



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Antena para plataformas de gran altitud basada en guías
de onda con simetrías de orden superior en la banda de
milimétricas

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación

AUTOR/A: Chavero García, Jorge

Tutor/a: Ferrando Rocher, Miguel

Cotutor/a: Herranz Herruzo, José Ignacio

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Resumen

El campo de las telecomunicaciones es un mundo en constante evolución y mejora, impulsado por la necesidad de integrar nuevas tecnologías. Desde la invención de la primera antena hasta la incorporación de la inteligencia artificial, el sector ha experimentado numerosas innovaciones. Este trabajo analiza en profundidad las plataformas de alta altitud, destacando sus ventajas y aplicaciones. Además, se examina el concepto de simetría, tanto de primer orden como superiores, y sus diferentes aplicaciones en el sector de las telecomunicaciones.

Partiendo de este marco teórico, se implementa y optimiza una antena inicial metálica sin huecos de aire entre las placas a la que se le añade unos agujeros mediante el uso de una de las mencionadas simetrías, concretamente con la simetría *glide*. Se incrementa después el *gap* entre las placas para ver el correcto funcionamiento de estos agujeros. Esta antena se ha desarrollado para que funcione correctamente en la banda Ka, concretamente entre 29 y 31 GHz. Tras su diseño se expone cómo es posible su aplicación e integración en los novedosos pseudo-satélites. Gracias a su diseño innovador, el uso de energía eficiente y la mejora de las infraestructuras de telecomunicaciones, esta antena ayuda al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Resum

El camp de les telecomunicacions és un món en constant evolució i millora, impulsat per la necessitat d'integrar noves tecnologies. Des de la invenció de la primera antena fins a la incorporació de la intel·ligència artificial, el sector ha experimentat nombroses innovacions. Este treball analitza en profunditat les plataformes d'alta altitud, destacant els seus avantatges i aplicacions. A més, s'examina el concepte de simetria, tant de primer orde com superiors, i les seues diferents aplicacions en el sector de les telecomunicacions.

Partint d'este marc teòric, s'implementa i optimitza una antena inicial metàl·lica sense buits d'aire entre les plaques a la qual se li afig uns forats mitjançant l'ús d'una de les esmentades simetries, concretament amb la simetria *glide*. S'incrementa després el *gap* entre les plaques per a veure el correcte funcionament d'estos forats. Esta antena s'ha desenvolupat perquè funcione correctament en la banda Ka, concretament entre 29 i 31 GHz. Després del seu disseny s'exposa com és possible la seua aplicació i integració en els nous pseudo-satèl·lits. Gràcies al seu disseny innovador, l'ús d'energia eficient i la millora de les infraestructures de telecomunicacions, esta antena ajuda al compliment dels Objectius de Desenvolupament Sostenible de l'Agenda 2030.

Abstract

The field of telecommunications is a constantly evolving and improving world, driven by the need to integrate new technologies. From the invention of the first antenna to the incorporation of artificial intelligence, the sector has experienced numerous innovations. This paper takes an in-depth look at high-altitude platforms, highlighting their advantages

and applications. In addition, the concept of symmetry, both first-order and higher-order, and its different applications in the telecommunications sector are examined.

Starting from this theoretical framework, an initial metallic antenna without air gaps between the plates is implemented and optimised by adding holes using one of the aforementioned symmetries, namely the *glide* symmetry. The *gap* between the plates is then increased to see the correct functioning of these holes. This antenna has been developed to operate correctly in the Ka-band, specifically between 29 and 31 GHz. After its design, it is shown how it can be applied and integrated into the novel pseudo-satellites. Thanks to its innovative design, efficient energy use and improved telecommunications infrastructure, this antenna helps to meet the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda.

RESUMEN EJECUTIVO

La memoria del TFG del GTIST debe desarrollar en el texto los siguientes conceptos, debidamente justificados y discutidos, centrados en el ámbito de la IT

CONCEPT (ABET)	CONCEPTO (traducción)	¿Cumple? (S/N)	¿Dónde? (páginas)
1. IDENTIFY:	1. IDENTIFICAR:		
1.1. Problem statement and opportunity	1.1. Planteamiento del problema y oportunidad		1-3
1.2. Constraints (standards, codes, needs, requirements & specifications)	1.2. Toma en consideración de los condicionantes (normas técnicas y regulación, necesidades, requisitos y especificaciones)		3-4
1.3. Setting of goals	1.3. Establecimiento de objetivos		5-5
2. FORMULATE:	2. FORMULAR:		
2.1. Creative solution generation (analysis)	2.1. Generación de soluciones creativas (análisis)		38-43
2.2. Evaluation of multiple solutions and decision-making (synthesis)	2.2. Evaluación de múltiples soluciones y toma de decisiones (síntesis)		21-29
3. SOLVE:	3. RESOLVER:		
3.1. Fulfilment of goals	3.1. Evaluación del cumplimiento de objetivos		44-44
3.2. Overall impact and significance (contributions and practical recommendations)	3.2. Evaluación del impacto global y alcance (contribuciones y recomendaciones prácticas)		45, 52

En primer lugar, a mi abuelo Juan, mi inspiración para estudiar esta carrera. Sigue cuidándonos desde arriba. En segundo lugar a mis padres, por estar siempre ahí brindándome su apoyo incondicional durante toda la carrera. Además, gracias a mis hermanos y también a mis amigos que siempre han estado a mi lado, tanto en los buenos como los malos momentos y han conseguido que sacaré lo mejor de mí. Por último a Miguel y José Ignacio, mis tutores, que me brindaron su confianza y su apoyo desde el primer momento, y me han estado guiando y enseñando en esta etapa. GTD.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Estado del arte	1
1.2. Objetivos	5
1.3. Metodología	5
2. Plataformas de alta altitud	7
2.1. Introducción	7
2.2. Usos actuales de los sistemas <i>HAPS</i>	8
2.3. Comparación con otros sistemas	9
2.4. Actualidad	11
2.5. Expectativas de futuro	15
3. Simetrías de Orden Superior	16
3.1. Introducción	16
3.2. Concepto de las simetrías de orden superior	17
3.2.1. <i>Glide Symmetry</i>	18
3.2.2. <i>Twist Symmetry</i>	18
3.3. Aplicaciones en dispositivos en la banda de milimétricas	19
3.4. Implementación real en el trabajo. Estudio paramétrico	21
4. Diseño de la antena con tecnología <i>glide</i>	31
4.1. Diseño y optimización del prototipo inicial	31
4.1.1. Capa de alimentación	32
4.1.2. Capa de acoplo	34
4.1.3. Capa radiante	34
4.2. Diseño y optimización de la antena con simetría <i>glide</i>	38
4.3. Aplicación en sistemas <i>HAPS</i>	43
5. Conclusiones y líneas futuras	44
Bibliografía	46
I Anexo	

