo, en este caso el puerto actúa sobre el núcleo conductor del cable coaxial, que corresponde con la parte interna del cable, o vivo, tal y como se puede apreciar en la Figura [19].

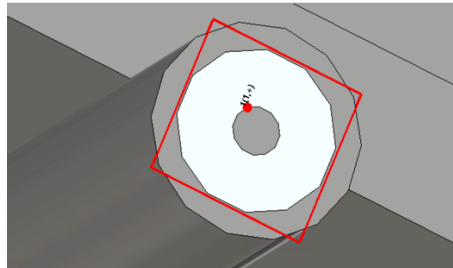


Figura 19. Caracterización del puerto de guía de onda en el cable coaxial

Se repite el mismo proceso para los 4 cables coaxiales puesto que se están alimentando las cuatro cavidades y se necesitan los 4 puertos activos para sacar las respuestas necesarias que buscamos. En la siguiente figura se puede apreciar los puertos creados y correctamente colocados en el núcleo interno para alimentar la antena.

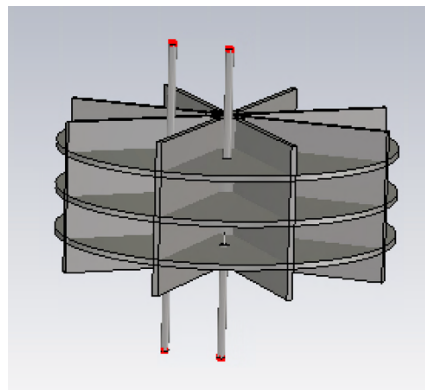


Figura 20. Creación de los cuatro puertos correctamente colocados

En términos de simulación, es importante tener en cuenta la fase de cada uno de los puertos, ya que es de esta manera es como se conseguirán las respuestas para las señales suma, diferencia en azimut y diferencia en elevación, para ello hay un apartado dentro de la simulación que permite modificar la fase y elegir que puertos se quieren ver simulados, esto se puede ver en la siguiente Figura [21].

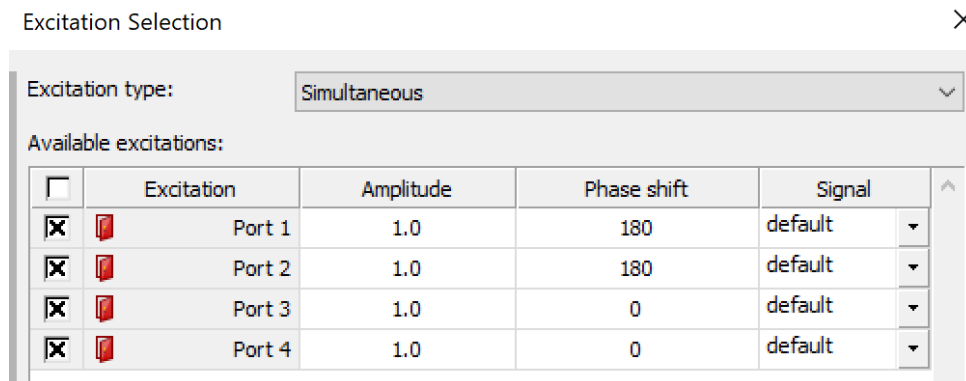


Figura 21. Simulación de los puertos excitados

En el apartado de “Phase Shift” es donde se tendrá que modificar la fase de cada uno de los puertos activos que se están simulando, cambiando a placer la fase entre 0 y 180 según lo que se desee simular.

Capítulo 6. Validación por simulación

Como se ha comentado con anterioridad, en este capítulo se va a hacer un barrido por los resultados de los modelos más significativos que se han ido diseñando y simulando a lo largo del proceso hasta alcanzar el modelo que finalmente se construye

6.1.1 Resultados de los diagramas que se obtuvieron con el primer modelo que se diseñó (modelo preliminar).

Tal y como se muestra, se parte del diseño mostrado en la Figura [12], donde se obtiene el siguiente diagrama de radiación, se ha alimentado únicamente uno de sus puertos en fase para ver el comportamiento de uno de los sectores. Hay que decir que únicamente se simula un sector puesto que se da por hecho que la simulación de todos los sectores de manera independiente será la misma ya que el diseño es simétrico.

Los parámetros que se muestran son los que se han ido modificando para tratar de obtener el diseño que se busca, como se puede ver en el diseño preliminar estos son los parámetros y las medidas con las que se han trabajado. Se tiene un diseño de dos placas, una inferior con un radio de 25 mm, una placa superior de 15 mm, ambas separadas por 5 mm, además se tienen 2 planos que intersectados forman cuatro sectores, los cuatro sectores que se pretenden simular de manera independiente. Por otro lado, el radio del monopolo es de 0.4375 mm y la altura del mismo 2.5 mm.

Parameter List			
	Name	Expression	Value
[-]	R_inf	= 25	25
[-]	R_sup	= 15	15
[-]	esp_placas	= 5	5
[-]	lambda	= 12.5	12.5
[-]	R_cil	= 0.4375	0.4375
[-]	altura_cil	= 2.5	2.5

Figura 22. Lista de parámetros del modelo preliminar

Comentando los resultados de este modelo, se tiene una ganancia de 14.6 dBi en la dirección de apuntamiento del lóbulo principal, lo que indica un muy buen valor, siendo un valor por encima del objetivo para el comportamiento de la antena según los requisitos expuestos anteriormente en la Tabla [3].

Así mismo, se obtiene un buen nivel de Ancho de haz (41.1°) teniendo en cuenta que únicamente se está simulando uno de los puertos activos y que el objetivo principal es que con los cuatro puertos activos se llegue a conseguir abarcar los 360° azimutales. Por el momento son resultados prometedores.

Si se habla del nivel de lóbulo principal a secundario se tiene un valor de -55.32 dB lo que se traduce en un muy buen comportamiento ya que esto indica que la dirección hacia la cual la antena emite la mayor parte de su energía es precisamente en su lóbulo principal, la diferencia es lo suficientemente grande como para que el lóbulo secundario no permita direcciones adicionales que puedan crear falsas detecciones. Si la diferencia entre lóbulos fuese pequeña se tendría que los lóbulos secundarios tienen un alto porcentaje de que se confundan con la verdadera dirección del lóbulo principal y esto como se comenta puede inducir a que haya errores en la detección.

Por otro lado el valor de la eficiencia total es un valor de -0.02 dB que en lineal se traduce como un valor muy cercano a uno (0.95), esto quiere decir que en términos de pérdidas de potencia radiada y entregada tiene un muy buen comportamiento, sabiendo que estos valores oscilan entre 0 y 1 y que cuanto más cercanos menores serán las pérdidas y la potencia que se radia será en su mayoría la potencia entregada.

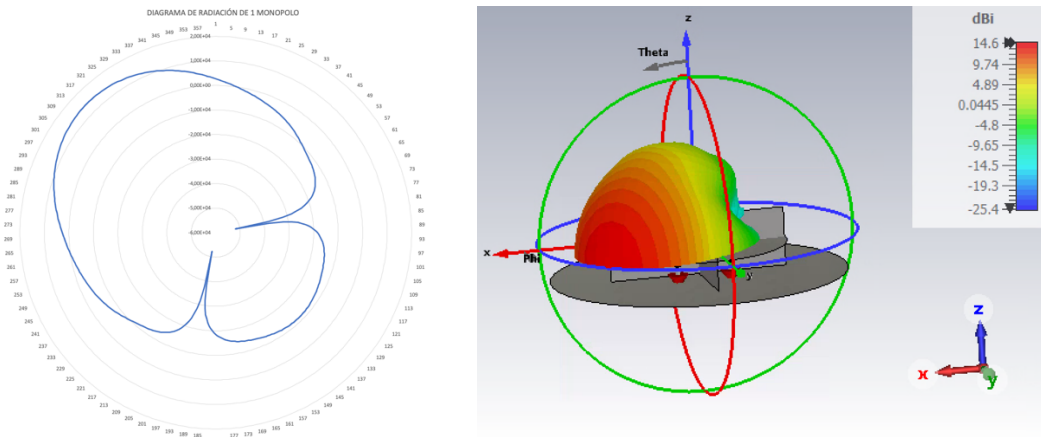


Figura 23. Diagrama de radiación de un único monopolo del primer modelo

CST nos permite observar el comportamiento del parámetro de reflexión S_{11} el cual nos indica como de bien se está reflejando la señal a la frecuencia a la que estamos trabajando, un valor que podría considerarse como bueno sería cuando está por debajo de -10 dB (forma parte de los requisitos), en este caso se parte de un valor de -24 dB a la frecuencia de 24 GHz, lo que indica un resultado muy bueno.

Con todo esto se puede decir que la antena de la cual se parte es un modelo aceptable pero que se va a ir mejorando para conseguir los objetivos que se requieren en el diseño y validación de una antena monopulso.

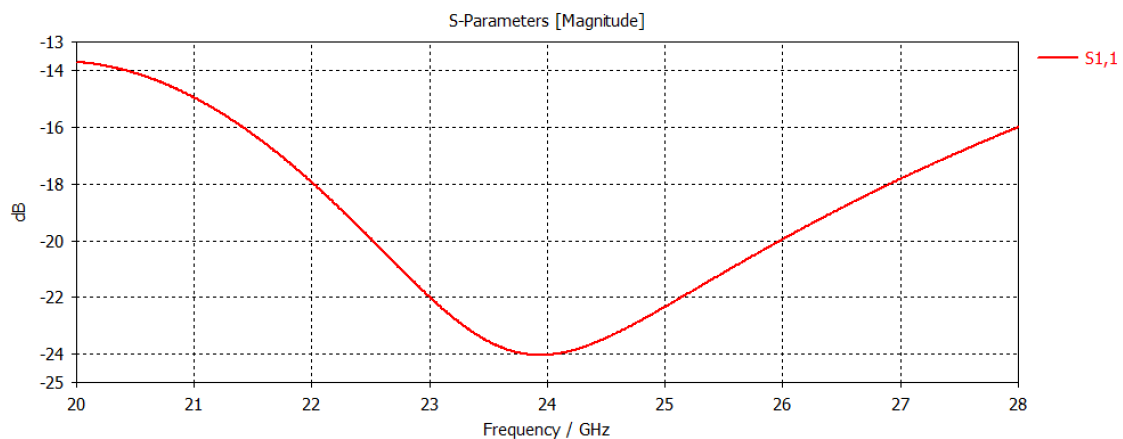


Figura 24. Parámetro S_{11} , coeficiente de reflexión del primer modelo

Ganancia (dBi)	14.6
Ancho de Haz (-3dB)	41.1 °
NLPS (dB)	-55.326
Eficiencia total (dB)	-0.02329
S ₁₁ (dB)	-24

Tabla 4. Resultados del modelo preliminar

6.1.2 Resultados de los diagramas que se obtuvieron con el segundo modelo de diseño.

El diseño que se plantea en este caso es un diseño similar al que se mostraba anteriormente, con la única diferencia de que ahora se cuenta con 8 sectores en lugar de 4, tal y como se puede observar en la Figura [25], buscando de esta manera un comportamiento diferente y más próximo al diseño de cuatro cavidades por sector que se va buscando.

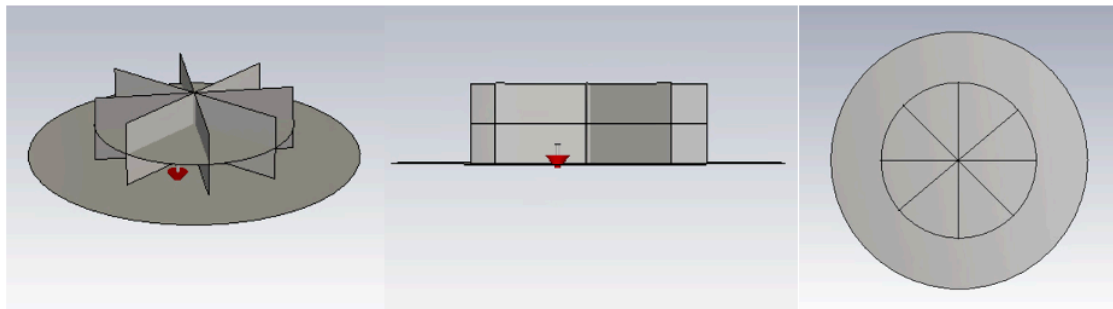


Figura 25. Segundo modelo diseñado en CST

Tal y como se muestra en la Figura [25] se ha tratado de mostrar el comportamiento de un único monopolo alimentado en fase, de modo que muestre un diagrama de lo que sería una señal de transmisión de la antena-radar.

Así es como han quedado los parámetros definidos de la antena tras realizar los cambios pertinentes.

Se tiene un plato inferior de 25 mm de radio y un plato superior más pequeño de 15 mm de radio, mientras que el monopolo utilizado en este caso es de 2 mm de altura, ya que al añadir los 8 sectores, era necesario disminuir la altura del monopolo para mitigar los lóbulos secundarios que se obtenían.

Name	Expression	Value	Description
R	= 25	25	
R_cil	= 0.25	0.25	
Altura_cil	= 2	2	
R_sup	= 15	15	
<new parameter>			

Figura 26. Lista de parámetros del segundo diseño

Los resultados se podrían explicar como una relación entre la ganancia y el ancho de haz que se obtiene. Se sabe que la directividad es la capacidad que se tiene para concentrar la energía del haz en una dirección en concreto, mientras que el ancho de haz es el ángulo de cobertura que cubre la

antena, es decir, la amplitud del ángulo en el cual la antenna puede llegar a transmitir o recibir señales con una ganancia óptima.

Como se aprecia, la ganancia ha disminuido respecto al diseño anterior (12.1 dB) y como tal el ancho de haz se ha visto incrementado de manera sustancial de 41.1° a 62.4° .

Aún así, los resultados que se han obtenido no son los que se desearían haber hallado, la relación ganancia y ancho de haz no es la esperada, se deseaba haber obtenido una ganancia algo mayor al añadir los dos planos sectoriales.

Por otro lado el nivel de lóbulo principal a secundario es un valor más que suficiente teniendo que cuenta que se ha obtenido -17.9 dB y el objetivo es que esté por debajo de -15 dB, esto indicaría mejor directividad en el lóbulo principal ya que concentrará toda su energía en el lóbulo principal y no en los secundarios, cosa que no interesa porque puede dar lugar a falsas detecciones.

Además se tiene un valor de -0.3908 dB para la eficiencia total, un valor de 0.91 en lineal y que como ya se ha dicho anteriormente, se busca un valor lo más cercano a uno posible significando que no hay apenas pérdidas y que la potencia radiada es prácticamente la entregada.

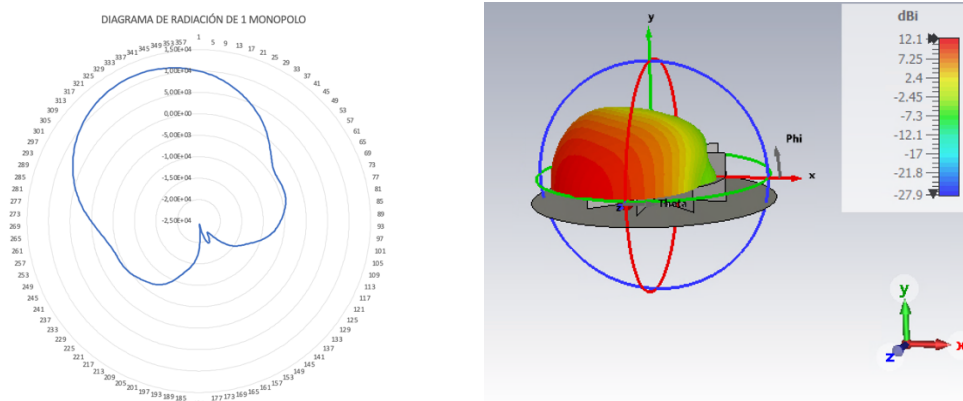


Figura 27. Diagrama de radiación de un único monopolo en el segundo modelo

En cuanto al coeficiente de reflexión obtenido en este diseño de antenna también se ha visto que empeora la calidad de la señal respecto del diseño preliminar respecto del cual se partía. Porque aunque sigue siendo un valor que está dentro del margen de los requisitos, ya que para la frecuencia a la que trabajamos (24 GHz) se tiene un valor por debajo de -10 dB, sigue siendo un valor bastante peor a lo que se esperaba.

En resumen, se trata de un buen primer diseño a ocho sectores, no se ha conseguido mejorar la ganancia a pesar de la división de la antenna en ocho sectores buscando una directividad mayor debido a que las cavidades de la antenna no están bien conformadas y se tiene una superficie inferior muy grande para los ocho sectores que se tienen, se quiere buscar concentrar aún más la energía, por ello se deberá reducir en un futuro el plato inferior de la antenna. Aún así el ancho de haz es el esperado teniendo en cuenta la relación ganancia y ancho de haz que se comentaba anteriormente, pero se tratará mejorar la calidad de la señal con el parámetro de reflexión.

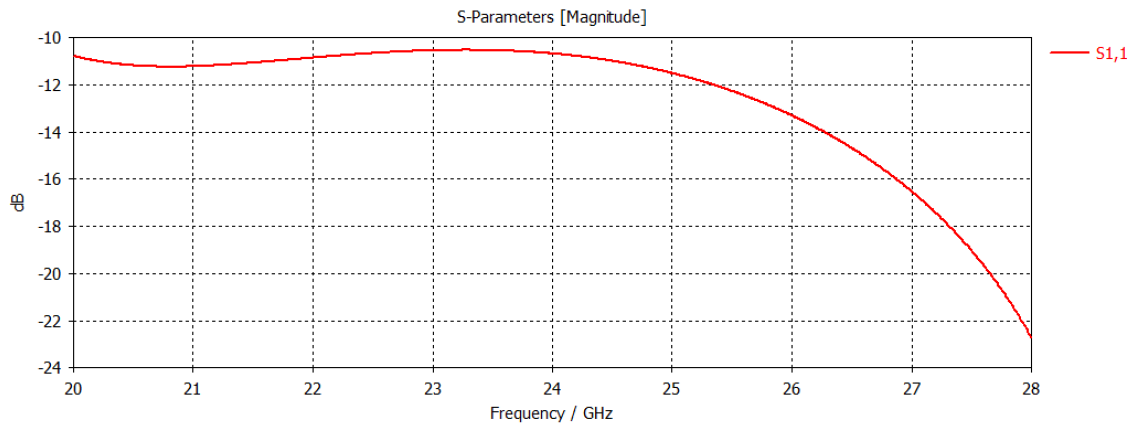


Figura 28. Parámetro S11, coeficiente de reflexión del segundo modelo

Ganancia (dBi)	12.10
Ancho de Haz (-3dB)	62.4°
NLPS (dB)	-17.9
Eficiencia total (dB)	-0.3908
S ₁₁ (dB)	-10.5

Tabla 5. Resultados del segundo modelo

6.1.3 Resultados de los diagramas que se obtuvieron con el tercer modelo modelo que se diseñó.

El diseño que se muestra en la siguiente Figura [29] es el correspondiente al tercer modelo simulado en CST, como se puede apreciar respecto del modelo anterior se ha tratado de mejorar el modelo de los ocho sectores, lo que se pretendía es que la antena fuera mucho más directiva. A diferencia del modelo anterior se han variado una serie de medidas entre ellas la que destaca es la reducción del plato inferior de la antenna, así como el aumento de la longitud del monopolo, se ha visto que teniendo los dos platos de la antenna con dimensiones similares hará aumentar la directividad de manera considerable, definiendo mucho mejor las cavidades que se quieren excitar y se ha visto que aumentando la longitud del monopolo la frecuencia de resonancia baja hasta la frecuencia de trabajo deseada (24 GHz) ya que en el diseño anterior se tenía un comportamiento fuera del objetivo buscado.

Aún no sabemos el valor concreto que tendrá que tener el monopolo para que la antena trabaje de manera adecuada, más adelante se concretará.

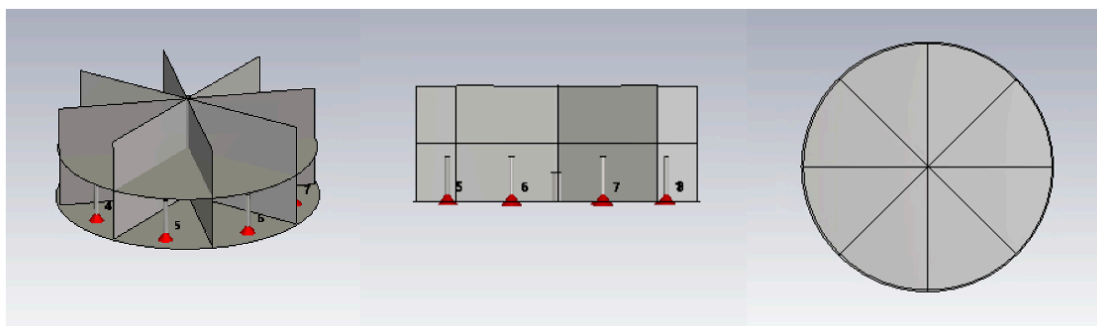


Figura 29. Diseño del tercer modelo en CST

Para este tercer modelo como se ha dicho anteriormente, se ha tratado de corregir los errores del diseño anterior, para tratar de obtener un mejor resultado se han hecho los dos platos de la antena prácticamente del mismo radio, el plato inferior de 25 mm y el superior de 24.5 mm, en el diseño anterior la antena resonaba a una frecuencia de 28 GHz aproximadamente, por ello se ha

aumentado el espacio entre placas a 10 mm y se ha aumentado la altura del monopolo hasta 7.8 mm con el objetivo principal de reducir la frecuencia de trabajo hasta 24 GHz.

Por primera vez se ha parametrizado el valor que busca una distancia al centro de la antenna que sea ideal, para ello se han parametrizado los caracteres 'a' y 'b' con las fórmulas que se ven en la Figura [30], de esta manera trabajar en el diseño de la antenna es mucho más sencillo y únicamente variando el parámetro R nos moveríamos en el eje de la bisectriz de la propia cavidad.

Parameter List				
Name	Expression	Value	Description	
R_inf	= 25	25		
R_sup	= 24.5	24.5		
esp_placas	= 10	10		
lambda	= 12.5	12.5		
R_cil	= 0.4375	0.4375		
altura_cil	= 7.8	7.8		
a	= R*cosd(22.5)	18.9395304164814		
b	= R*sind(22.5)	7.84501036348434		
R	= 20.5	20.5		

Figura 30. Lista de parámetros del tercer modelo

Con todo esto se han podido conseguir los siguientes resultados que se muestran a continuación.

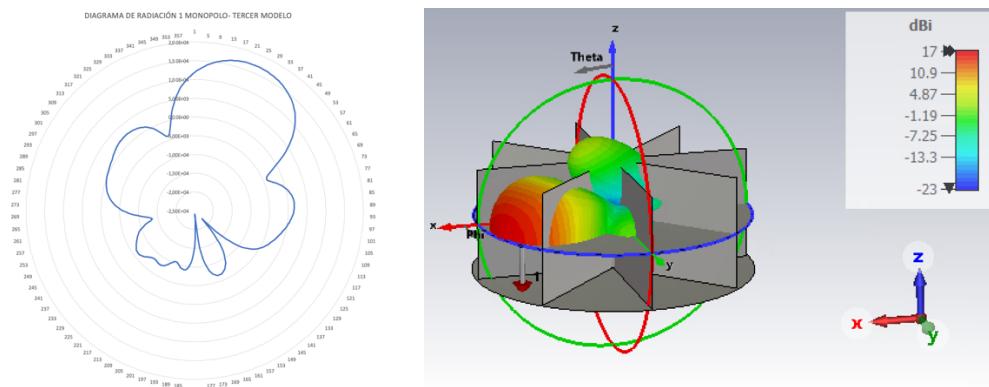


Figura 31. Diagrama del comportamiento de un único monopolo en el tercer modelo

Esto es el diagrama de campo para uno de los puertos seleccionados, como se puede observar el resultado es a priori mejor que del que partíamos, hemos obtenido una ganancia de 17 dBi, mejorando la ganancia que se obtenía anteriormente (14.58 dBi)

¿Por qué hemos conseguido mayor ganancia?

En general, una antenna con un ancho de haz más estrecho, que se ha conseguido reduciendo el plato inferior de la antenna hasta una medida similar a la del plato superior, se tendrá una ganancia más alta que una antenna con un ancho de haz más amplio.

Esto se debe a que una antenna con un ancho de haz más estrecho puede concentrarse su energía en un área más pequeña, lo que resulta en una mayor intensidad de la señal en esa dirección, por el contrario una antenna con un ancho de haz más amplio dispersa la energía en un área más grande, lo que resulta en una menor intensidad de la señal en cualquier dirección específica.

En último lugar y tal y como se aprecia en la Figura [32], se ha tratado de obtener un buen nivel del parámetro S_{11} , con este parámetro se mide la cantidad de señal que se refleja en una antena y se evalúa su eficiencia, así como la potencia neta radiada.

Se trata de una antena trabajando a 24 GHz por lo que se podría decir que con un valor por debajo de -10 dB a la frecuencia a la que se trabaja se aceptaría como un buen resultado, para ver el comportamiento de las distintas partes de la antena en relación a como afecta en la frecuencia de trabajo que se desea conseguir (24 GHz) se realizó un 'Param Sweep' que permite hacer un barrido paramétrico, pudiendo cambiar el tamaño de los platos así como la altura y grosor de los monopolos.

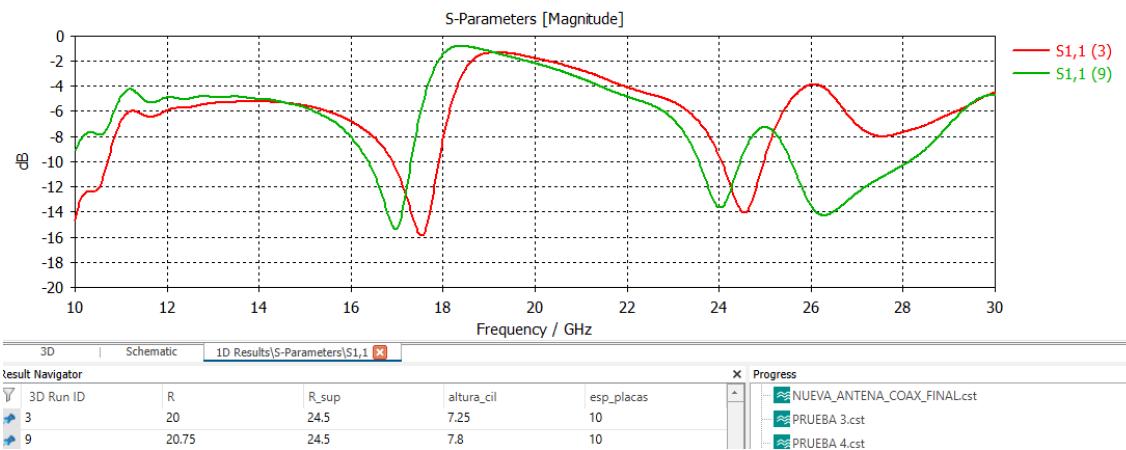


Figura 32. Barrido paramétrico del parámetro S_{11}

Tras el barrido y evaluando estos resultados se ha llegado a una conclusión y es que aumentando la longitud del monopolo hasta 7.8 mm la frecuencia de resonancia baja, puesto que se basa en la ecuación de la longitud de un monopolo $l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f}$ al aumentar la longitud disminuye la frecuencia de trabajo.

Aumentando los radios de las placas tanto inferiores como superiores lo que conseguimos es que se tenga una mayor superficie, como se aprecia, la distancia que se tiene ahora del monopolo respecto del centro de la cavidad es algo mayor, cuanto más fuera se encuentre del interior de la cavidad, menor será la frecuencia de resonancia.

Pero no solo se ha visto afectado por la distancia del monopolo al centro, sino también por su altura como ya se ha comentado anteriormente.

Variando estos distintos parámetros se ha llegado a la conclusión que el que diseño que mejor se adaptaba precisamente a esta frecuencia es el de la Figura [33].

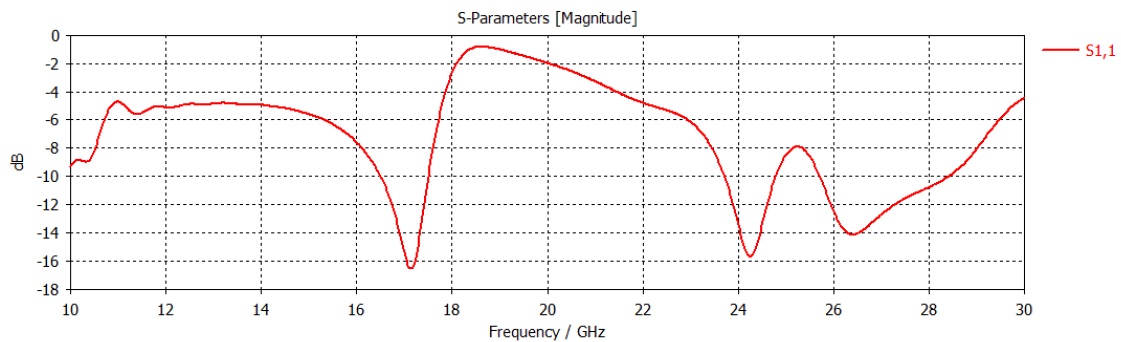


Figura 33. Gráfica del parámetro S_{11} tras el barrido paramétrico.

Tras el estudio de una antena monopulso y siguiendo su funcionamiento, se necesita no únicamente una señal suma como se venía mostrando en el diagrama, la antena monopulso combina también una señal diferencia que hasta el momento no se estaba teniendo en cuenta. Es por esto que se eligen dos puertos como muestra del funcionamiento, para poder obtener estas señales que interesan, alimentando dichos puertos en fase y contra fase según indica la teoría de la Figura [10].

El **Caso 1** es el diagrama que se muestra a continuación es la combinación de los puertos 2 y 3 en fase, lo que nos dará la combinación suma de la señal transmitida, que como se puede observar al tener más ancho de haz (62°), la concentración de la energía en una sola dirección es menor, por lo tanto eso se traduce en una menor ganancia que si se estuviera presentando únicamente la respuesta de un solo monopolo, la representación de un monopolo da una ganancia de 17 dBi mientras que si se simula el sector que se pretende replicar para la antena monopulso con ambos monopolos en fase se tiene una ganancia de 15 dBi.

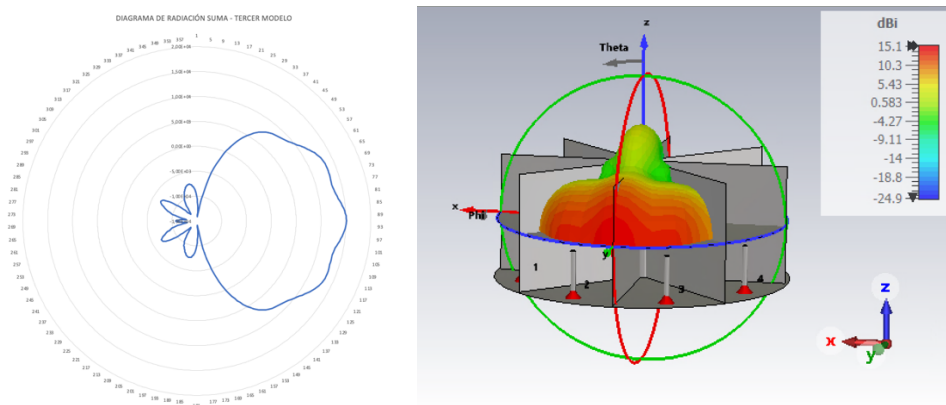


Figura 34. Diagrama suma del tercer modelo

Una vez se tiene el diagrama suma según la arquitectura de protocolo vista en la Figura [9], únicamente hace falta obtención del diagrama diferencia, que combinándolas según la Ecuación [1] ayudará a la detección más exacta del objetivo que se busca.

Es por ello que para la obtención de este diagrama diferencia se han alimentado los puertos 2 y 3 en fase (0°) y contra-fase (180°). (**Caso 2**)

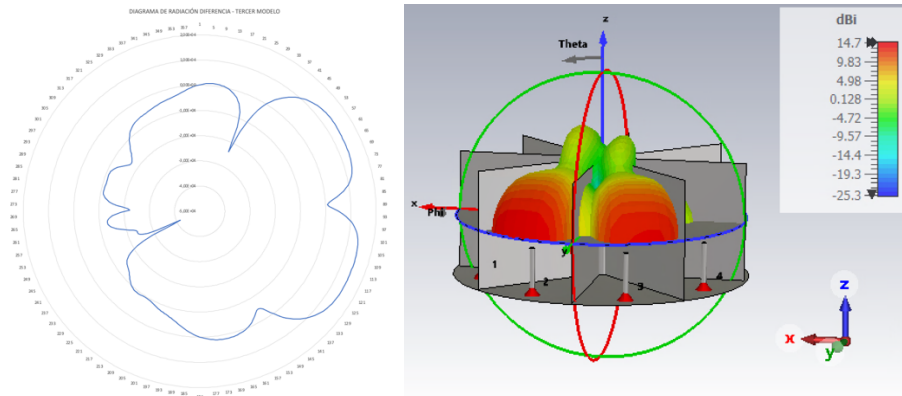


Figura 35. Diagrama diferencia del tercer modelo

En este caso, para el diagrama diferencia se tiene un ancho de haz a -3 dB de en torno a 97°, estos valores se de ancho de haz se han obtenido utilizando una serie de ‘markers’ en gráfico, a pesar de que el software proporciona un valor de ancho de haz, al tratarse de un diagrama diferencia con un nulo, únicamente coge uno de los lóbulos principales y no tiene en cuenta el segundo, es por esto que se hizo uso de estos ‘markers’ poniendo dos de ellos en los máximos de cada lóbulo y otros dos a -3 dB de cada uno de los máximos, de esta manera se veía claramente los grados que cubre el diagrama diferencia.