Índice de figuras

1.1. Tipos de antenas según su diagrama de radiación [3].	1
1.2. Servicios de un <i>Ekocenter</i> [12].	4
2.1. Arquitectura y despliegue de una red con <i>HAPS</i> [15].	8
2.2. <i>Stratobus</i> [23].	11
2.3. <i>Zephyr-S</i> [24].	12
2.4. D'ICARO de smartHAPS [25].	13
2.5. Propuesta de diseño del <i>Stratoport</i> [28].	13
2.6. Dirigible de la compañía <i>SCEYE</i> [31].	14
2.7. Hangar del dirigible de <i>SCEYE</i> [31].	14
2.8. Visión de futuro de posible implementación de las <i>HAPS</i> [33].	15
3.1. Ejemplo de uso de la simetría <i>glide</i> en la arquitectura [38].	16
3.2. Imágenes de las simetrías fundamentales [39].	17
3.3. Simetría <i>glide</i>	18
3.4. Simetría <i>twist</i>	19
3.5. Uso de la simetría <i>glide</i> en guiado de ondas con pines [55].	20
3.6. Implementación en un filtro de agujeros con simetría <i>glide</i> en el eje X [57].	20
3.7. Agujeros de la simetría <i>glide</i>	21
3.8. Boceto de estructura periódica con agujeros y simetría <i>glide</i>	21
3.9. Dimensión altura del agujero.	22
3.10. Variación del <i>bandgap</i> con la altura (mm).	23
3.11. Dimensión radio del agujero.	23
3.12. Variación del <i>bandgap</i> con el radio (mm).	24
3.13. Dimensión período del agujero.	25
3.14. Variación del <i>bandgap</i> con el período (mm).	25
3.15. Dimensión <i>gap</i> de aire entre las placas.	26
3.16. Variación del <i>bandgap</i> con el <i>gap</i> de aire.	27
3.17. Guía de onda convencional.	28
3.18. Guía de onda convencional sin <i>gap</i> de aire	28
3.19. Guía de onda convencional con <i>gap</i> de aire	29
3.20. Guía de onda con simetría <i>glide</i> y <i>gap</i> de aire	30
4.1. Estructura del prototipo.	32
4.2. Capa de alimentación del prototipo.	32
4.3. Dimensiones de la guía de onda WR-28.[65]	32
4.4. Condiciones de contorno del divisor de la capa de alimentación.	33
4.5. Parámetros S del divisor de la capa de alimentación.	33

4.6.	Distribución del campo eléctrico en el divisor 1 a 4	33
4.7.	Capa de acoplo del prototipo	34
4.8.	Distribución del campo eléctrico en la capa de acoplo.	34
4.9.	Capa radiante del prototipo	35
4.10.	Distribución del campo eléctrico en la capa de radiante.	35
4.11.	Parámetro S_{11} del prototipo	35
4.12.	Diagrama de radiación	36
4.13.	Vista de perfil del diagrama de radiación	36
4.14.	Directividad de la antena a diferentes frecuencias.	36
4.15.	Campo eléctrico del prototipo. Vista de perfil.	37
4.16.	Dimensiones x e y de las cavidades de la capa de acoplo.	38
4.17.	Vista superior de la capa de alimentación de la antena diseñada.	39
4.18.	Vista inferior de la capa de acoplo de la antena diseñada.	40
4.19.	Vista de la disposición de los agujeros entrelazados.	40
4.20.	Parámetro S_{11} de la antena.	41
4.21.	Distribución del campo eléctrico en la capa de alimentación.	42
4.22.	Distribución del campo eléctrico en la capa radiante.	42
4.23.	Distribución del campo eléctrico en la capa de acoplo.	42
4.24.	Distribución del campo eléctrico en la antena.	42
5.1.	Diseño de pines mediante agujeros y simetría <i>glide</i>	45
1.	Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU [70].	52

Índice de Tablas

1.1. Distribución de frecuencias, nomenclatura y aplicaciones. Elaborado a partir de [4] y [5].	2
1.2. Subdivisión de las diferentes bandas de frecuencias [5].	2
2.1. Tabla comparativa sistemas terrestres, <i>HAPS</i> y satélites. Elaborada a partir de [19] y [20].	10
3.1. Simetrías fundamentales. Elaboración propia a partir de [39] y [40].	17
3.2. Parámetros iniciales. Elaboración propia a partir de datos obtenidos en [60]	21
3.3. Resumen del estudio paramétrico de la altura del agujero	22
3.4. Resumen del estudio paramétrico del radio del agujero	24
3.5. Resumen del estudio paramétrico del período	25
3.6. Resumen del estudio paramétrico del <i>gap</i> de aire	26
4.1. Tabla síntesis de los parámetros de la optimización.	37
4.2. Resumen de los valores de los parámetros en la configuración de los agujeros	39
4.3. Resumen comparativo de los parámetros de las antenas a 30 GHz.	43

Capítulo 1

Introducción

1.1. Estado del arte

El creciente desarrollo tecnológico y la llegada cada día de mejoras en la digitalización hacen que actualmente las necesidades de los usuarios en relación con las telecomunicaciones sean cada vez mayores. Es por eso que es necesario llevar a cabo un proceso de innovación y mejora continua.

Las antenas desempeñan un papel esencial en el mundo de las telecomunicaciones, siendo claves en la transmisión y recepción de señales. Desde su invención, por Aleksandr Stepánovich en el siglo XIX [1], han experimentado un cambio constante y han supuesto grandes avances en muchos sectores, como el aeroespacial, la navegación o la radiodifusión.

Se pueden dar diferentes definiciones de lo que es una antena, pero el IEEE en [2] explica que una antena es un dispositivo recíproco lineal pasivo. Es la parte de un sistema transmisor o receptor diseñada para radiar o recibir ondas electromagnéticas.

Por un lado, las antenas se pueden clasificar según varios conceptos.

En primer lugar, según su diagrama de radiación, se encuentran tres formas de clasificarlas. El diagrama de radiación de cualquier antena determina su área de cobertura en espacio libre y puede ser isótropica, omnidireccional o directiva. En la Fig. 1.1 se puede ver cómo es el diagrama de radiación de cada una.



Figura 1.1: Tipos de antenas según su diagrama de radiación [3].

Una antena isotrópica se define como aquella que radia de manera uniforme en todas las direcciones. Es una antena hipotética y que sirve para comparar con el resto de antenas

reales. Por otro lado, las antenas omnidireccionales son aquellas que radian con la misma intensidad en un plano, las más comunes son los monopolos. Por último, las directivas son aquellas que centran su radiación en una dirección particular y suelen tener alta ganancia y directividad, lo que ayuda a que puedan cubrir grandes distancias. Como por ejemplo las antenas Yagi o los paraboloides [4].

En segundo lugar, según la frecuencia. En la Tabla 1.1, se puede ver como se distribuye el espectro según las recomendación de la ITU [5], los rangos de frecuencias asignados y algunas aplicaciones típicas de cada banda.

Número de la banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias	Aplicaciones típicas
3	ULF	300 - 3.000 Hz	
4	VLF	3 - 30 kHz	SONAR
5	LF	30 - 300 kHz	Ayuda a la navegación
6	MF	300 - 3.000 kHz	AM, radio marítima
7	HF	3 - 30 MHz	Comunicaciones barco-avión
8	VHF	30 - 300 MHz	TV, FM, policía
9	UHF	300 - 3.000 MHz	TV, Radar, Comunicaciones por satélite
10	SHF	3 - 30 GHz	Enlaces de microondas
11	EHF	30 - 300 GHz	MVDS, sistemas de aterrizaje

Tabla 1.1: Distribución de frecuencias, nomenclatura y aplicaciones. Elaborado a partir de [4] y [5].

Pero además la ITU, establece una subdivisión de la banda de frecuencias, que se puede ver reflejada en la Tabla 1.2 y es la que comúnmente se emplea en el campo del radar y de las comunicaciones espaciales. En este trabajo se emplea la banda Ka.

Símbolo	Rango de frecuencias (GHz)
L	1-2
S	2-4
C	4-8
X	8-12
Ku	12-18
K	18-27
Ka	27-40

Tabla 1.2: Subdivisión de las diferentes bandas de frecuencias [5].

En tercer lugar se puede establecer otra clasificación en base su polarización, que es la orientación del campo eléctrico de una onda electromagnética [6]. Puede ser lineal (horizontal o vertical), circular (levógira o dextrógira) y elíptica (levógira o dextrógira).

Por último, los tipos más comunes de antenas son los monopolos, dipolos, de parche, parabólica, de ranura y Yagi. Las tipo monopolo, trabajan con un solo conductor en forma recta, con radiación omnidireccional, y es usada por ejemplo en AM. Los dipolos, son las antenas más utilizadas a día de hoy, y como su nombre indica está formada por dos conductores de disposición variable, pueden ser cortos, plegados, en forma de V o V invertida. Las de parche son antenas planares, y son las usadas en los teléfonos móviles. Por otro lado, las de ranura se comportan como un dipolo en negativo. Y por último las Yagi, que son antenas direccionales usadas mayoritariamente en TV [7]. Dentro de esta gama de antenas, las más comunes para las comunicaciones vía satélite son los reflectores parabólicos, las de ranura y las de parche.

Por otro lado, sus parámetros más relevantes de una antena son: diagrama de radiación, eficiencia, directividad, ganancia y polarización. Estos parámetros son clave en el momento de la elección y diseño de la antena y vitales en la transmisión, ya que es necesario establecerlos bien para que los enlaces funcionen de manera correcta y puedan ser satisfechas las demandas de los usuarios. Es también clave en este trabajo su estudio para comprobar el correcto funcionamiento de la antena. Tanto el diagrama de radiación así como la polarización ya han sido explicados anteriormente, por lo que se explican ahora el resto de parámetros.

- **Directividad (D):** La directividad se define como la relación entre la densidad de potencia en una dirección dada desde la antena y la densidad de potencia promediada en todas las direcciones [8]. Y su cálculo teórico es el siguiente:

$$D = \frac{S_{\text{rad}}(\theta, \phi)}{\frac{P_{\text{rad}}}{4\pi r^2}} = \frac{A \cdot 4\pi}{\lambda^2} \quad (1.1)$$

Siendo A el área de la antena y λ la longitud de onda de operación de la misma. Debido a su definición como relación de densidad de potencias, la directividad es adimensional.

- **Ganancia (G):** La ganancia por su parte, es un parámetro que mide la direccionalidad de una antena determinada. Se calcula como, la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección a cierta distancia r y la potencia entregada a la antena dividida por el área de una esfera de radio r [9]. Se puede expresar esto de la siguiente manera:

$$G(\theta, \phi) = \frac{S_{\text{rad}}(\theta, \phi)}{\frac{P_{\text{ent}}}{4\pi r^2}} \quad (1.2)$$

Además la directividad y la ganancia se relacionan a través de la eficiencia η de la siguiente manera:

$$G = \eta \cdot D \quad (1.3)$$

- **Eficiencia (η):** La eficiencia es la proporción de potencia radiada respecto a la potencia total de entrada suministrada a la antena [4]. La eficiencia de una antena está compuesta por el producto de diferentes eficiencias como por ejemplo la eficiencia de pérdidas o de radiación. La fórmula del cálculo teórico es:

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{ent}}} \quad (1.4)$$

Las comunicaciones espaciales han sufrido grandes cambios desde los inicios de la carrera espacial. Desde el lanzamiento del Telstar 1 hasta la nueva tecnología de StarLink, los satélites han evolucionado, no solo de aspecto físico, sino también de la manera de comunicarse con ellos, el tamaño de las antenas o las distancias a la que pueden viajar.

Actualmente se está trabajando en maneras de optimizar estos satélites ya que presentan serios problemas si tienen que ser reparados o su lanzamiento es extremadamente caro. En esta línea es dónde surgen los sistemas *HAPS*, que serán explicados con mayor detalle en el Capítulo II. Se están posicionando como gran apoyo en las comunicaciones debido a que su baja altitud y su facilidad de lanzamiento en comparación con los satélites convencionales hacen de estas plataformas una gran alternativa. Además contribuyen en gran medida al cumplimiento de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, como se puede ver en el Anexo I.

Estos sistemas, aún en desarrollo han comenzado a probarse de muchas maneras, por ejemplo en la ciudad de Valencia ya se han utilizado para la vigilancia aérea [10]. Además estos sistemas pueden usarse para mejorar cantidad de proyectos. Uno de los ejemplos más claros es el de los *Ekocenter* de Coca-Cola [11]. Proyecto que junto con grandes empresas como IBM o Qualcomm Technologies, se está llevando a cabo para mejorar el bienestar de varios países subdesarrollados. Este proyecto consiste en desarrollar quioscos que contengan algunos servicios básicos, como agua potable, energía sostenible o almacenamiento de vacunas, además de también poder ofrecer comunicaciones inalámbricas a los usuarios que lo necesiten. Y aquí, en las comunicaciones es dónde entran estas plataformas, podrían mejorar y abaratar la puesta en marcha de estos quioscos. En la Fig. 1.2 se puede ver un ejemplo de los productos que juntamente con los mencionados puede llegar a suministrar un *Ekocenter*.