Como se puede observar en el diagrama de la Figura [35] no se tiene un nulo en el diagrama diferencia lo suficientemente grande para que se cumpla el objetivo que se busca (nulo de al menos 20 dB de diferencia) aun así se ve que el comportamiento de la antena es el esperado en la simulación.

En cuanto a los niveles de lóbulos principales a secundarios se tienen valores dentro del objetivo en ambos casos, por lo que se puede decir que la mayoría de la energía se concentra en el lóbulo donde la directividad es mayor y no en los lóbulos secundarios, ya que estos no interesan para la detección en la dirección de apuntamiento.

Además en términos de eficiencia total, se tienen valores cercanos a uno en ambos casos del orden de 0.81 en lineal, se recuerda que un valor ideal sería lo más cercano a uno posible, eso indicaría que las pérdidas serían mínimas, lo que indicaría que la potencia que se radia es prácticamente la potencia entregada.

	Caso 1	Caso 2
Ganancia (dBi)	15.13	14.67
Ancho de Haz (-3dB)	62.0°	97.29°
NLPS (dB)	-17.85	-18.36
Eficiencia total (dB)	-0.9048	-0.9060

Tabla 6.Resultados del tercer modelo en diagrama suma y diferencia

Caso 1: Diagrama de radiación suma del tercer modelo

Caso 2: Diagrama de radiación diferencia del tercer modelo

6.1.4 Resultados de los diagramas que se obtuvieron con el cuarto modelo modelo que se diseñó.

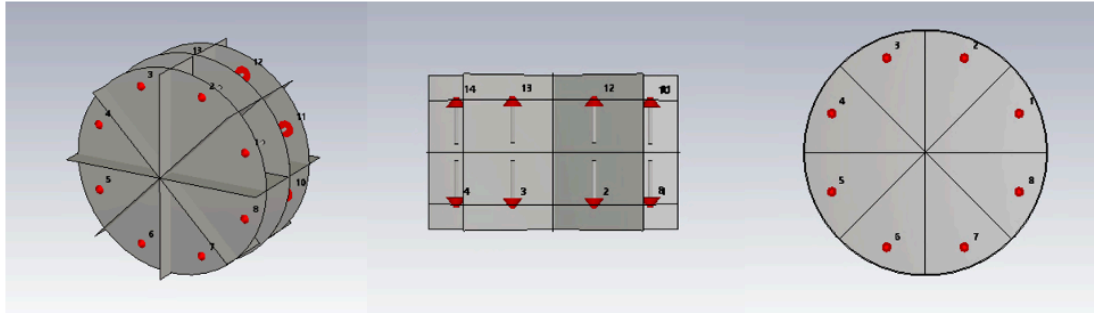


Figura 36. Tercer modelo diseñado en CST

Siguiendo con el proceso de diseño de la antena-radar y sus resultados, se cambió el diseño a uno más acorde al diseño final que se busca, puesto que el procedimiento para encontrar la variación del ángulo es dividir el conjunto en dos grupos verticales, con esto se quiere buscar la combinación en azimut y elevación, para ello y tal y como se muestra se debe dividir la antena en cuatro cuadrantes iguales, dos arriba y dos abajo, siguiendo el esquema de la Figura [10].

De esta manera se podrá obtener un diagrama suma y un diagrama diferencia alimentando las cuatro cavidades en cada uno de los sectores de la antena.

Es por esto que se decidió construir otro nivel superior, de modo que tengamos 4 puertos por cada sector, dos arriba y dos abajo.

Para este modelo, como ya se ha comentado con anterioridad, se ha buscado el acercamiento a lo que sería el diseño final de la antena-radar, como se puede observar se han mantenido los valores de los parámetros que se utilizan en el propio diseño, el único cambio es que se ha añadido un plato más (la antena es simétrica respecto del plato central), ahora se tienen los dos platos que hacen de tapa de 25 mm y el plato intermedio de 24.5 mm, formando junto con los planos de corte las 4 cavidades que se buscan alimentar por cada uno de los sectores.

Parameter List				
Name	Expression	Value	Description	
R_inf	= 25	25		
R_sup	= 24.5	24.5		
esp_placas	= 10	10		
lambda	= 12.5	12.5		
R_cil	= 0.4375	0.4375		
altura_cil	= 7.8	7.8		
a	= $R \cdot \cos(22.5)$	18.9395304164814		
b	= $R \cdot \sin(22.5)$	7.84501036348434		
R	= 20.5	20.5		

Figura 37. Lista de parámetros del cuarto modelo

Para la obtención de los resultados se ha buscado la obtención de las señales que proporcionarán la función monopolso, es decir, la señal suma y la señal diferencia en azimut y en elevación.

En primer lugar tenemos el **Caso 1** que corresponde con el diagrama suma, este se consigue alimentando los puertos de acuerdo con la combinación [1], (diagrama suma) de manera que se obtenga un monopolso horizontal en la dirección $\phi=45^\circ$ con un máximo en plano vertical ($\theta=90^\circ$).

Se obtiene un buen nivel de ganancia (10.7 dBi), algo peor que cuando se simulaban únicamente dos cavidades y con un diagrama de radiación algo irregular, esto se debe a que se ha aumentado la altura de la antenna ya que se ha añadido un plato más al diseño, esto ha hecho que el resultado de la simulación empeore.

El ancho de haz que presenta este diagrama radiación tiene una mejor respuesta, el sector simulado estaría entorno a los 75.81° , un resultado muy aceptable en transmisión y con un muy buen rango de cobertura teniendo en cuenta los requisitos que se buscan en una antenna de estas características.

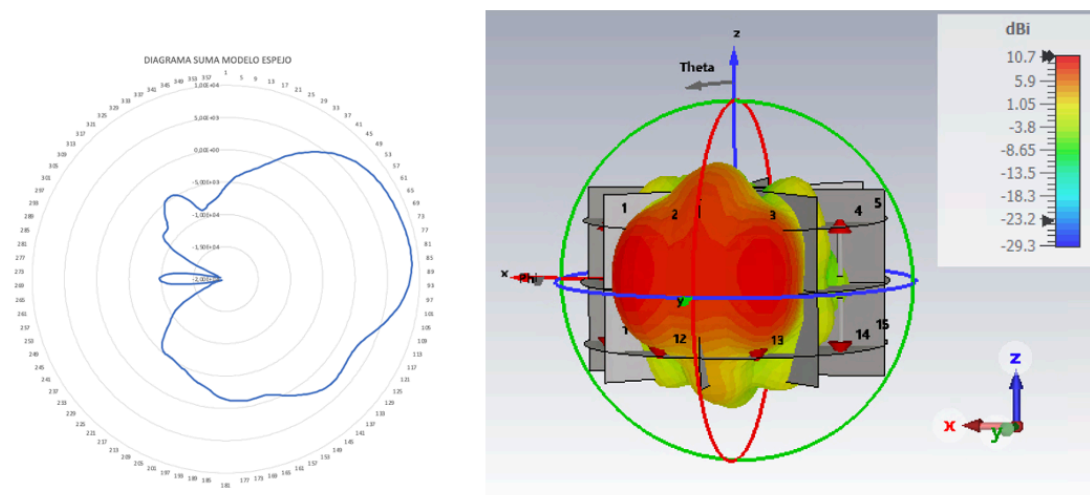


Figura 38. Diagrama de radiación suma del cuarto modelo

En cuanto al **Caso 2**, Alimentando los puertos de acuerdo con la combinación [2], (diagrama diferencia en azimut) de manera que se obtenga un monopolso horizontal en la dirección $\phi=45^\circ$ y el monopolso en el plano vertical ($\theta=90^\circ$).

Para el diagrama diferencia en azimut en la recepción de la antenna, se obtienen los siguientes diagramas de radiación, con un valor de 10.9 dBi, un buen valor, pero aún mejorable teniendo en cuenta que es la primera simulación en diferencia a cuatro puertos.

Este tipo de simulación actuando en esa combinación de fases debe generar un nulo en la dirección de radiación de la antenna para que ayude en el plano horizontal, generando un error o nulo que permite detectar con mayor facilidad, cuanto mayor sea la profundidad del nulo mayor será la sensibilidad que se tenga a la hora de detectar un objeto.

En este caso se obtiene un muy buen nivel de nulo en el diagrama diferencia en azimut (28.60 dB) lo que sería suficiente para una detección más que precisa teniendo en cuenta que un valor suficientemente óptimo sería de entorno a 20 dB de diferencia.

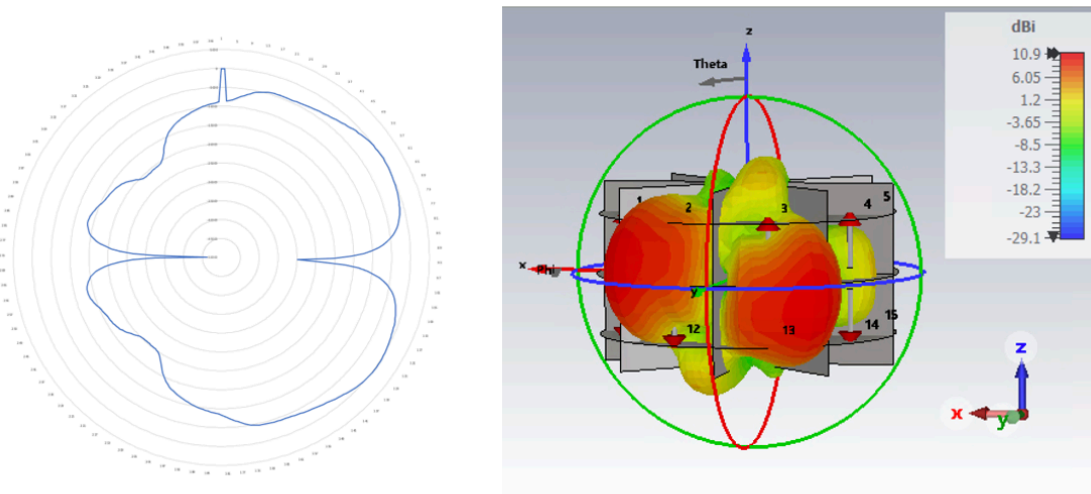


Figura 39. Diagrama de radiación diferencia en azimut para el cuarto modelo

Profundidad Nulo	28.6012 dB
------------------	------------

Para el **Caso 3**, y en tercer lugar, alimentando los puertos según la combinación [3].(diagrama diferencia en elevación) de manera que se obtenga un monopolso horizontal en la dirección ($\phi=45^\circ$) y el monopolso en el plano vertical ($\theta=90^\circ$).

En este caso se obtiene una ganancia de 9.29 dBi, y lo que es más importante se ve que el nulo que se genera en el diagrama elevación es muy bueno lo que indicará un buen comportamiento a la hora de que la detección del objetivo sea más certera.

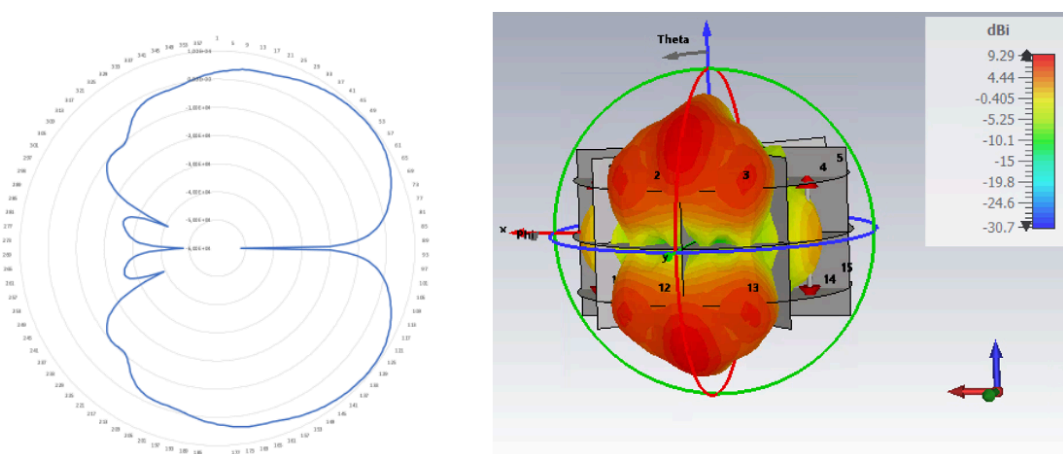


Figura 40. Diagrama de radiación diferencia en elevación para el cuarto modelo

Profundidad Nulo	24.991 dB
------------------	-----------

Cabe destacar que en los tres casos el nivel de lóbulo principal a secundario es un nivel dentro del rango que se busca, por debajo de -15 dB, lo que sería un buen comportamiento, esto se traduce en bajas posibilidades de falsas detecciones, si la diferencia en cambio fuese por encima de -15 dB estaríamos hablando que esos lóbulos secundarios se pueden confundir con falsas direcciones que no queremos y mediante las cuales se podrían obtener detecciones que no se buscan.

En términos de eficiencia total, se tienen muy buenos niveles para la transmisión del diagrama suma, con un valor entorno a 0.95 en lineal y un valor para el diagrama diferencia en elevación para la recepción también cercano a 0.95, ambos muy próximos a uno y con una respuesta muy cerca de lo ideal, y aunque no llega a ser preocupante se observa que se tendrá algo más de pérdidas en azimut con un valor de 0.73 en lineal, que no es alarmante pero que sí que es necesario comentarlo de cara a una posible mejora.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Ganancia (dBi)	10.75	10.9	9.29
Ancho de Haz (-3dB)	75.81°	126.91°	110.74°
NLPS (dB)	-16.25	-16.66	-17.038
Eficiencia total (dB)	-0.1920	-1.337	-0.1871

Tabla 7. Resultados de los diagramas para los tres casos

Caso 1: Diagrama de radiación suma del cuarto modelo

Caso 2: Diagrama de radiación diferencia-azimut del cuarto modelo

Caso 3: Diagrama de radiación diferencia-elevación del cuarto modelo

Por lo que respecta a los parámetros de reflexión S que se obtienen se utilizan para describir el comportamiento de una antena omnidireccional como la que se presenta, en términos de la capacidad que posee para transmitir y recibir señales en sus diferentes direcciones.

Para este modelo de antena que se está simulando se deben tener en cuenta tanto la cantidad de señal que se refleja y como de eficiente es, como su nivel de acoplamiento con el sector que le precede es por esto que se han evaluado los siguientes parámetros.

- El parámetro S_{11} (Coeficiente de reflexión) que va indicar la cantidad de señal que se refleja a la frecuencia de trabajo que se está trabajando para la antena, en este caso 24 GHz, es un parámetro importante para ver el rendimiento real de la antena y ver la calidad de la señal transmitida o recibida.

El comportamiento que presenta esta antena en cuanto a términos de reflexión a la frecuencia de resonancia no es del todo bueno, como se puede observar se obtiene un valor algo superior a lo que sería un valor catalogado como óptimo (por debajo de -10 dB) en este caso a la frecuencia a la que resuena la antena se tiene un valor cercano a -7 dB) lo que indica que aún tenemos margen de mejora en el diseño final que se busca y que se tratará de ajustar al requisito en diseños próximos.

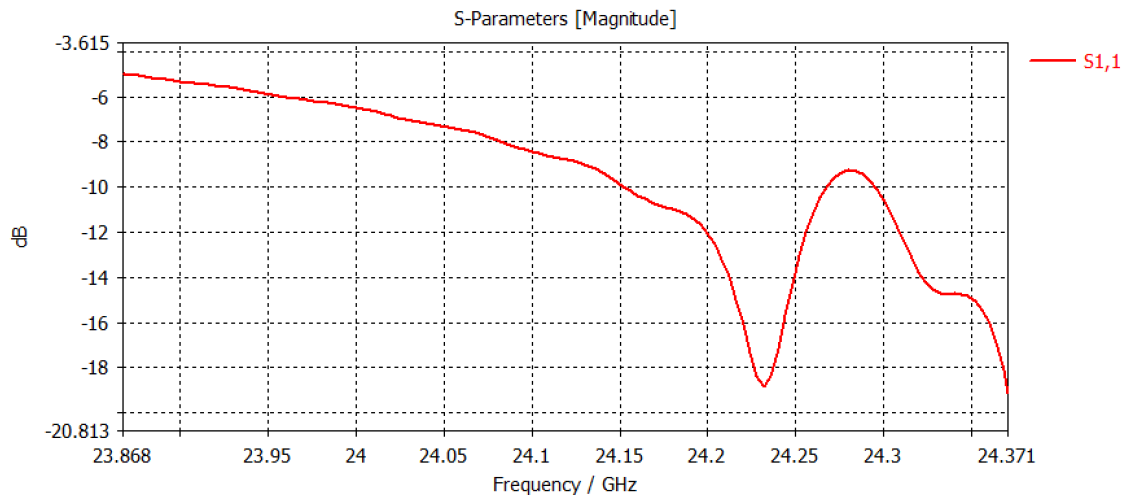


Figura 41. Parámetro S_{11} de reflexión del cuarto modelo

- El parámetro S_{21} (coeficiente de desacoplo) indicará el nivel de acoplamiento de un sector a su adyacente, interesa que cada sector transmita de manera independiente uno de otro, es por ello que se busca un nivel por debajo de -10 dB, pues esto indicará que el sector está desacoplado y no transmitirá parte de su señal al sector que le precede. Se recuerda que interesa que cada sector transmita de manera independiente uno de otro por lo que es importante cuando se habla del término de desacoplo y de los requisitos que se tienen que cumplir con este parámetro.

Un nivel como el que se muestra en la Figura [42], indica un buen comportamiento de cara a lo que se busca en este tipo de antena y a su correcta transmisión y recepción de manera sectorial.

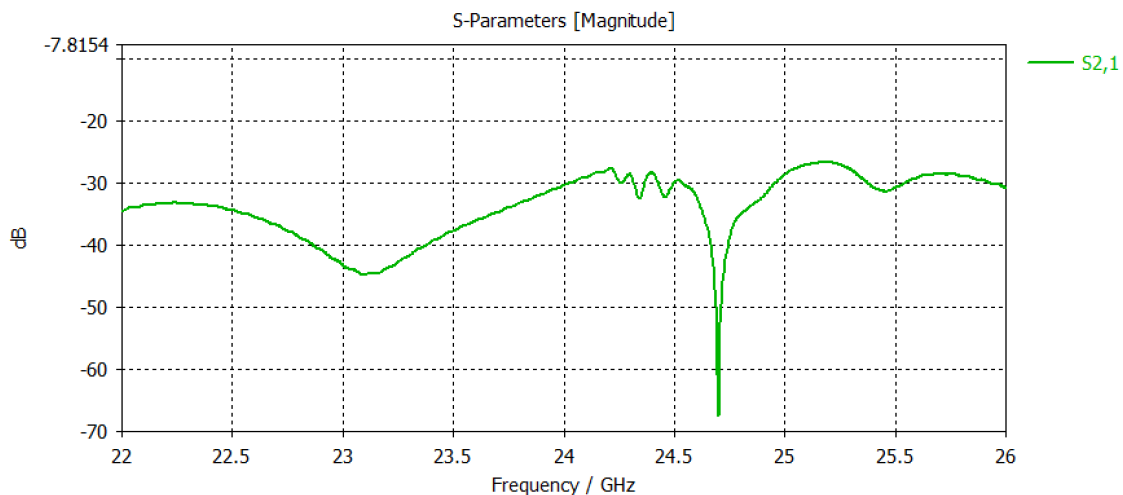


Figura 42. Parámetro S_{21} de desacoplo del cuarto modelo

En definitiva, se trata de un diseño con comportamientos irregulares y algo mejorables de cara al futuro del diseño de la antena, se tiene un comportamiento en transmisión con una ganancia aceptable, y un comportamiento algo mejorable de cara a la recepción, con una reflexión de la señal fuera de la frecuencia de trabajo de la antena, aunque con una buena independencia de señal entre sectores contiguos.

6.1.5 Resultados de la respuesta para el diseño final (1) a 1 mm de espesor.

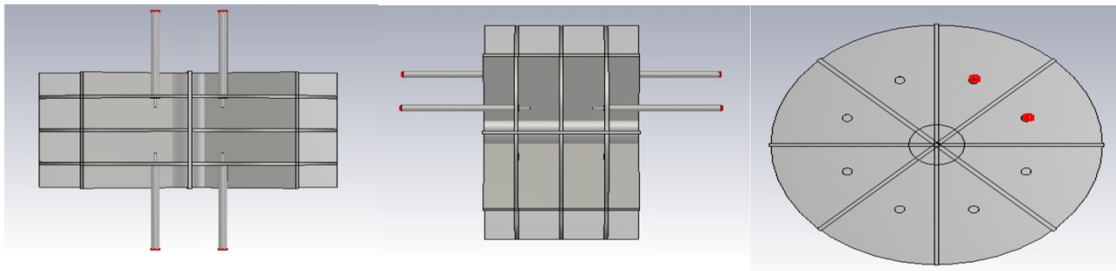


Figura 43. Diseño de la antena-radar en CST a 1 mm de grosor

El modelo que se muestra en la Figura [43] es el primer diseño final al que se ha llegado después de haber recorrido múltiples diseños y haber realizado un estudio detallado de los mismos.

En este apartado se hará un barrido sobre los aspectos más importantes a tener en cuenta a la hora de analizar el correcto funcionamiento de la antena-radar.

Se ha optado en este modelo por realizar una simulación con cuatro puertos activos, tal y como se venía haciendo en el modelo anterior para poder observar cómo se comporta la antena en conjunto, siguiendo la estructura anterior en la que se contaba con las cuatro cavidades que buscan en el modelo de una antena monopulso. Por esto es por lo que se ha decidido alimentar los puertos según la Figura [44], de modo que se obtengan tanto la suma en transmisión como suma y diferencia en azimut y elevación en recepción.

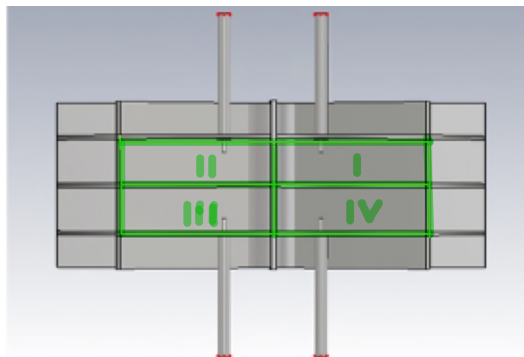


Figura 44. Representación de las cuatro cavidades en relación a la alimentación que se busca.

Cabe destacar que este modelo de antena - radar se ha diseñado con un grosor de 1 mm tanto en las paredes como en los platos, tratando de simular un modelo más cercano a la realidad y en el que se pudieran ver los cambios que implica en el comportamiento de la antena el tener un grosor tanto en los platos como en los planos que cortan a la antena formando los sectores.

Hay que resaltar que se ha añadido un cilindro en la parte central de la antena, el objetivo de este cilindro no es otro que el de facilitar la futura construcción a la hora de encajar los planos sectoriales que presenta.

Además la alimentación de la antena ha pasado a ser a través de un cable coaxial, buscando la facilidad de alimentarla de cara su futura construcción.

Siguiendo un poco la línea del diseño anterior se ha tratado de mejorar en los aspectos en los que la antena-radar requería, uno de estos aspectos es la superficie de la antena, se ha pasado de 25 mm de radio de la antena a 36 mm, se vio en el diseño anterior que al haber aumentado la altura de la antena ya que se había añadido un plato más, no favorecía al comportamiento de esta.

Además, al tener más superficie la frecuencia de resonancia que estaba en unos niveles altos en comparación con lo que se buscaba debería aumentar, pero se ha tratado de llegar a una cierta sincronía entre la superficie, la altura del vivo (núcleo conductor del coaxial) y el grosor de la antena.

Puesto que el núcleo conductor del cable coaxial estará más dentro de la cavidad (más cerca del centro de la antena) teniendo más superficie, se tendría que la frecuencia de trabajo aumentaría, que junto con una reducción del núcleo conductor o vivo del cable coaxial harían que esta sea algo superior a 24 GHz. Pero hay que tener en cuenta que ahora la antena es más grande que antes y que gracias al grosor de las paredes de 1 mm se ha visto reducida la cavidad y esto afecta bajando la frecuencia de trabajo de la antena, es por ello que la combinación de todos estos parámetros de superficie, altura del vivo y grosor de la antena dan los resultados esperados en cuanto señal suma y diferencia así como la reflexión de la señal y nivel de acoplamiento a la frecuencia a la que trabaja esta antena (24 GHz).

Parameter List			
	Name	Expression	Value
-	R_inf	= 36	36
-	R_sup	= 36	36
-	esp_placas	= 10	10
-	lambda	= 12.5	12.5
-	R_cil	= 0.4375	0.4375
-	altura_cil	= 2	2
-	a	= R*cosd(22.5)	19.401470182737
-	b	= R*sind(22.5)	8.03635207966689
-	R	= 21	21
-	ALTURA_VIVO	= 1.5	1.5
-	ALTCOAX	= 1.5*10	15
-	RADIOEXT	= 0.22/2*10	1.1
-	RADIOEXT	= 0.1676/2*10	0.838
-	RADIOVIVO	= 0.0496/2*10	0.248
-	ALTURA_PIN	= 1+altura_cil	3
-	RADIOCILCENTRAL	= 6	6

Figura 45. Lista de parámetros del modelo final a 1mm de grosor

Caso 1: Alimentando los puertos de acuerdo con la combinación [1], tomando como referencia la Fig.(diagrama suma) de manera que se obtenga un monopulso horizontal en la dirección $\phi=45^\circ$ con un máximo en plano vertical ($\theta=90^\circ$).

Estamos delante del diagrama de radiación ‘suma’ en el cual la radiación es simétrica en todas las direcciones del plano horizontal, por lo que mostrará una ganancia constante en todas sus direcciones. Este diagrama ayudará a evaluar la eficiencia y la directividad de la antena. Por lo que respecta a los resultados obtenidos en este diagrama para la transmisión de la antena, se puede decir que son los resultados esperados y que el diseño de la antena cumple con los requisitos citados.

Tal y como se puede observar en la Figura [46], con esta combinación de puertos se obtiene una ganancia de 13.2 dBi, es una respuesta que se ha podido mejorar respecto la simulación

pasada en la que se tenía 10.75 dBi, lo cual es un muy buen resultado, y se tiene un buen nivel de ancho de haz a -3 dB, cobertura que se ha mantenido, dando en este caso mucha energía con un rango de actuación similar, únicamente en uno de los sectores, se tiene un rango de 77° lo que indicará una buena cobertura teniendo en cuenta que cuanto más se acerque a 90° mejor será para la finalidad de nuestro proyecto, ya que se busca la transmisión en 360° para una detección completa junto con los cuatro cuadrantes.

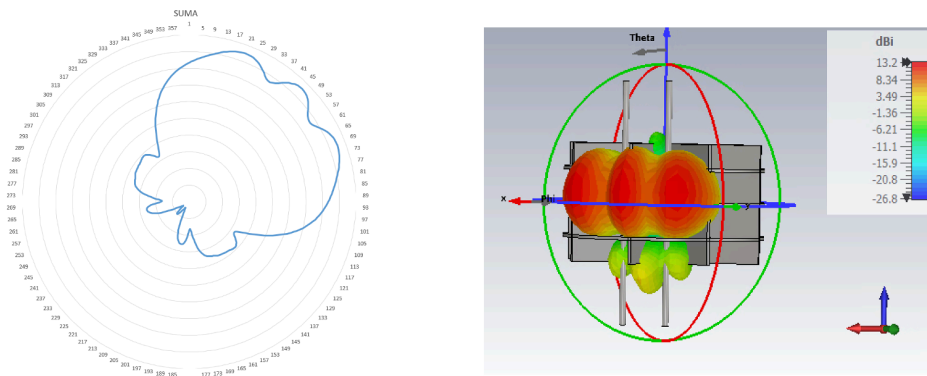


Figura 46. Diagrama suma de la Antena-Radar

Caso 2: Alimentando los puertos de acuerdo con la combinación [2],(diagrama diferencia en azimut) de manera que se obtenga un monopolso horizontal en la dirección ($\phi=45^\circ$) y el monopolso en el plano vertical ($\theta=90^\circ$).

Tal y como se aprecia en esta Figura [47] estamos en la situación en la que tenemos 13.1 dBi de ganancia en azimut, frente a los 10.9 dBi que se tenían anteriormente, es una ganancia próxima a la que se busca, el comportamiento de los cuatro puertos actuando en esa combinación de fases debe generar un nulo en la dirección de radiación de la antena para que ayude en el plano horizontal, generando un error o nulo que permite detectar con mayor facilidad como ya se ha dicho con anterioridad.

En este caso se tiene una profundidad de nulo de aproximadamente 58 dB, lo que quiere decir como se ha dicho en diseños anteriores que se tendrá una sensibilidad mayor a la hora de detectar, este valor es más que suficiente teniendo en cuenta que una diferencia de 20 dB sería un nulo altamente óptimo.

Este es el diagrama, que junto con el diagrama suma y el diagrama diferencia en elevación ayudará en recepción a la detección del objeto que se aproxima y podrá ser detectado con mucha más exactitud en el plano horizontal, siguiendo la ecuación que antes se detallaba y que en conjunto se ayudará a saber con exactitud el ángulo error respecto de la dirección de apuntamiento para saber con exactitud la desviación.

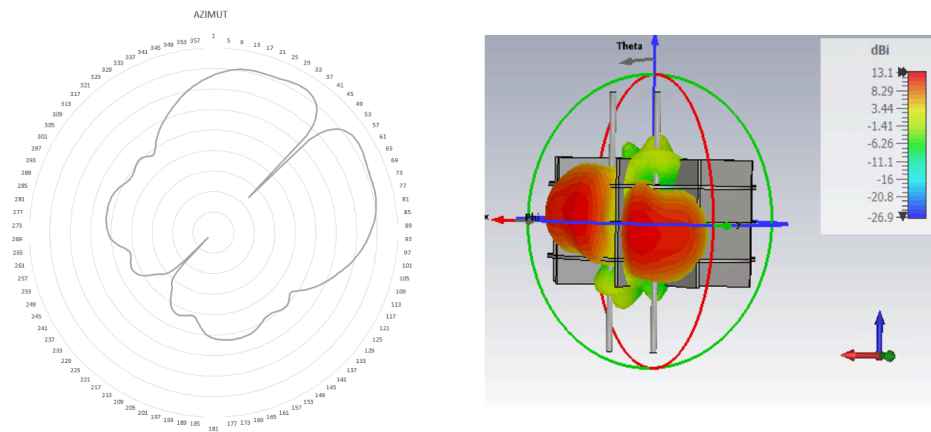


Figura 47. Diagrama diferencia en azimut de la Antena-Radar

Profundidad Nulo	58.3148 dB
------------------	------------

Caso 3: Alimentando los puertos según la combinación [3], (diagrama diferencia en elevación) de manera que se obtenga un monopolso horizontal en la dirección ($\phi=45^\circ$) y el monopolso en el plano vertical ($\theta=90^\circ$).

Tal y como se observa en esta Figura [48], se ha obtenido el diagrama diferencia en elevación, la ganancia es de 10.9 dBi, lo cual es esperable, puesto que la ganancia máxima se alcanza en el eje horizontal y va disminuyendo a lo largo del eje vertical, es por esto que en la ganancia en azimut es parcialmente mayor. En comparación con el diseño anterior también se ha mejorado, se tiene una ganancia superior a los 9.29 dBi del diseño previo.

La respuesta obtenida es muy buena puesto que cuanto mayor es el nulo que se obtiene mayor es el error que induce para una mejor detección junto con el diagrama suma del objeto que se quiere detectar y mejor sensibilidad se tiene a la hora de la detección del blanco.

En este caso en elevación se tiene una profundidad de nulo de 26 dB de diferencia lo cual cumple los requisitos de una antena óptima al superar lo que se buscaba, que era una relación de al menos 20 dB.