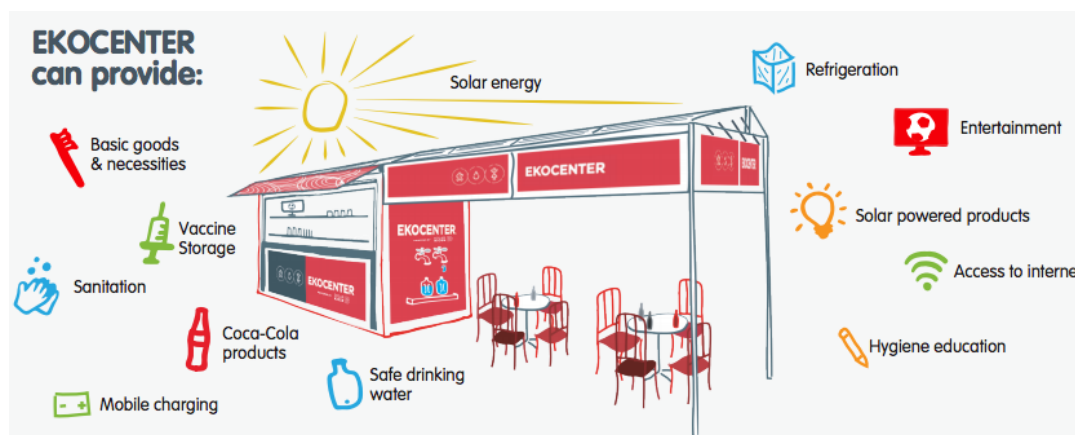


Figura 1.2: Servicios de un *Ekocenter* [12].

1.2. Objetivos

El Trabajo de Fin de Grado tiene varios objetivos, todos ellos enfocados en el diseño de una antena para su posterior implementación en pseudo-satélites. Los objetivos a de este trabajo son:

- Hacer una revisión del estado del arte de los sistemas *HAPS* y analizar como es más sencilla la implementación de la antena en estos que en los satélites.
- Analizar los fundamentos de la simetrías geométricas y analizar cómo de estas surgen las de orden superior. Se va a estudiar también su uso en dispositivos en la banda de milimétricas.
- Estudiar la influencia de las dimensiones de los agujeros dispuestos con simetría *glide*. Centrando el diseño para un correcto funcionamiento en la banda Ka (concretamente de 29 a 31 GHz).
- Diseñar una antena completamente metálica en la banda Ka. Este prototipo incorporará el uso de la simetría *glide*. Además, se estudiará su implementación en plataformas *HAPS*.

Por último, otro objetivo de este trabajo es colaborar al desarrollo sostenible del planeta. Ligado a este compromiso, en el Anexo I se expone la aportación de este trabajo a los ODS de la Agenda 2030.

1.3. Metodología

La metodología a seguir en este trabajo consta de las siguientes etapas:

La **primera etapa** está basada en la búsqueda y revisión de la información más relevante para poder alcanzar el conocimiento suficiente y profundizar en el que se tiene para poder trabajar de manera correcta en las siguientes fases.

La **segunda etapa** consiste en el análisis de las plataformas de alta altitud, una descripción a grandes rasgos así como los objetivos que se pretenden conseguir con la implementación de estas plataformas y su comparación con otros sistemas inalámbricos de banda ancha. Junto con eso se explican los proyectos de actualidad que rodean a estos pseudo-satélites y unas pinceladas de las expectativas de futuro.

La **tercera etapa** es el estudio de la tecnología y de las simetrías de orden superior así como la implementación de una de ellas. Comenzando por una explicación básica de las simetrías y como de ellas se obtienen entre otras, la *glide*, que será fundamental para el desarrollo de la antena. Además también esta etapa está dedicada al aprendizaje y manejo del programa CST Studio para poder realizar un estudio paramétrico y analizar el comportamiento del *bandgap*. Por último, el uso de esta simetría en comparación con guías de onda convencionales para ver como es realmente útil su uso.

La **cuarta etapa** está dedicada a profundizar en el manejo del programa CST Studio para poder diseñar el prototipo inicial que servirá de base para diseñar y construir la

antena que resultará como resultado de este trabajo. Además se explica en detalle el funcionamiento de cada etapa de la antena a la par que se muestran sus parámetros y características más relevantes.

La **quinta etapa** expone las conclusiones obtenidas fruto del trabajo y del estudio llegado tras la observación e interpretación de todos los resultados obtenidos a lo largo del proyecto.

Capítulo 2

Plataformas de alta altitud

En este capítulo se aborda el sistema donde se implementa la antena a diseñar. Se centra en la explicación de qué es este sistema a la par que trata de mostrar sus ventajas e inconvenientes frente a los sistemas convencionales.

2.1. Introducción

Las plataformas de alta altitud, también conocidas por sus siglas en inglés *HAPS* están definidas en el Reglamento de Radiocomunicaciones como estaciones radioeléctricas situadas sobre un objeto a una altitud de 20 a 50 kilómetros y en un punto nominal, fijo y especificado con respecto a la Tierra [13]. De la misma manera la *ESA (European Space Agency)*, define estas plataformas como pseudo-satélites [14]. Esta definición viene motivada por sus atributos como un híbrido entre los drones y los satélites tradicionales, mezclando por ejemplo los tiempos de vuelo que abarcan desde días a meses y pudiendo alcanzar en alguna ocasión años con su baja altitud. Este importante atributo provoca que la señal tenga menos retardo así como menores pérdidas de propagación. Además estos sistemas ofrecen cobertura en sitios de difícil acceso que les otorga una capacidad única de actuación en situaciones de emergencia. Con todo esto se puede concluir que los sistemas *HAPS* están creando una nueva concepción de vehículos no tripulados para las comunicaciones gracias a su alcance y fortaleza frente a los elementos del entorno, otorgando a una zona determinada una cobertura de calidad y continuada.

La Fig. 2.1 ilustra el modelo típico de arquitectura del sistema dominante *HAPS* con diferentes categorías de escenarios de despliegue, en función de la zona de cobertura y el uso que se le dé a la plataforma. Con esta arquitectura se garantiza la conectividad continua a través de diferentes *HAPS* pese a situaciones meteorológicas y de emergencias inesperadas. Además también pueden hacer de soporte para otros tipos de comunicación como la terrestre, la satelital o la del servicio aeronáutico, buscando siempre tener una situación de visión directa.

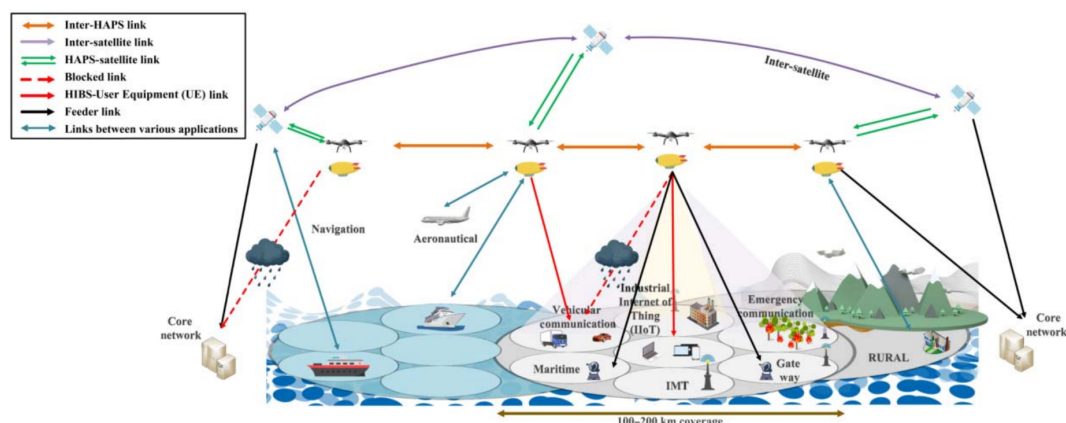


Figura 2.1: Arquitectura y despliegue de una red con *HAPS* [15].

2.2. Usos actuales de los sistemas *HAPS*

El surgimiento de nuevas tecnologías abre siempre nuevas posibilidades de negocio, en el caso de las *HAPS* ofrecen la posibilidad, entre otras, de proporcionar tanto conectividad de banda ancha fija para usuarios finales como enlaces de transmisión entre redes móviles y centrales para el tráfico de retorno [13]. Estas plataformas son muy versátiles, lo que hace que puedan servir para multitud de casos. Pueden usarse para satisfacer una determinada demanda en términos de capacidad o de cobertura de un área específica. Gracias a las antenas que posee, la capacidad puede distribuirse en una zona amplia para proporcionar una cobertura general o centrarse en zonas de interés más reducidas. También pueden usarse para interconectar un país o un continente en su totalidad sin la necesidad de lanzar un satélite, que a parte de tener una complejidad mayor, acarrea más costes. Su diseño hace posible que puedan distribuir LTE, 5G y potencialmente la nueva evolución de la red, un futuro 6G. Esto es gracias a su fácil mantenimiento debido a su baja altitud. Sería tan sencillo como instalar una nueva antena en el pseudo-satélite, lo cual puede realizarse sin necesidad de desplazar al personal grandes distancias.

El uso de *HAPS* se podría concretar en algunos aspectos como:

- **Cobertura de *Greenfield*:** hoy en día prácticamente todas las ciudades están conectadas y poseen infraestructuras de redes de comunicación, sin embargo algunas zonas no poseen este tipo de infraestructuras. A estas zonas se les denomina *Greenfield*[16]. Una aplicación podría ser la cobertura de este tipo de zonas. Según un informe de la ITU del año 2023, actualmente hay 2.6 miles de millones de personas que aún no están conectadas [17]. Para realizar esta cobertura, un número relativamente bajo de *HAPS* podría cubrir un área con suficiente capacidad y dar conexión a internet por horas limitadas al día o a la semana.
- **Comunicaciones en casos de emergencia y catástrofes:** los desastres naturales y las situaciones de emergencia son hechos que no se deben dejar de lado y que están presentes en nuestro día a día, y es por eso que los sistemas *HAPS* pueden servir de gran ayuda, no solo en las comunicaciones sino que, con la configuración

adecuada, pueden detectar personas y coordinar equipos de emergencia, aspectos claves a la hora de salvar vidas en estas situaciones, gracias a su rápido despliegue y su conectividad. Esta conectividad sirve también para restaurar otras infraestructuras como el agua, el transporte o el suministro de energía.

- **Internet de las “Cosas”:** IoT es un término que se refiere a la interconexión de un amplio rango de móviles, vehículos, electrodomésticos, dispositivos y sensores. Es usado para optimizar procesos y reducir costes. En la industria, el IoT no requiere grandes capacidades, por lo que un número reducido de *HAPS* podría soportar métodos mejorados de predicción y control de la congestión para optimizar el rendimiento de la red a la par que mejorar la latencia. Además puede replicar las capacidades de seguridad y privacidad de una red terrestre [16].
- **Cobertura de eventos:** los eventos (normalmente deportivos) atraen a grandes multitudes a una zona determinada, lo que aumenta la demanda de capacidad. Las *HAPS* son una forma cómoda de dar cobertura temporal y capacidad en este tipo de situaciones y en las que tratar de dar mayor capacidad es muy complicado. Por ejemplo, los sistemas *HAPS* podrían prestar servicios ininterrumpidos de seguridad y transmisión de vídeo en el Dakar o en el Tour de Francia o incluso los Juegos Olímpicos de Invierno. La principal ventaja de estas plataformas para este caso de uso es la cobertura omnipresente, que no puede lograrse por ninguna otra tecnología en un terreno tan atípico. La cobertura permitiría nuevas formas de *streaming*, por ejemplo desde drones. El radio del área de servicio *HAPS* y la capacidad de las células pueden ajustarse con flexibilidad para responder a las demandas específicas de cada evento.
- **Acceso fijo a internet:** pese al gran incremento de la demanda de la banda ancha por fibra óptica, en muchas áreas, especialmente las rurales, no es posible implementar el uso de esta tecnología. Debido a esto el uso de los pseudo-satélites es una gran alternativa ya que permiten una conexión de calidad además de una baja latencia.
- **Backhaul terrestre:** hay áreas geográficas específicas en las que por la orografía se hace muy complicado el despliegue de *links* de *backhaul*. Por ejemplo en lugares remotos en los que no se genera tráfico suficiente no se puede justificar el costoso despliegue de fibra. Además que el despliegue de fibra no siempre es posible. Por lo que las plataformas podrían implementarse como parte de solución de *backhaul* para estaciones base portables y casos industriales[18].