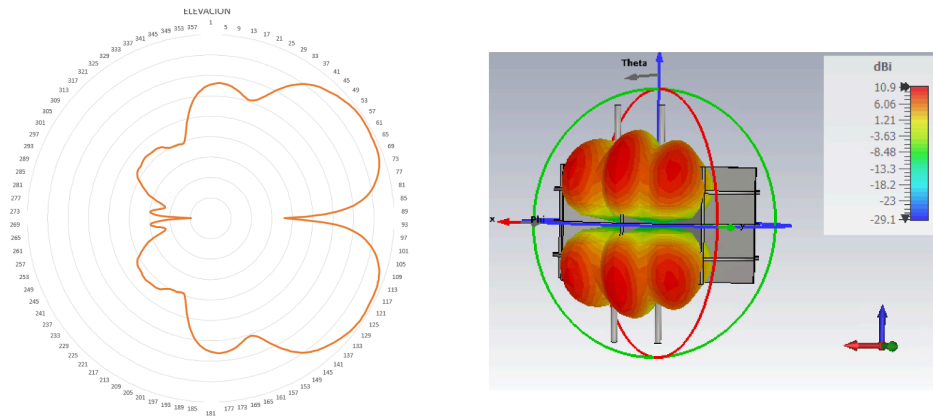


Figura 48. Diagrama diferencia en elevación de la Antena-Radar

Profundidad Nulo	26.08634 dB
------------------	-------------

Estos diagramas en conjunto, es decir, tanto diagrama suma como el diagrama diferencia en azimut y elevación ayudará a la detección del objeto que se aproxima y podrá ser detectado con mucha más exactitud tanto en el plano horizontal como en el vertical, gracias a la combinación del diagrama suma en transmisión y a los diagramas suma y diferencia en recepción, realizando la resta entre ambas señales (suma y diferencia) y viendo el signo que arroja la operación efectuada gracias a un detector de fase, se podrá saber hacia qué dirección se encuentra el objetivo que se está tratando de detectar.

En cuanto al nivel de lóbulo principal a secundario, que permite saber qué relación existe entre el lóbulo donde la directividad es máxima, se tienen muy buenos valores, dentro del objetivo marcado de que sea menor que -15 dB, en las direcciones adicionales la directividad no es tan significativa, lo que permite un mejor comportamiento en la dirección de apuntamiento sobre todo en los casos de la señal suma y diferencia en azimut. En el caso de la diferencia en elevación el NLPS que se tiene no es muy óptimo, se encuentra por encima de -15 dB lo que quiere decir que se transmite algo de energía en las direcciones que no son las de apuntamiento, es decir, en direcciones secundarias o adicionales.

Teniendo en cuenta la eficiencia total de la antena, para los tres casos se tiene un muy buen nivel, las pérdidas son insignificantes y en gran parte la potencia que se radia es casi la potencia que se entrega, se recuerda que los valores oscilan entre cero y uno, siendo cero un valor con muchas pérdidas y uno un valor donde no existen pérdidas, en estos casos se tiene entorno a 0.85 en lineal, lo cual quiere decir que se está muy cerca de lo considerado como ideal.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Ganancia (dBi)	13.2	13.1	10.9
Ancho de Haz (-3dB)	79.22°	89.95°	94.97°
NLPS (dB)	-28.6	-30.1	-11.6
Eficiencia total (dB)	-0.702	-0.705	-0.729

Tabla 8. Resultados de los tres casos expuestos

Caso 1: Diagrama de radiación suma del modelo a 1 mm de grosor.

Caso 2: Diagrama de radiación diferencia-azimut del modelo a 1 mm de grosor.

Caso 3: Diagrama de radiación diferencia-elevación del modelo a 1 mm de grosor.

6.1.6 Parámetros de reflexión S para el modelo a 1 mm de grosor

Los parámetros de reflexión S que se obtienen se utilizan para describir el comportamiento de una antena omnidireccional como la que se presenta, en términos de la capacidad que posee para transmitir y recibir señales en sus diferentes direcciones.

- **Coefficiente de reflexión ($S_{1,1}$):** Con este parámetro se mide la cantidad de señal que se refleja en una antena omnidireccional y se evalúa su eficiencia, así como la calidad de la señal transmitida o recibida.

Se trata de una antena trabajando a 24 GHz por lo que se podría decir que con un valor por debajo de -10 dB a la frecuencia a la que se trabaja sería un buen resultado, en este caso se tiene un valor de -16 dB a la frecuencia de trabajo, tal y como se puede ver en la Figura [49], por lo que se puede decir que la capacidad de transmisión y recepción es óptima.

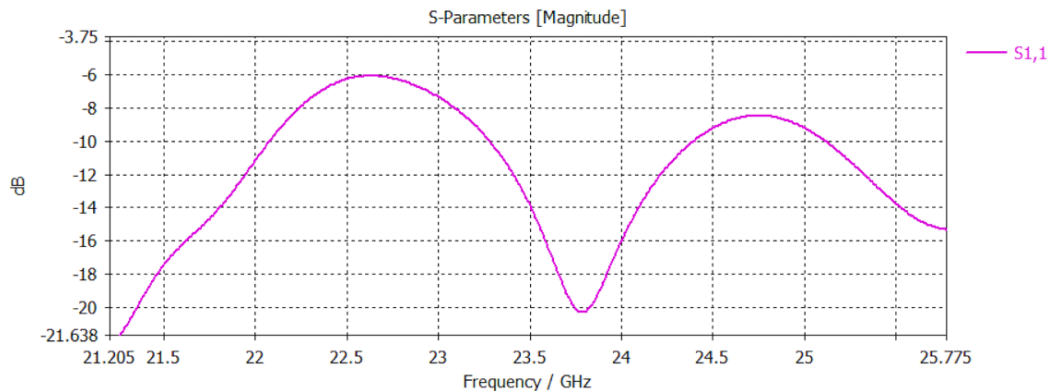


Figura 49. Gráfica del parámetro S_{11}

- **Coefficiente de desacoplo ($S_{2,1}$):** Es necesario que el parámetro S_{21} se encuentre desacoplado ya que esto indica la cantidad de señal que se acopla de una antena a otra cercana, nos sirve para medir el nivel de interferencia entre antenas y garantizar un funcionamiento adecuado.

Cuanto más alto sea el valor del parámetro S_{21} desacoplado, nos indica que tendremos mejor nivel de acoplamiento entre antenas, lo que significará que una gran cantidad de señal se está acoplando.

Lo que se busca en una antena omnidireccional como esta es un bajo nivel de parámetro S_{21} ya que eso confirmará una baja interferencia entre puertos cercanos, cada sector transmite y recibe de manera independiente uno de otro, es por esto que se necesita un desacoplo entre puertos contiguos, en este caso se tiene un valor cercano a -70 dB tal y como se puede observar en la Figura [50], lo cual es óptimo.

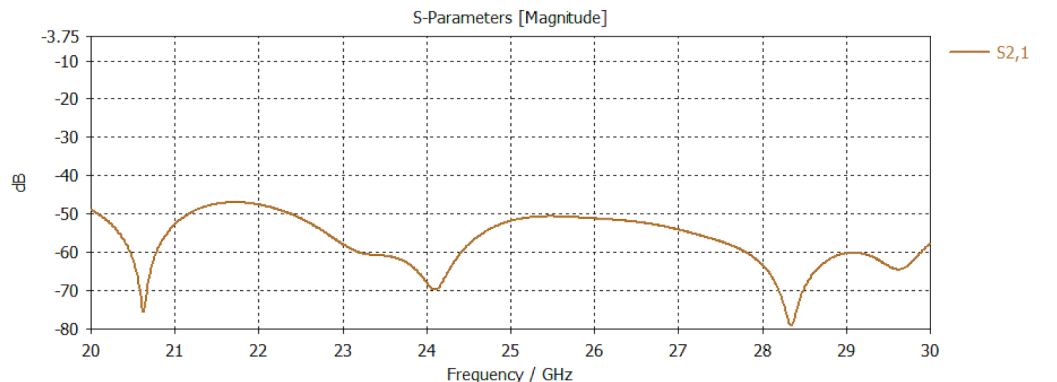


Figura 50. Gráfica del parámetro S_{21}

6.1.7 Resultados de la respuesta para el diseño final (2) a 1.5 mm de grosor.

En este apartado se ha simulado la antena-radar con un grosor de 1.5 mm siguiendo las indicaciones del fabricante, es por ello que se ha buscado obtener unos resultados similares tal y como se puede ver en la Tabla [3], para ello se ha tenido que hacer más grande la antena, se ha pasado de 7.2 mm de diámetro a 9 mm de diámetro para mitigar ciertos errores que aparecían al ensanchar el grosor de las paredes y platos de la antena, así como algunos lóbulos secundarios que aparecían en los diagramas suma y diferencia. Por tanto el diseño final en simulación de este proyecto es el presentado en la Figura [51].

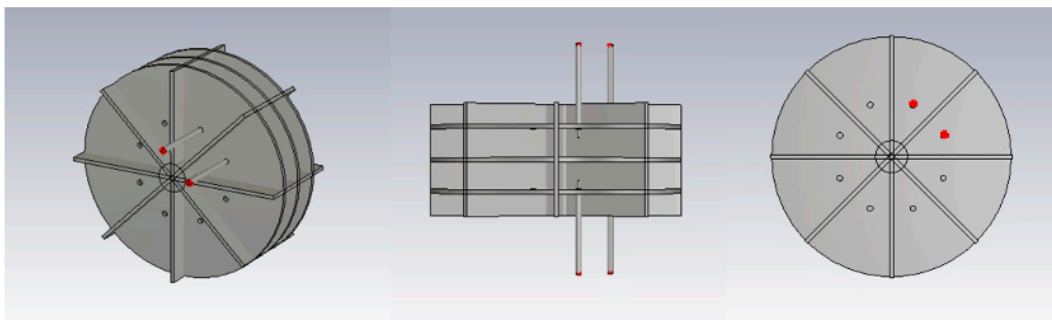


Figura 51. Diseño del último modelo a 1.5 mm de grosor en CST

Caso 1.1: Alimentando los puertos de acuerdo con la combinación [1], (diagrama suma) de manera que se obtenga un monopolso horizontal en la dirección $\phi=45^\circ$ con un máximo en plano vertical (theta 90°).

Tal y como se aprecia en la Figura [52], se ha obtenido una ganancia de 12.6 dBi con un grosor de 1.5 mm en comparación con la ganancia que se obtenía de 13.2 dBi a un grosor de 1 mm.

Al haber aumentado el tamaño de la antena, así como su grosor, la ganancia se ha visto afectada, disminuyendo un poco el valor que se tenía con el diseño anterior.

Se ha sacrificado algo de ganancia, se ha pasado de una ganancia de 13.2 dBi con un grosor de 1 mm a una de 12.6 dBi con un grosor de 1.5 mm. pero se ha ganado en ancho de haz, ahora se tiene mucho más rango de cobertura, se estaría hablando de que la cobertura es casi ideal, puesto que se tienen 84.01° y hay que recordar que se buscan 90° por sector simulado, lo cual es prácticamente perfecto.

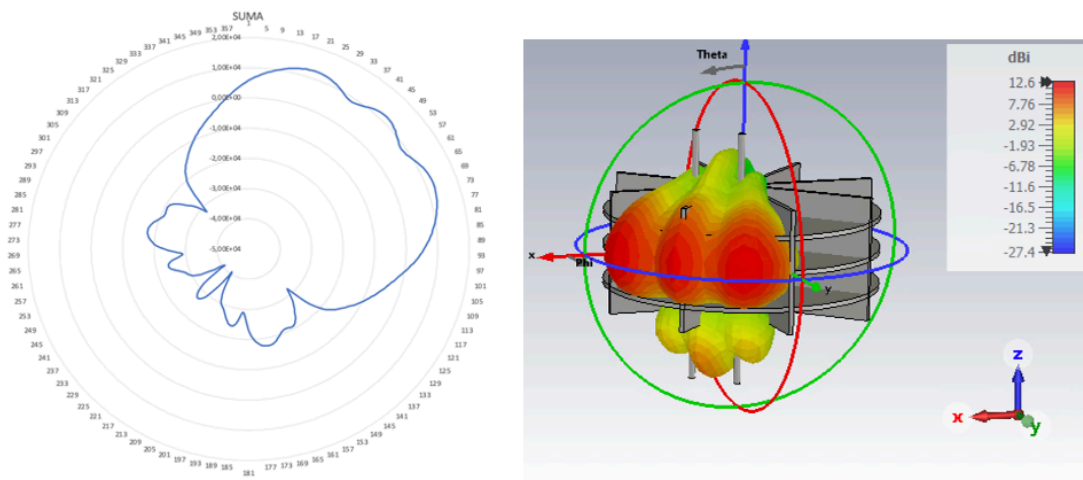


Figura 52. Diagrama de radiación de la señal suma a 1.5 mm

Caso 2.1: Alimentando los puertos de acuerdo con la combinación [2], tomando como referencia la Figura [2] (diagrama diferencia en azimut) de manera que se obtenga un monopolso horizontal en la dirección $\phi=45^\circ$ y el monopolso en el plano vertical ($\theta=90^\circ$).

Tal y como se puede ver en la Figura [53], se ha obtenido una ganancia de 13 dBi con un grosor de 1.5 mm en comparación con la ganancia que se obtenía de 13.1 dBi a un grosor de 1 mm, los cambios no son sustancialmente grandes en este diagrama, por lo que se ha podido mantener en buena medida los resultados que se tenían.

Además se ha llegado a un ancho de haz a -3 dB de entorno a 75° que permite una cobertura más que aceptable teniendo en cuenta que el objetivo es alcanzar una cobertura sectorial lo más cercana a 90° .

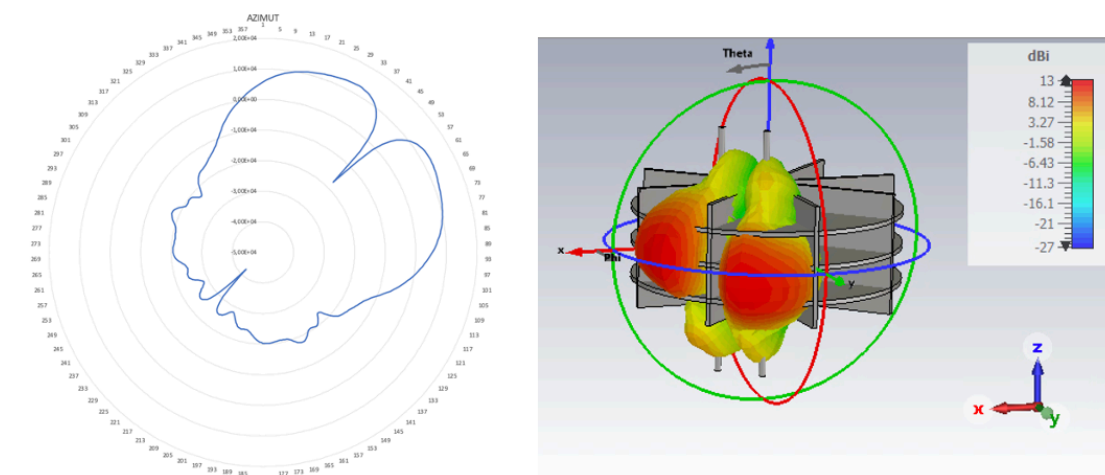


Figura 53. Diagrama de radiación de la señal diferencia en azimut a 1.5 mm

Caso 3.1: Alimentando los puertos según la combinación [3], tomando como referencia la Figura [2] .(diagrama diferencia en elevación) de manera que se obtenga un monopolso horizontal en la dirección $\phi=45^\circ$ y el monopolso en el plano vertical ($\theta=90^\circ$).

Como se aprecia en la Figura [54], se ha obtenido una ganancia de 11.2 dBi con un grosor de 1.5 mm en comparación con la ganancia que se obtenía de 10.9 dBi a un grosor de 1 mm.

Por lo que respecta al ancho de haz a -3 dB se tiene un buen nivel de cobertura, también entorno a 75° , por lo que se puede decir que el comportamiento de la antena en cuanto a rango de cobertura es razonablemente bueno para los casos en recepción de la antena.

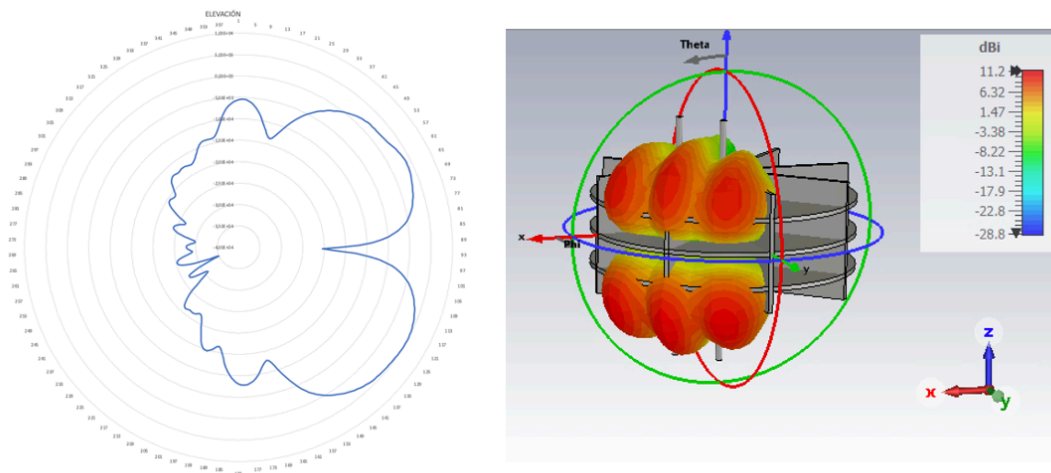


Figura 54. Diagrama de radiación de la señal diferencia en elevación a 1.5 mm

Tras los cambios efectuados respecto del modelo anterior se tiene un nivel de lóbulo principal a secundario más que óptimo en cada uno de los casos, lo que se traduce en una mayor concentración de la energía en las direcciones principales, siendo el objetivo un resultado menor que -15 dB, se puede ver en la Tabla [3] que se cumple enteramente con lo esperado. Cuanto menor sea el valor, menos energía se transmitirá en los lóbulos secundarios del diagrama, lo que favorece al comportamiento de la antena en términos de detección del objeto en la dirección de apuntamiento y por tanto favorece a que no existan falsas detecciones que dificulten el trabajo.

Comentando los resultados de la eficiencia total en los tres casos que se abordan se tienen niveles en lineal muy cercanos a uno, para los casos uno y dos se tienen valores en torno a 0.84 en lineal, mientras que para el caso tres en torno a 0.83, lo cual quiere decir que las pérdidas son casi inexistentes, es por esto que nos ajustamos a los objetivos requeridos para un correcto funcionamiento en términos de señal que se transmite.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Ganancia (dBi)	12.6	13	11.2
Ancho de Haz (-3dB)	84.0181°	74.462°	75.4379
NLPS (dB)	-36.93	-35.45	-17.772
Eficiencia total (dB)	-0.733	-0.752	-0.833

Tabla 9. Resultados de la antena-radar a 1.5 mm para los 3 casos

Caso 1: Diagrama de radiación suma del modelo a 1.5 mm de grosor.

Caso 2: Diagrama de radiación diferencia-azimut del modelo a 1.5 mm de grosor.

Caso 3: Diagrama de radiación diferencia-elevación del modelo a 1.5 mm de grosor.

6.1.8 Parámetros de reflexión S para el modelo a 1.5 mm de grosor

Como consecuencia de aumentar el grosor de los planos y platos de la antena-radar, se ha comprobado que ha mejorado sustancialmente los parámetros S , tanto el coeficiente de reflexión S , como el coeficiente de desacoplo.

- **Coefficiente de reflexión ($S_{1,1}$):** Tal y como se puede observar la calidad de señal transmitida o recibida así como la cantidad de señal que se refleja parece tener un mejor resultado puesto que se tomaba como un valor adecuado que estuviera por debajo de los -10 dB. Anteriormente, con el grosor de 1 mm se tenía un valor de -16 dB a la frecuencia a la que se trabaja (24 GHz), ahora se tiene un resultado bastante mejor, con un valor cercano a -25 dB, como se observa en la Figura [55].

Por lo que se puede decir que la calidad de la señal tanto transmitida como recibida así como su eficiencia y nivel de señal reflejada es parcialmente mejor tras este pequeño cambio de grosor.

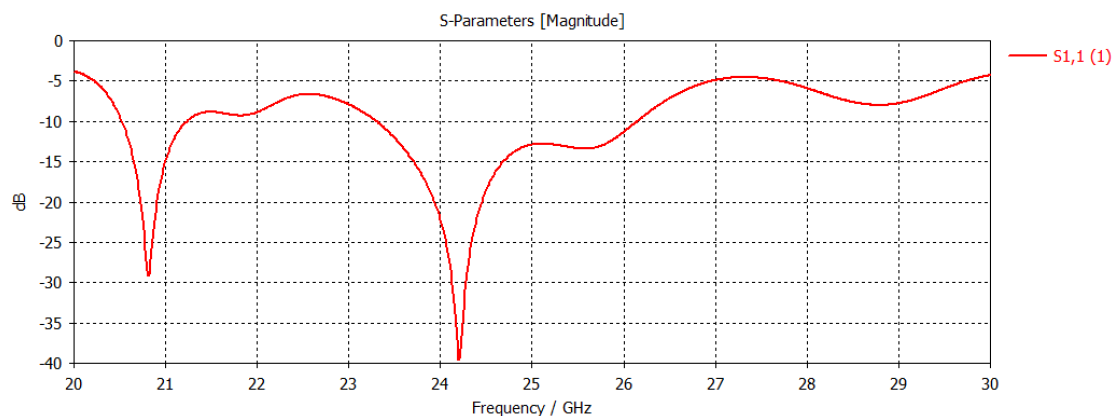


Figura 55. Parámetro S_{11} , coeficiente de reflexión a 1.5 mm

- **Coefficiente de desacoplo ($S_{2,1}$):** Se ha podido comprobar que tras el aumento del grosor de los planos y los platos a 1.5 mm la cantidad de señal que tenía la antena para acoplarse de un sector a su sector adyacente es prácticamente similar a lo que ya se tenía, como se ha podido comprobar viendo la Figura [56]. Anteriormente se tenía un valor cercano a -70 dB el cual ya era lo suficientemente pequeño y parece mantenerse lo cual indica que sigue habiendo un buen comportamiento tras este pequeño cambio de grosor que pedía el fabricante.

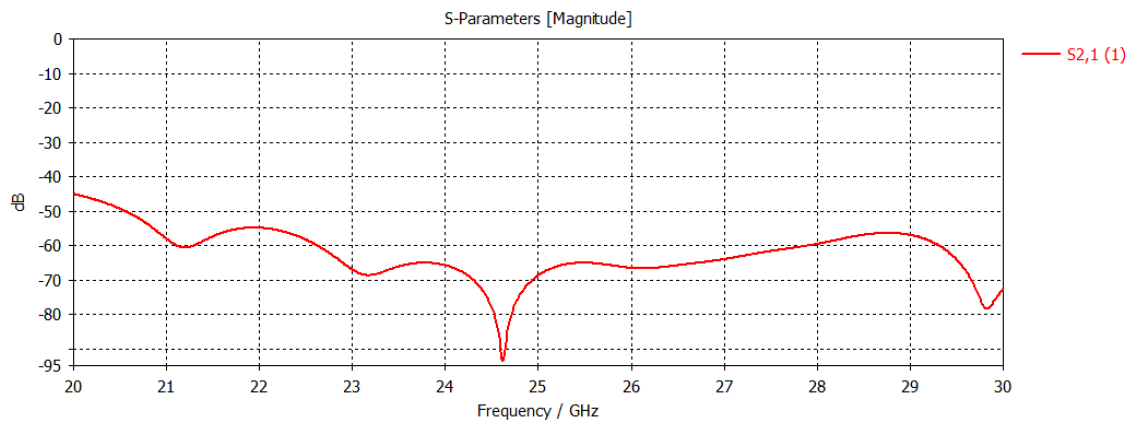


Figura 56. Parámetro S21, coeficiente de desacoplo a 1.5 mm

La antena que se ha diseñado cumple con las expectativas iniciales y tras varios modelos, se ha conseguido elaborar una antena en la que los parámetros más importantes como pueden ser la ganancia, el ancho de haz, el nivel de lóbulo principal a secundario o la eficiencia total, estén todos dentro de los requisitos necesarios para un buen funcionamiento.

A continuación se va a mostrar la función error que se ha obtenido con el modelo final de la antena, la función error dará el error respecto de la ubicación del 'target' siendo así mucho más preciso en su detección. Esto indicará el ángulo de error o desviación que existe respecto del objetivo, y este error se calcula haciendo uso de las señales que se tienen tanto suma como diferencia según la Ecuación [1]

Se va a realizar la función error de las siguientes señales con la dirección de apuntamiento que se muestran:

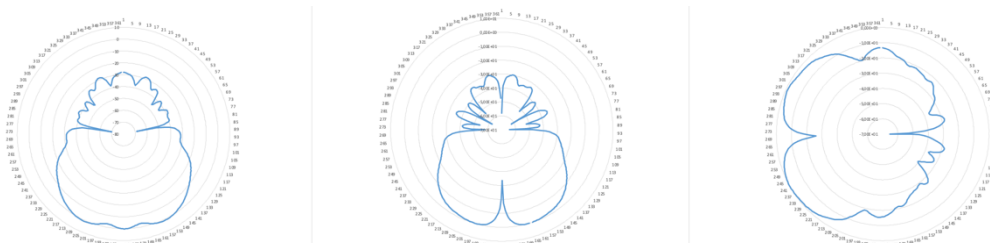


Figura 57. Diagramas (suma, diferencia en azimut y diferencia en elevación)

La función error ayuda a detectar la desviación del objeto respecto del ángulo de apuntamiento con un barrido de $\pm 22.5^\circ$. La combinación de las señales suma y diferencia en la recepción tanto para azimut como para elevación mostrarán la posición exacta del 'target' y en consecuencia, también se podrá identificar si se trata de una desviación a izquierdas o a derechas dependiendo del signo de la relación en diferencia, si el signo es positivo el objetivo se encontrará a la derecha del ángulo de apuntamiento, si es negativo se encontrará a la izquierda del ángulo de apuntamiento.

Lo que se muestra en la Figura [59] es la respuesta que se obtiene a la función de error en cada una de las direcciones de apuntamiento de la antena. Estas funciones indicarán el error que hay respecto del objetivo en cada uno de los sectores de la antena, es decir para las cuatro direcciones de apuntamiento.

El comportamiento en cada uno de los sectores se replica de uno a otro ya que como se ha visto con anterioridad la antena es simétrica y se comportará de la misma manera.

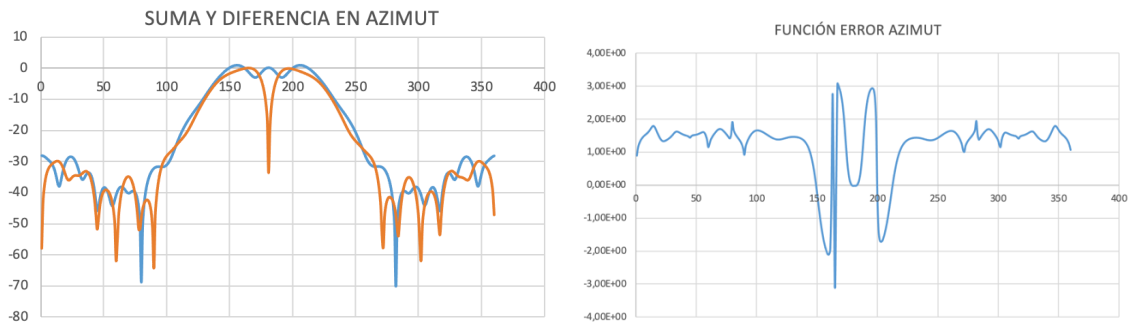


Figura 58. Suma y diferencia en azimut en software CST

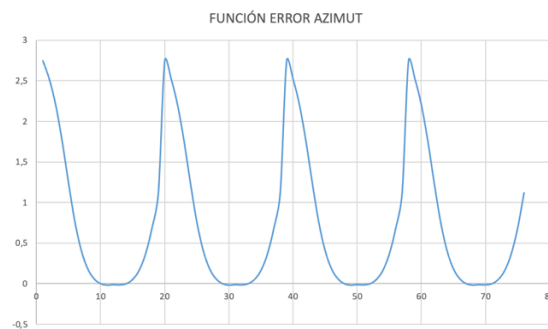


Figura 59. Función error en azimut replicada para los cuatro sectores en CST

La dirección de apuntamiento en este caso es en 180° y se trata de las señales suma y diferencia en azimut, tal y como se puede ver en la Figura [58], como se quiere buscar la función error, es decir, el ángulo de desviación que existe respecto de la dirección donde está apuntando la antena se ha tenido que hacer uso de la Ecuación [1] y el resultado que se obtiene para el error en azimut es el que se muestra en la Figura [59], es decir un error de $\pm 8^\circ$ respecto de la dirección de apuntamiento para cada uno de los cuadrantes, a partir de ahí se empieza a perder precisión en la detección, ya que nos alejamos del haz principal.

Capítulo 7. Validación experimental:

7.1 construcción del prototipo.

7.1.1 Modelo impresión 3D con 1 mm de grosor

Este es el primer modelo que se ha impreso en 3D a modo de maqueta de manera que se pueda ver de forma clara las dimensiones que iba a tener la antena-radar. En este caso este es el diseño preliminar con un grosor de paredes de 1 mm de espesor.

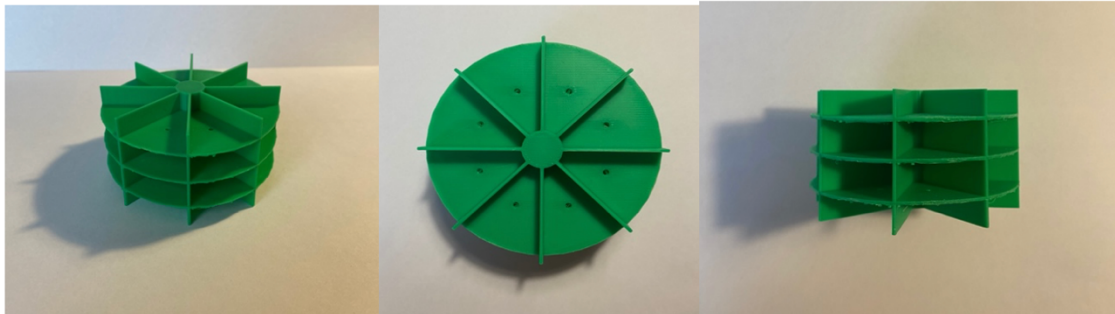


Figura 60. Modelo de la antena-radar a 1mm por impresora 3D

7.2 Modelo impresión 3D con 1.5 mm de grosor

En este segundo modelo de impresión 3D se optó por realizar un diseño idéntico al anterior pero con un espesor de 1.5 mm, esto se debe a que se anticipó que para un modelo final construido en metalizado, se exigía como mínimo un grosor de paredes de al menos 1.2 mm, es por esto que se decidió dejar un pequeño margen de error y aumentar este espesor hasta 1.5 mm.

Se descubrió que con este espesor de 1.5 mm el simulador no arrojaba los mismos resultados que se esperaba que sucediera con el diseño de 1 mm de grosor, estos resultados a 1.5 mm daban diagramas con lóbulos secundarios y empeoraban los resultados que ya se tenían, por lo que se han tenido que hacer los platos de la antena-radar más grandes, se ha pasado de tener un diámetro de 72 mm a tener un diámetro de 90 mm para mitigar estos errores y que los resultados sean similares a los que se tenían con el diseño a 1 mm.

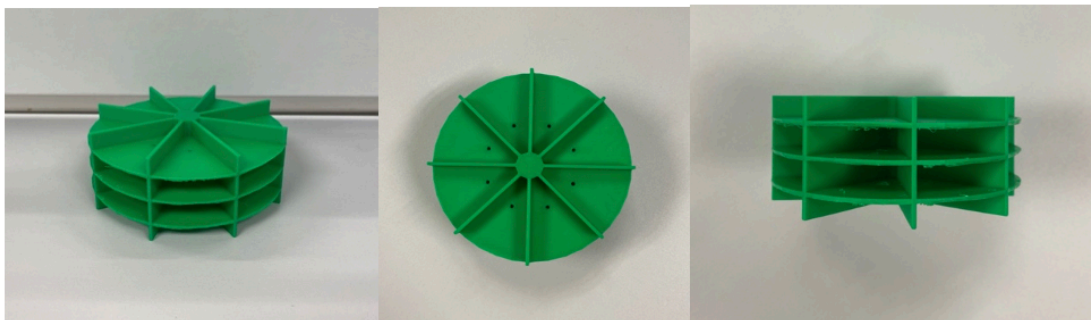


Figura 61. Modelo de impresión 3D a 1.5 mm

7.2.1 Modelo impresión 3D metalizado

Este es el modelo que finalmente se ha construido para la obtención de los resultados, este modelo se ha construido en base al modelo anterior de 1.5 mm de grosor, se ha construido en aluminio y como se puede observar hay una ligera diferencia respecto al modelo anterior, se ha tenido que adaptar el modelo de la antena a la construcción en base a como se va a alimentar, en este caso se va a atornillar, dejando el núcleo de alimentación en la parte central y añadiendo dos agujeros a los laterales para atornillar dicho cable coaxial. El modelo que se manda para construir finalmente es el que se muestra en la siguiente Figura [62] y el modelo ya construido es el que se puede ver en la Figura [63].