2.3. Comparación con otros sistemas

El uso de estas plataformas presenta grandes ventajas respecto a los satélites convencionales y los sistemas terrestres (sistemas inalámbricos de banda ancha), algunas ya han sido comentadas con anterioridad. Se muestra a continuación en la Tabla 2.1 una comparativa.

Sistemas	Terrestre	<i>HAPS</i>	Sat. LEO	Sat. GEO
Altitud operacional	250 m	20-50 km	500-2.000 km	35.786 km
Cobertura	Tierra Costa	Tierra Mar	Tierra Mar	Tierra Mar
Diámetro de la cobertura	<1 km	Hasta 200 km	>500 km	Global
Área del servicio	Puntual	Nacional Regional	Global	Global
Consumo eléctrico	Alto	Bajo	Bajo	Bajo
Movilidad	Estacionaria	Casi estacionaria	Rápida	Rápida
Vida útil	Largo plazo	Hasta 5 años	3-7 años	>15 años
Retardo de propagación	μ s-ms	0.13-0.33 ms	3.33-13.33 ms	480 ms
Máxima velocidad de transmisión	155 Mbps	25-155 Mbps	2 Mbps up 64 Mbps down	155 Mbps

Tabla 2.1: Tabla comparativa sistemas terrestres, *HAPS* y satélites. Elaborada a partir de [19] y [20].

De todas las características mostradas conviene destacar algunas. La primera de ellas y la diferencia más evidente y también mencionada con anterioridad, es la altura. Las *HAPS* operan a tan solo 20 kilómetros de altura, una gran diferencia respecto a los satélites. La segunda característica que hay que resaltar, debida a la altura operacional, es el bajo retardo de propagación que tienen, junto con una velocidad de transmisión que está al nivel del resto de sistemas. La tercera de ellas es que tienen un coste estimado bajo, de unos 50 millones de euros frente a los 9.000 millones que puede suponer lanzar un satélite para órbita baja con todo lo que ello conlleva. Por último, una gran ventaja que presentan los pseudo-satélites es la posibilidad de retorno para mantenimiento y reconfiguración de la carga útil, factor que hace posible la adaptación a las nuevas tecnologías de una manera rápida y eficaz.

Además, el diseño para la implementación estratosférica de estas plataformas supone grandes retos tecnológicos, como por ejemplo la gestión térmica, el correcto funcionamiento a baja altitud, la fiabilidad y la generación y almacenamiento de energía. Respecto a esta última, se puede decir que, como cualquier aeronave, necesitan una fuente de energía para el sistema de propulsión y el suministro eléctrico de sus sistemas y carga útil. Los proyectos de *HAPS*, con el objetivo de lograr una resistencia muy larga, del orden de meses e incluso años, impiden el uso de fuentes de energía basadas en el combustible de aviación tradicional. La energía nuclear es una solución técnicamente viable, pero políticamente no aceptada por la sociedad, debido a los riesgos asociados. La mejor solución y es por la que optan la mayoría de los proyectos es la implementación, ya comentada, de células solares [21].

2.4. Actualidad

En la actualidad hay varios grandes proyectos que apuestan por el desarrollo de las plataformas estratosféricas. Algunas de las grandes compañías que lideran estos proyectos son:

- **Thales Alenia Space:** la empresa empezó a desarrollar el Stratobus en 2015, con el objetivo de crear un dirigible estratosférico con una carga útil de 250 kg capaz de mantenerse a 20 km de altitud durante un año. El Stratobus medirá 140 m de largo, tendrá una envoltura de fibra de carbono resistente a los rayos UV y podrá soportar vientos de 90 km/h gracias a sus cuatro motores de hélice eléctricos que lo hacen totalmente autónomo. Conseguir esta autonomía es posible gracias al sistema de placas solares que tiene que cuenta con más de $1000m^2$ de celdas solares. A medida que avanza el programa van variando algunas de las soluciones técnicas, como la posición de las plantas propulsoras y los paneles solares [22]. A futuro se espera que este zepelín pueda tener uso tanto a nivel militar como civil, por ejemplo para uso medioambiental y comunicaciones.



Figura 2.2: Stratobus [23].

- **Airbus:** fue la pionera en el diseño de las plataformas, su primera creación fue el Airbus Zephyr que fue presentado en el año 2005. Hoy en día está en desarrollo el Zephyr-S, un pseudo-satélite que tiene un fuselaje estrecho, casi esquelético, y unas alas con una envergadura de 25 m. A pesar de su gran tamaño, el dron está fabricado con compuestos ligeros de fibra de carbono, lo que reduce su peso total a sólo 75 kg. Además posee en la totalidad de su parte superior un recubrimiento de placas solares que lo hace autónomo, junto con unas baterías recargables que hace posible su vuelo nocturno. Gracias a este sistema de almacenamiento de energía, la compañía afirma que el funcionamiento en vuelo de Zephyr es completamente



Figura 2.3: Zephyr-S [24].

neutro en carbono. Zephyr es capaz de transportar una amplia gama de sensores y equipos, con un peso máximo de hasta 22.5 kg. Entre las cargas útiles compatibles se encuentran sensores ópticos, infrarrojos, LIDAR e hiperspectrales, radar y radar de apertura sintética (SAR), e incluso sistemas de alerta temprana. Gracias a su altitud de operación de aproximadamente 21 km, Zephyr puede observar un área terrestre de 600 km². Su resistencia única lo convierte en la herramienta perfecta para misiones de larga duración, como la seguridad marítima o la vigilancia de fronteras, donde podría vigilar continuamente un lugar determinado durante semanas [24].

- **D'ICARO:** este proyecto llevado a cabo por una *startup* madrileña de nombre smartHAPS, lanzó en verano de 2021 su primer prototipo de globo estratosférico ante representantes del Ejército de Tierra, Aire y la UME (Unidad Militar de Emergencias), al que le han dado el nombre de D'ICARO (Dirigible Cautivo de Reconocimiento y Observación) y que se presenta como una solución de vigilancia aérea. Mide 6 m de largo, con una capacidad de elevación de carga de 10 kg, un techo de 200 m y una autonomía actual de 5 horas. Se trata de una solución con aplicaciones inmediatas como el apoyo a vigilancia aérea en actividades relacionadas con la seguridad y la defensa, además de control de incendios, medio ambiente, urbanismo y control de eventos masivos entre otras [25].



Figura 2.4: D'ICARO de smartHAPS [25].