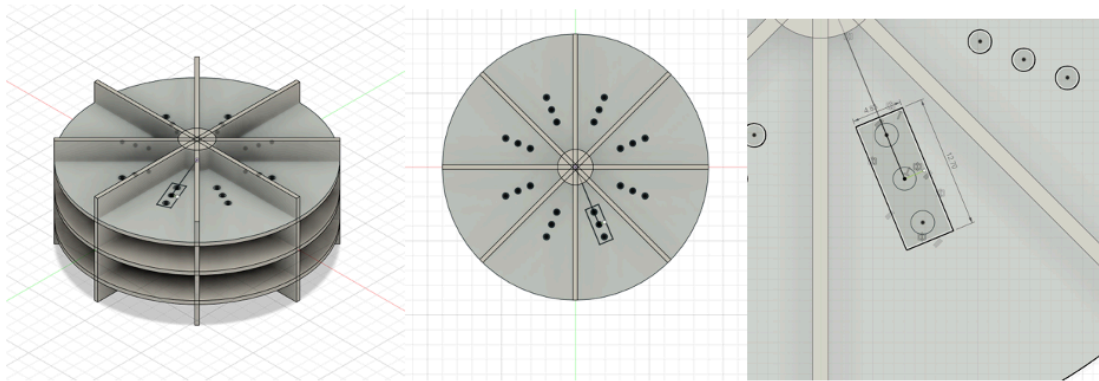


Figura 62. Modelo mandado a construir en impresora metalizada

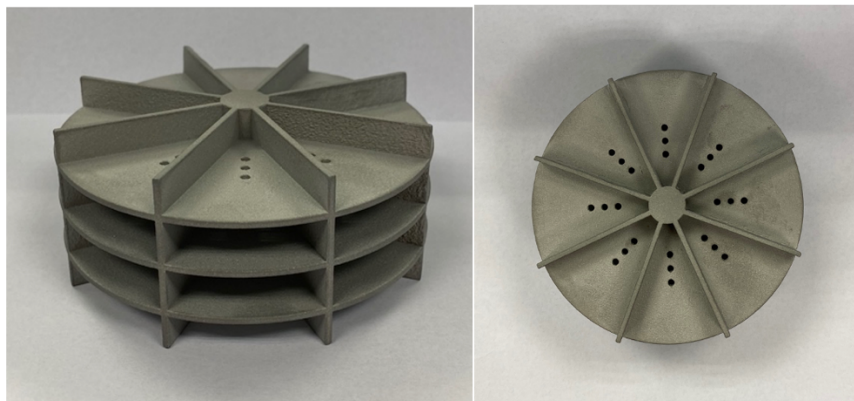


Figura 63. Modelo construido en metalizado

7.2.2 *Modelo del soporte utilizado para la medición en cámara anecoica*

Este es el modelo que se ha utilizado como soporte para la medición en cámara anecoica.

Este soporte permitirá que colocar la antena encajada con los planos sectoriales de manera que sea mucho más sencillo la medición, el plato inferior del soporte es el que va colocado en la pared del dispositivo de medición.

Se puede ver en la figura [65] como se ha colocado la antena finalmente para la obtención de las medidas en la cámara con el soporte que se ha construido.

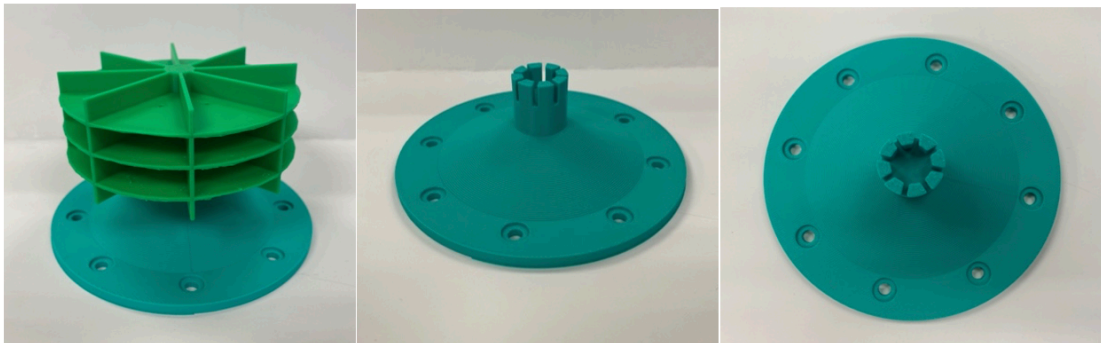


Figura 64. Diseño del soporte construido por impresora 3D

7.3 Caracterización experimental del prototipo

7.3.1 *Proceso de obtención de los resultados en cámara anecoica.*

Una vez se tiene la antena construida en metalizado se procede a la obtención de los resultados. Las medidas correspondientes de la antena se harán en una cámara anecoica.

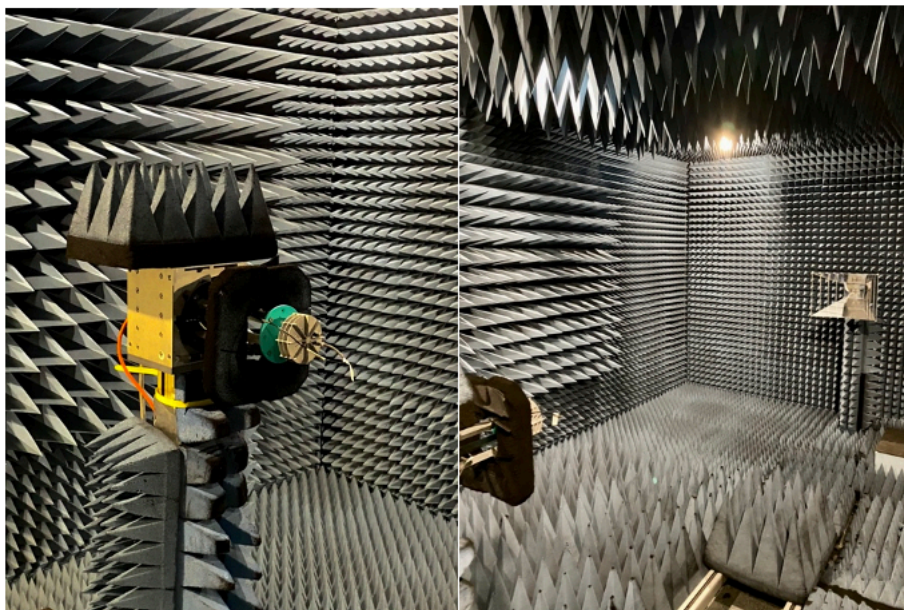


Figura 65. Disposición de la antena en la cámara anecoica

Para la obtención de los resultados se va a medir únicamente un sector de la antena, esto es porque todos los sectores son simétricos entre sí y arrojaran los mismos resultados, es por ello que se ha decidido medir uno de los sectores de 90° , es decir que se miden las cuatro cavidades que se desean.

Se desea medir las mismas señales y parámetros que se han medido con el simulador de ondas electromagnéticas (CST) y de esta manera poder comparar los resultados empíricos con los simulados. Para ello se colocará la antena de tal forma que sea capaz de medir haciendo un barrido de $\pm 90^\circ$ tanto en azimut como en elevación. Se tendrá que extraer las medidas de la señal en transmisión suma así como las señales en recepción de la diferencia.

Además es necesario también la obtención de los parámetros S_{11} y S_{21} con el objetivo de medir de manera experimental la calidad de la señal, el coeficiente de reflexión así como su nivel de acoplamiento de un sector, que es el que se quiere medir, a su sector adyacente.

7.4 Exposición de los resultados obtenidos.

En primer lugar, se midieron los parámetros S_{11} , estos resultados se han realizado en un laboratorio de Investigación de la Universidad Politècnica de València, los parámetros se podían visualizar en el osciloscopio y posteriormente fueron extraídos en un fichero Touchtone, que mediante un Toolbox de RF de Matlab fueron procesados y visualizados posteriormente para obtener las gráficas que más adelante se muestran.

Los parámetros que se querían ver eran tanto el S_{11} (coeficiente de reflexión) que permitirá saber como ya se ha dicho con anterioridad la calidad de la señal así como la cantidad de señal que se refleja. Los requisitos que se tenían para un buen comportamiento de dicho parámetro era que tuviera por lo menos un valor de -10 dB a la frecuencia de trabajo que se desea trabajar.

En este caso la frecuencia a la que se está trabajando es 24 GHz, si se observa con claridad la Figura [66] se puede apreciar en la línea de color azul (parámetro S_{11}) como a la frecuencia de resonancia se obtiene un valor de -10.12 dB, lo que quiere decir que estamos en el límite de un buen comportamiento de cara al funcionamiento óptimo de la antena.

Por otro lado, comentando el parámetro S_{21} (coeficiente de desacoplo) línea roja de la Figura [66], lo que marca es su nivel de acoplamiento de un sector a su sector adyacente, como parte de los requisitos se quería que este parámetro fuese lo suficientemente pequeño para un buen comportamiento, en este caso se tiene un valor de -23.2 dB a la frecuencia de trabajo en la que se trabaja (24 GHz).

Lo que se busca en una antena como esta es un bajo nivel de parámetro S_{21} ya que eso confirmará una baja interferencia entre puertos cercanos.

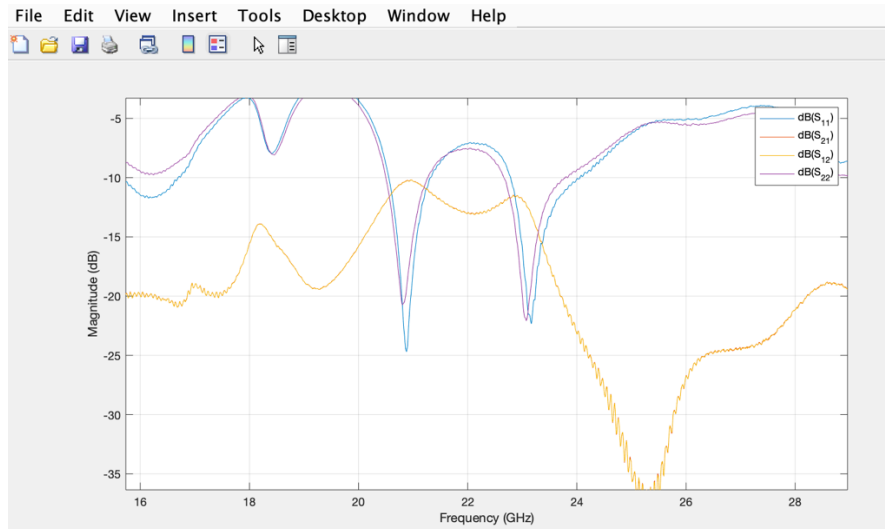


Figura 66. Gráfica de los parámetros S de la antena medida en cámara anecoica

La exposición de los resultados de los diagramas se ha decidido realizarla directamente en el apartado de validación, de esta manera se ve de una manera más clara y visual y se puede ver directamente si los resultados se aproximan o no a las simulaciones ya obtenidas con anterioridad.

7.5 Validación experimental del concepto.

Cabe destacar que el modelo construido en metalizado no es un modelo perfecto, se está comparando un modelo diseñado en software donde las medidas que se añaden se saben que van a ser precisas y que todo va a ser ideal a nivel de construcción, con un modelo construido en metalizado donde tiene ese “factor humano” del error.

Estos pequeños errores o desviaciones son normales cuando se trabaja con proyectos de este tipo, se pueden notar por ejemplo en los grosores de los planos que intersectan los sectores o mismamente en los tres platos (superior, intermedio e inferior) de la propia antena. Estas desviaciones son pequeños errores de medida, como bien se ha dicho anteriormente comentando el modelo final, este tiene un espesor de 1.5 mm de grosor mientras que el mandado a construir cambia ligeramente ya que midiendo se vio que poseía un grosor de alrededor de 1.65 mm, y no todos los planos y platos son de 1.65 mm si no que se mueven por ese margen, algunos un poco más de 1.65 mm y otros algo menos.

A la vista puede parecer insignificante pero a la hora de realizar unas medidas en las que se requiere mucha precisión cada milímetro cuenta.

En primer lugar se va a realizar una comparación en cuanto a los parámetros S, antes de nada hay que decir que los parámetros extraídos del software de CST siempre van a ser mejores que los que pueda arrojar la misma antena a nivel empírico.

En el modelo simulado en CST se tiene un coeficiente de reflexión de -22.5 dB a la frecuencia de trabajo de 24 GHz, teniendo en cuenta un grosor de planos y platos de 1.5 mm en todos ellos, con un pin de 3 mm introduciéndose en la cavidad y con un grosor de entorno a 0.25 mm de radio de pin, es decir cercano a 0.5 mm de diámetro.

Si se compara con el coeficiente de reflexión obtenido en la cámara del laboratorio (Línea azul) Figura [67], se tiene un valor algo peor, del orden de -10.12 dB, pero que aun así sigue estando dentro de los niveles considerados como buen comportamiento (por debajo de -10 dB).

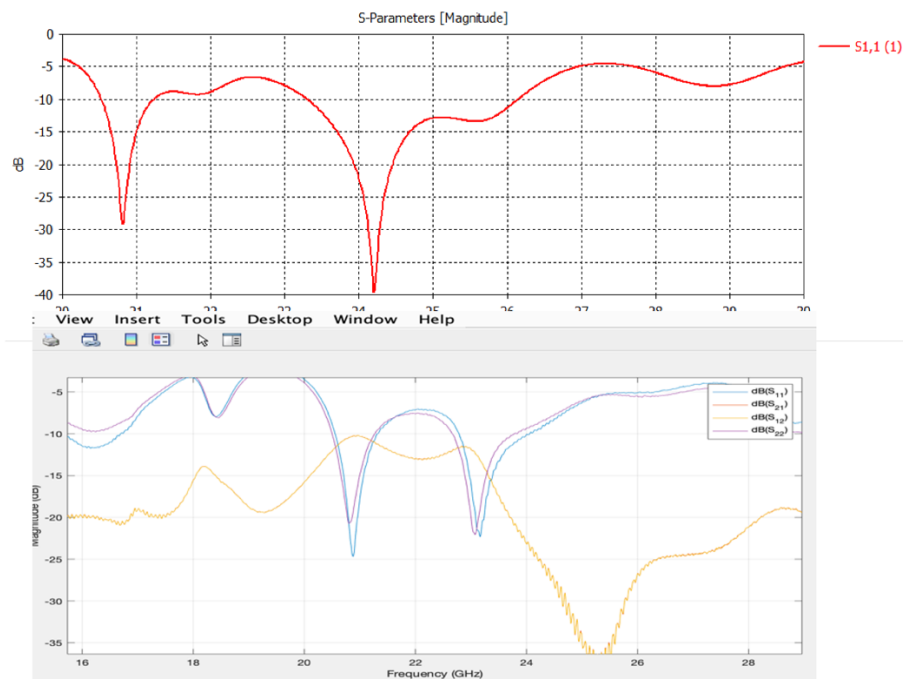


Figura 67. Comparación parámetros S_{11}

Hay varias razones por las que se puede haber obtenido un valor peor, primero de todo se está hablando de que los grosores de los planos y platos son más anchos, por lo tanto, esto afecta a las dimensiones de la propia cavidad con la que se está trabajando, haciéndola más pequeña de lo normal y manteniendo la misma longitud que en el modelo de simulación la frecuencia de resonancia baja, y es justamente lo que se ha experimentado, no es mucho con el baja la frecuencia puesto que la cavidad se ha reducido muy poco en comparación con el modelo diseñado en simulador, pero lo suficiente como para que se vea afectado. El pin utilizado en cámara es un modelo Southwest Microwave 1014-33SF, este pin se ha cortado de manera manual para alcanzar los 3 mm que se deseaban que entraran dentro de la cavidad, el nivel de corte nunca va a ser perfecto, se tendría que ser muy preciso, por eso es otro de los puntos en los cuales el factor humano a podido inducir a los resultados extraídos.

En cuanto a la comparación del parámetro de desacoplo, Figura [68], en el modelo en simulación se tenía un valor cercano a -68 dB lo cual se traducía en un muy buen nivel para la cantidad de señal que se refleja de un sector a su adyacente, cuanto más bajo era ese nivel menor eran las interferencias entre sectores.

En el modelo medido en cámara se tiene -23.2 dB ambos son valores que se encuentran dentro de los requisitos del buen funcionamiento de la antena, y como ya se ha comentado con anterioridad, que el modelo no sea perfecto en cuanto a diseño y que la altura de los pines, a pesar de intentar haber sido lo más precisos posibles y que siempre hay lugar a pequeñas desviaciones, ha podido afectar a los resultados que se han comparado sobre los parámetros S.

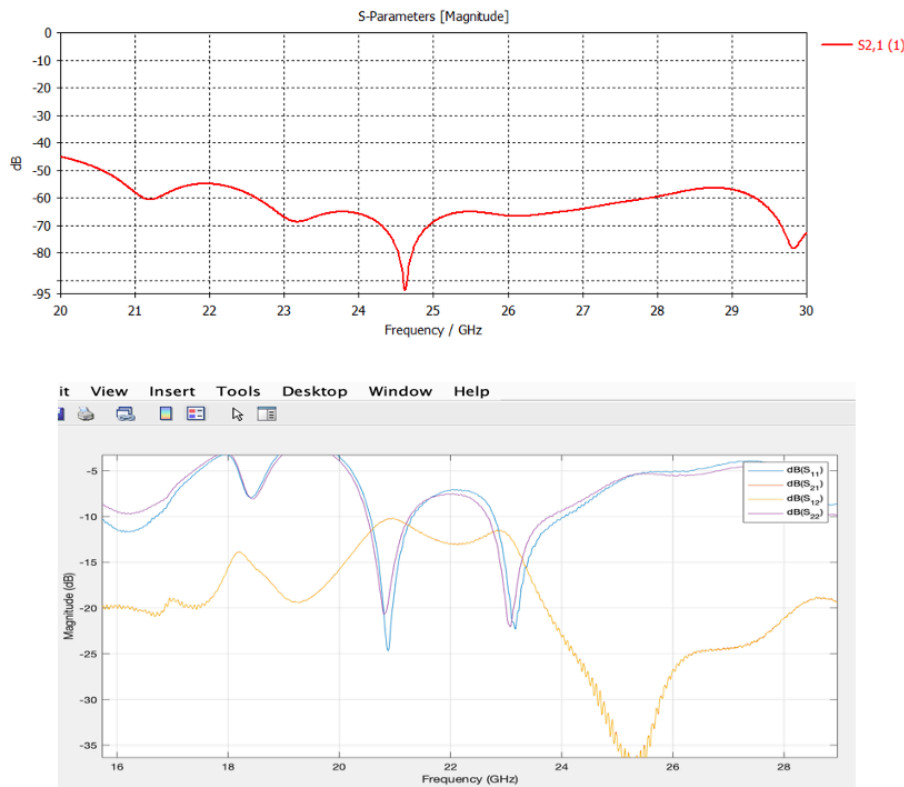


Figura 68. Comparación parámetros S₂₁

Para las mediciones de los diagramas de radiación, se ha buscado medir uno de los sectores de la antena, alimentando cuatro puertos de tal manera que se haya podido obtener los diagramas suma y diferencia en azimut y elevación tal y como se van a exponer a continuación.

La exposición de los resultados sobre los diagramas de radiación, se han realizado siguiendo los cortes que se indicaban anteriormente, los resultados han sido obtenidos mediante la estructura de un número complejo, teniendo una parte real y una parte imaginaria para cada uno de los puertos simulados por separado.

Es decir, con todo esto se tenía para el puerto 1, una componente real e imaginaria tanto para azimut como para elevación, lo mismo para el puerto 2 y así hasta completar las cuatro cavidades que se buscan.

Después de procesar los datos que se extrajeron de la cámara se tienen los siguientes diagramas para el sector de los cuatro puertos simulados en cámara.

Respecto a la comparación de los diagramas de radiación se ha querido presentar en primer lugar el diagrama suma obtenido mediante las simulaciones del software de CST (línea naranja) y los resultados obtenidos mediante la simulación en cámara anecoica con la antena metalizada (línea gris) Figura [69]. Como se puede observar, las señales presentan una similitud muy buena, ambas señales presentan un ancho de haz similar, en torno a 75°, presentan un lóbulo principal prácticamente idéntico, se tiene un NLPS de -33 dB en cámara frente a los -36 dB que se tenían en simulación, ambos valores dentro del objetivo marcado de que sea menor que -15 dB. Las direcciones adicionales a la directividad máxima no son tan significativas, lo que permite un mejor comportamiento en la dirección de apuntamiento.

El tener un buen nivel de NLPS ayuda a no tener falsas detecciones.

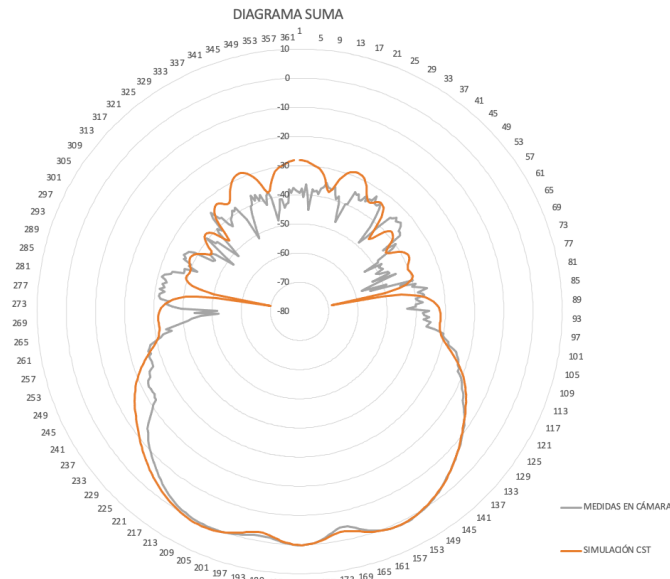


Figura 69. Comparación de los diagramas suma (CST vs Cámara)

En segundo lugar se ha querido ver las similitudes entre el comportamiento de la señal diferencia en azimut obtenida en simulación y la extraída de los resultados hallados en cámara anecoica, Figura [70]. Tal y como se ha dicho anteriormente para la señal del diagrama suma, aquí también se puede apreciar un parecido entre ambas señales diferencia, lo que es un buen indicativo de su buen comportamiento.

Lo que más nos importa ver entre estas dos señales es la profundidad del nulo que se tiene, se recuerda que para la señal diferencia en azimut obtenida en simulación se obtuvo un valor de -33 dB frente a un valor de -18 dB obtenidos para el resultado medido en cámara, el requisito que se tiene para que se tenga una buena sensibilidad en la función monopoluso es de 20 dB de diferencia, por lo que se podría decir que el comportamiento de la antena metalizada tiene una sensibilidad algo peor para la detección de objetos en recepción para la señal diferencia en azimut.

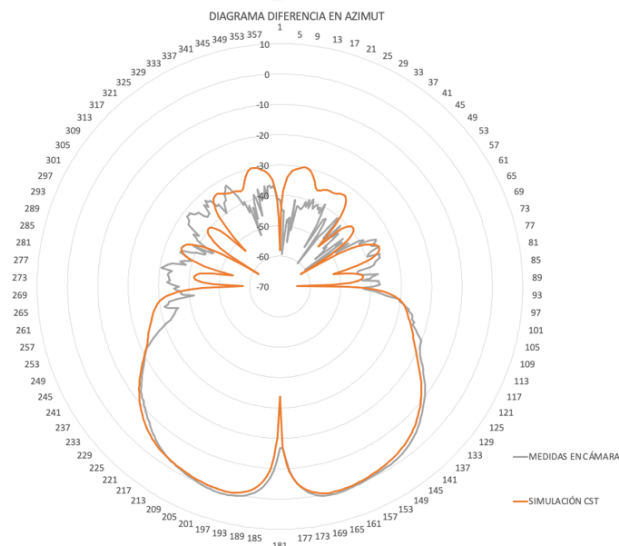


Figura 70. Comparación de los diagramas diferencia en azimut (CST vs Cámara)

Por último, comparando las señales diferencia en elevación, Figura [71], se ve claramente unos resultados muy similares, tanto a nivel de diagrama como a nivel de profundidad del nulo en el que se tiene un valor de -25 dB de diferencia en la señal en cámara y un valor de

-26 dB de diferencia en la señal en simulación. Ambos valores son óptimos y cumplen con los requisitos expuestos con anterioridad, por lo que la sensibilidad a la hora de detectar es lo suficientemente buena.

Comentando los valores de nivel de lóbulo principal a secundario se tiene un valor de aproximadamente -20 dB de diferencia en ambas señales, se recuerda que un valor adecuado para la correcta detección de blancos sería un NLPS de al menos -15 dB, ya que esto ayudaría a que no se detectaran blancos que no interesan. Si la diferencia es entre lóbulos es muy pequeña es porque esos lóbulos secundarios pueden inducir a direcciones adicionales, y eso no interesa en este caso.

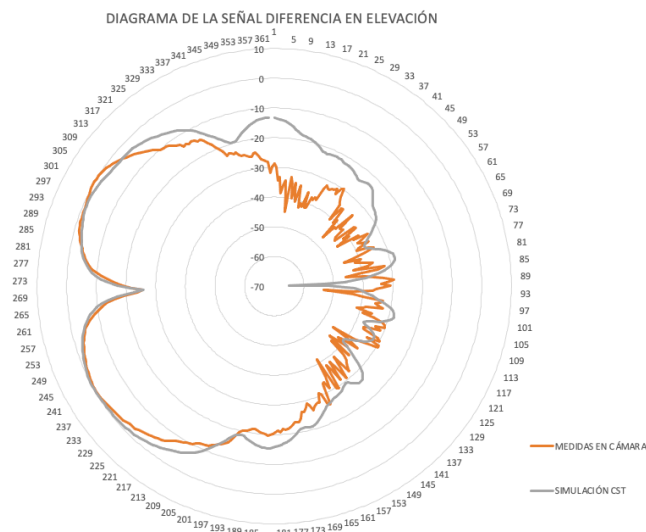


Figura 71. Comparación de los diagramas diferencia en azimut (CST vs Cámara)

Hablando de las funciones error, en este caso, con las medidas obtenidas en la cámara anecoica también se ha realizado las función error, que indican, respecto de la dirección de apuntamiento de la antena, el ángulo error o desviación que hay respecto del objeto que se desea detectar en un barrido de $\pm 22.5^\circ$.

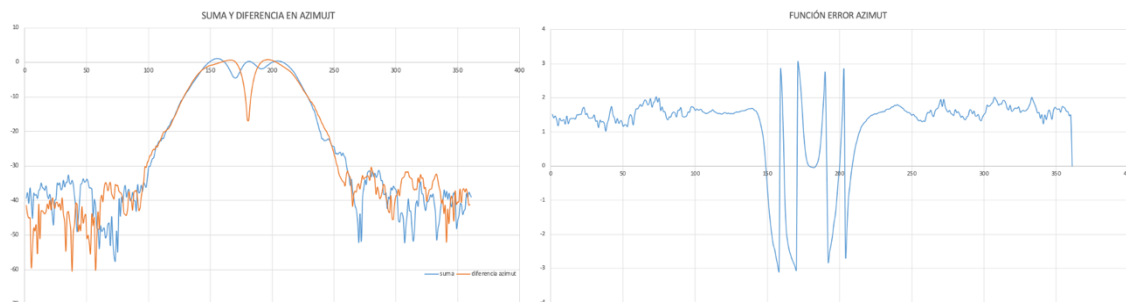


Figura 72. Suma y diferencia en azimut en cámara

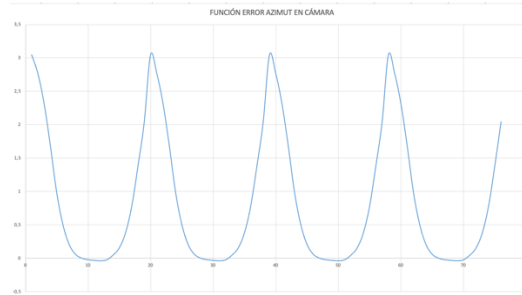


Figura 73. Función error en azimut replicada para los cuatro sectores

En primer lugar, la dirección de apuntamiento en este caso es 180° y se trata de las señales suma y diferencia en azimut, pero en este caso son las medidas obtenidas con la antena real en la cámara anecoica, tal y como se puede ver en la Figura [72], como se quiere buscar al igual que de manera simulada, la función error, es decir, el ángulo de desviación que existe respecto de la dirección donde está apuntando la antena se ha tenido que hacer uso de la Ecuación [1] y el resultado que se obtiene para el error en azimut es el que se muestra en la Figura [73], es decir un error de $\pm 9^\circ$ respecto de la dirección de apuntamiento para cada uno de los cuadrantes, a partir de ahí se empieza a perder precisión en la detección, ya que nos alejamos del haz principal.

Finalmente, tras una comparación entre el modelo de antena-radar en simulación con el software CST y el modelo construido en metalizado y posteriormente también medido se han llegado a unas conclusiones que a continuación se presentan.

En base a los resultados presentados, se puede concluir que el diseño de la antena-radar para el sistema 'Detect and Avoid' es adecuado y cumple con los requisitos de diseño definidos.

En primer lugar, cubre el rango esperado en azimut de 360 grados con el conjunto de los 16 puertos. En segundo lugar, se tiene un buen nivel de señal a la frecuencia a la que se trabaja (24 GHz) y se ha obtenido una ganancia con un valor cercano al objetivo, la sensibilidad es lo suficientemente buena para la detección, así como su NLPS favoreciendo así que no haya falsas detecciones debido a los lóbulos secundarios. Se tiene una eficiencia de radiación cercana a uno, lo cual indica un buen rendimiento, que junto con la directividad y la ganancia proporcionan una eficiencia muy buena para una antena de estas características. Por último, los diagramas monopulso obtenidos en cada una de las 16 direcciones de apuntamiento posibles dan lugar a funciones de error (tanto en el plano horizontal como vertical) que permiten determinar la posición del blanco con una exactitud razonable.

Capítulo 8. Diseminación y explotación de los resultados.

Diseminación: publicación de los resultados en la URSI.

En la Figura [74] se pueden observar los resultados de las tres revisiones individuales para la contribución presentada para URSI 2023 en el que se habla sobre “*Diseño y validación de antenas en bandas milimétricas para sistemas de detección y evitación (DAA) de aeronaves no tripuladas*”

Resultado de la revisión.

Datos de la contribución

Grupo de trabajo/Tipo de contribución: Contribución URSI 2023

Diseño y validación de antenas en bandas milimétricas para sistemas de detección y evitación (DAA) de aeronaves no tripuladas

184

Ruiz, Javier [1]; Chuquitarco Jiménez, Carlos Alexander [2]; Ferrando Bataller, Miguel [3]; Balbastre Tejedor, Juan Vicente [4]
Organización: Universitat Politècnica de València, España

Enviado por: Javier Ruiz (Universitat Politècnica de València, ES), ID: 1102

Ponente: Ruiz, Javier jaruia1@teleco.upv.es

Temas: Radar

Palabras clave: Antena, Radar, Validación, Simulación, CST

4 páginas

© Impreso de copyright firmado por Javier Ruiz el 22/06/2023

Resultados de la revisión efectuada por el Comité Científico

Su contribución ha sido aceptada

Figura 74. Resultado de la revisión de la publicación en la URSI

Explotación: patente una vez escalado el modelo, (debido a que se ha realizado un breve estudio de mercado ya que se observa que a 24 GHz es una frecuencia que para un VCO es difícil de encontrar, es por eso que se baja a una frecuencia de 9.5 GHz, 1por mayor variedad de componentes ya que no están a tan alta frecuencia) e integración con el sistema radar (por resolver la forma de alimentación; secuencial o simultánea).

Por otro lado, como líneas futuras de trabajo, sería implementar la antena a un sistema radar que trabaje a 9.5 GHz, el cual se ha diseñado con el objetivo de detectar una aeronave a una distancia de 1500 m. Este diseño lo ha realizado mi compañero Christian Alexander Jacho Yugcha, con el objetivo de conseguir en un futuro la conexión entre su sistema radar y la antena que se ha diseñado en este proyecto. Además, otro de los puntos a futuro que queda sería la puesta en marcha de la antena embarcada realizando una prueba de vuelo real, viendo de esta manera el funcionamiento que puede tener la antena-radar en un escenario real.

Capítulo 9. Bibliografía

[1]	https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Monopulse%20Antenna.en.html , página web sobre una antena monopulso
[2]	https://www.youtube.com/watch?v=QYj9MP4QGec , monopulse tracking radar
[3]	NewSense, “3D vector antenna preliminary assessment”, 2021
[4]	“Reconfigurable Grounded Vector Antenna for 3D Electromagnetic Direction-Finding Applications” Johan Duploux, Christophe Morlaas, Hervé Aubert, Patrick Potier, Philippe Pouliguen and Christopher Djoma
[5]	Radar Handbook, Merrill Skolnik, introduction to radar systems
[6]	Pagés Álvarez, Juan Carlos (2017). <i>Diseño y análisis de una antena monopulso en banda W</i>
[7]	https://hmong.es/wiki/Monopulse_radar
[8]	Àngel Sánchez Navarro “ <i>Desarrollo de un concepto de radar para su integración en sistemas de Detect and Avoid de aeronaves no tripuladas</i> ”
[9]	Patricia López Moreno “ <i>Diseño y simulación de funciones monopulso en un radar ubicuo de vigilancia</i> ”
[10]	[EASA Concept Paper Certified category operations of UAS, certification of UAS and UAM operations November 2019 - Issue 3].
[11]	[Concept of Use for the Airborne Collision Avoidance System Xu for Smaller UAS (ACAS sXu), FAA, 2020]

Tabla 10. Bibliografía del TFG