En nuestro país la implementación de esta tecnología se está llevando a cabo con el proyecto *Canarias Stratoport for HAPS and UAS*. Este innovador proyecto trata de hacerse un lugar como espacio de ensayos, aterrizaje y despegue de sistemas aéreos no tripulados así como el desarrollo de prototipos de vuelo. Esta zona estará compuesta por varios hangares y edificios ocupando un espacio de 120 hectáreas [26]. Este proyecto cuenta actualmente con un presupuesto de 11 millones de euros financiados por la Unión Europea a través del Fondo de Desarrollo Regional, junto con el gobierno de Canarias y el Parque Tecnológico de Fuerteventura [27].

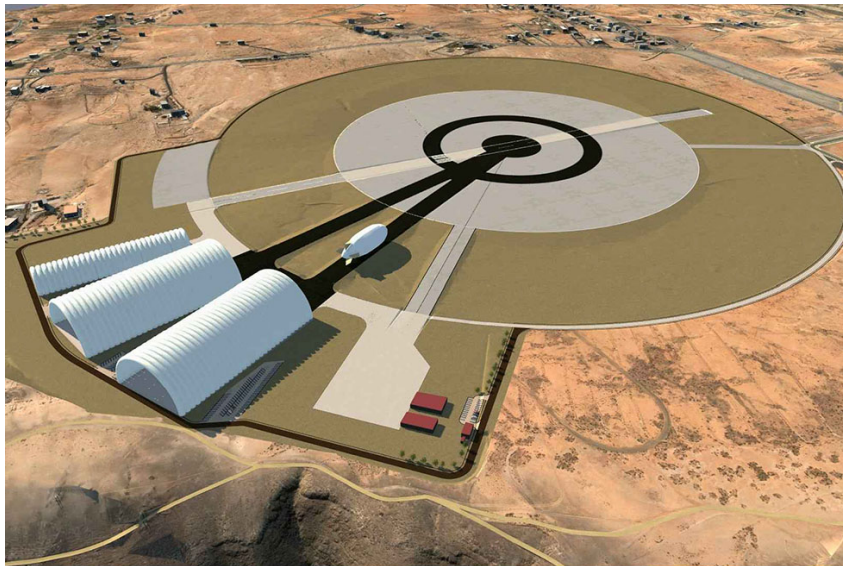


Figura 2.5: Propuesta de diseño del *Stratoport* [28].

Junto con el *Stratoport*, en España también se está llevando a cabo en el aeropuerto de Teruel un proyecto de la compañía *SCEYE*. Esta compañía comenzó haciendo algunos tests cerca del desierto de Nuevo México y ahora, tal y como anunciaron, han realizado una gran inversión en Teruel [29]. Este proyecto bajo el lema de "*Stratospheric platforms to improve life on our planet*" está construyendo las *HAPS* más avanzadas del mundo,

robustas, versátiles e impulsadas con energía solar. Pueden ofrecer Internet súper rápido directamente al dispositivo e imágenes de alta resolución de la Tierra en tiempo real. El aeropuerto de Teruel no servirá únicamente de estratopuerto sino que también estará destinado a la producción, ensamblaje y puesta en funcionamiento de más sistemas *HAPS* a nivel internacional, convirtiéndose así en un puerto de referencia a nivel mundial [30].

Además *SCEYE* establece diferentes objetivos. Entre ellos se encuentran la protección de la tierra y prevención de incendios, que se concreta en detección e interceptación tempranas de catástrofes medioambientales antes de que se descontrolen y destruyan infraestructuras críticas. Asimismo se pretende usar para búsqueda y salvamento marítimos, es decir, vigilancia marítima de alta resolución para identificar embarcaciones oscuras y actividades ilegales. Por último pretenden usarlo para monitorizar emisiones industriales, uso de sensores para controlar el metano y otros gases de efecto invernadero en tiempo real, proporcionando una herramienta fundamental para hacer cumplir los objetivos climáticos [31].

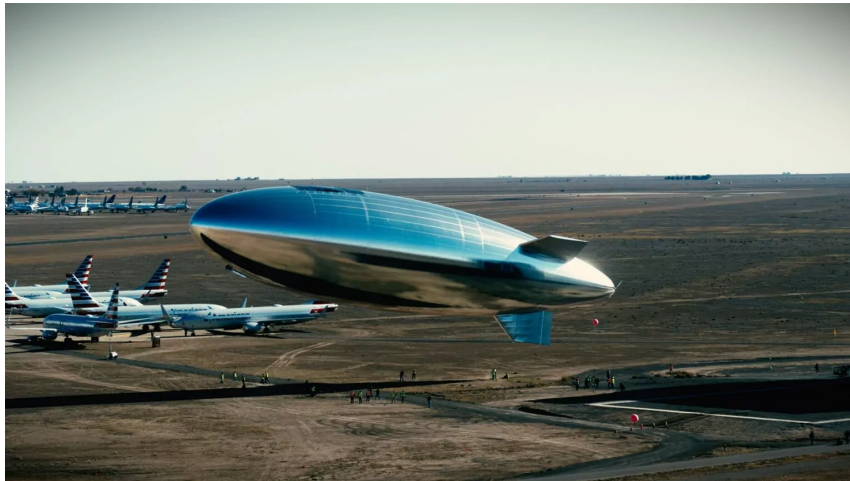


Figura 2.6: Dirigible de la compañía *SCEYE* [31].



Figura 2.7: Hangar del dirigible de *SCEYE* [31].

2.5. Expectativas de futuro

Estos vehículos provistos de grandes ventajas y que van a ser de gran utilidad en los próximos años están considerados como una forma muy valiosa de establecer aplicaciones complementarias a las de los satélites. La aceptación de estos dependerá en gran medida de su eficiencia y su relación coste-beneficio. Sus atributos ya mencionados como la facilidad de despliegue o la conectividad hacen de las *HAPS* una gran herramienta para complementar las redes terrestres y espaciales.

A largo plazo, se espera que tengan un papel importante con la llegada del 6G. Concretamente según NTT DOCOMO, la mayor empresa de telecomunicaciones de Japón, se espera que sean de gran ayuda en resolución de problemas sociales, mejora de la comunicación entre personas, en la expansión de lo que se conoce como *communication environment* y por último para la sofisticación de los sistemas ciberfísicos, que a grandes rasgos es un proceso que integra la computación con los procesos físicos [32].

Además, en la implementación de redes futuras, la IA jugará un papel esencial y también en el manejo de los sistemas *HAPS*. Estos vehículos serán unos grandes impulsores de la IA y la informática en las redes aéreas y espaciales. En la era del IoT, los datos son el preciado combustible de la analítica de datos y los algoritmos de ML (*Machine Learning*). Datos que se pueden utilizar para aprender continuamente sobre el entorno de red inalámbrica y el comportamiento de los usuarios y permitir que la red se adapte proactivamente a los cambios. Las *HAPS* son un candidato potencial para la computación colaborativa y el ML distribuido [33]. Por último, mediante el uso de mega constelaciones, se espera a su vez que las *HAPS* tengan un rol esencial en las comunicaciones MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) masivas. Esta disruptiva tecnología ha hecho posible multiplicar por mil la capacidad que otorga el 5G [33]. En la Fig. 2.8 se puede ver integrado todo lo que se ha comentado, el uso de la IA y las mega constelaciones en unas futuras redes 6G.

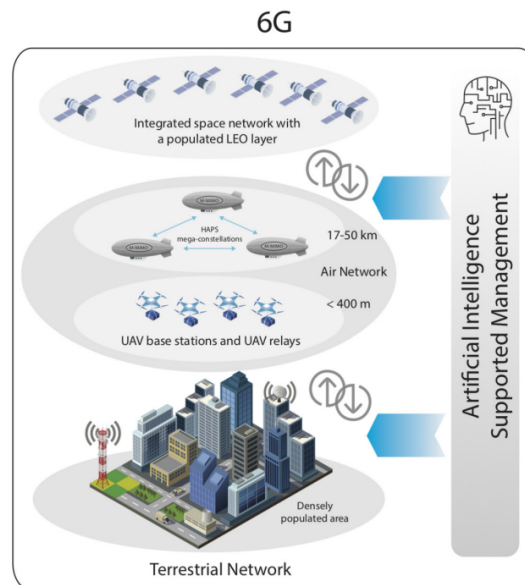


Figura 2.8: Visión de futuro de posible implementación de las *HAPS* [33].

Capítulo 3

Simetrías de Orden Superior

En este capítulo se explica la tecnología a emplear en el diseño de la antena, así como las aplicaciones de la misma. Además, mediante el uso del simulador CST, se realiza un estudio paramétrico de la antena implementada que garantice un correcto funcionamiento en la banda de frecuencias deseada.

3.1. Introducción

Desde hace mucho tiempo se han estado usando diferentes tipos de estructuras periódicas para controlar las propiedades electromagnéticas de las ondas guiadas y radiantes. Actualmente se está trabajando con una simetría que recibe el nombre de simetría de deslizamiento o *glide symmetry* y que se explica con detalle en este capítulo como concepto matemático junto con los usos más comunes. La simetría de deslizamiento está presente en muchas formas diferentes en la naturaleza, como por ejemplo en algunos fósiles, lombrices o pennatulacea (más conocido por *sea pen* [34]). También se puede observar el uso de esta simetría en la arquitectura. Un caso muy conocido es el de la Alhambra de Granada, donde los árabes ya usaban esta técnica en el diseño de teselas. En la Fig. 3.1 se observa cómo se usaba la simetría *glide*. Las primeras estructuras electromagnéticas que empleaban esta tecnología se remontan a los años 60-70 del siglo pasado. Hay diversos estudios de esos años en los que se comienzan a dar los primeros esbozos sobre el uso de simetrías de orden superior en guías de ondas. Algunos de estos autores fueron Hessel [35], Mittra [36] o Crepeau [37].

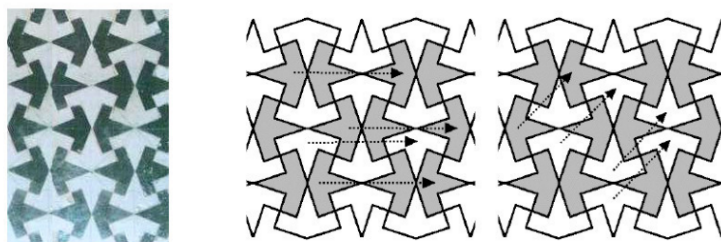


Figura 3.1: Ejemplo de uso de la simetría *glide* en la arquitectura [38].

3.2. Concepto de las simetrías de orden superior

La tecnología del trabajo está basada en las simetrías de orden superior, y concretamente se ha escogido la simetría *glide*. Antes de definirla, es necesario previamente explicar los fundamentos de la simetría geométrica, que se presentan a continuación en la Tabla 3.1.

Simetría	Tipo de simetría	Descripción	Figura
Axial	Simetría reflexiva	Está referida a un eje. Un objeto tendrá esta simetría si su aspecto no cambia al girar alrededor de un eje.	Fig. 3.2a
Reflectiva	Simetría reflexiva	También conocida como simetría de espejo. Ocurre cuando el eje divide la figura en dos partes iguales, siendo una la imagen de la otra.	Fig. 3.2b
Esférica	Simetría rotacional	Hace referencia a que existe un punto al que se le denomina centro de simetría y todos los puntos a una cierta distancia del mismo son equivalentes.	Fig. 3.2c
Traslacional	Simetría rotacional	Un objeto posee esta simetría si se puede trasladar una cierta cantidad (t) sin modificar su forma general.	Fig. 3.2d

Tabla 3.1: Simetrías fundamentales. Elaboración propia a partir de [39] y [40].

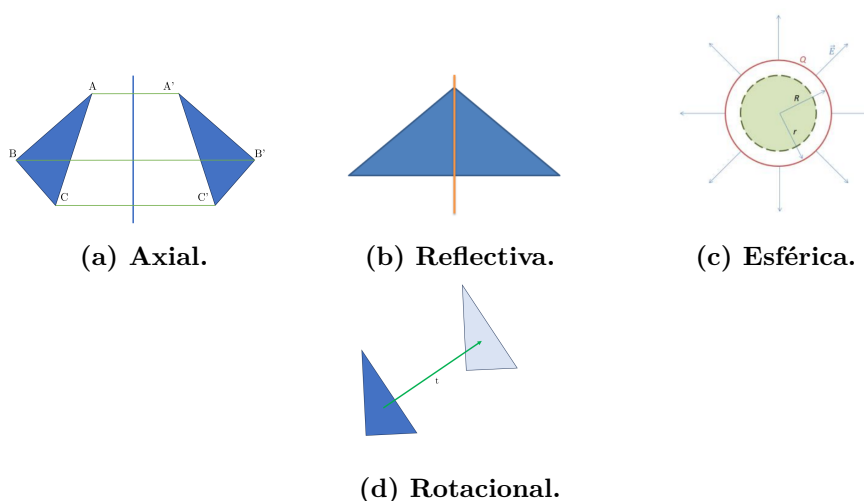


Figura 3.2: Imágenes de las simetrías fundamentales [39].

Ahora ya comprendidas las simetrías más fundamentales, el resto de simetrías no son más que combinaciones de las simetrías expuestas en la Tabla 3.1. En este contexto de combinación de simetrías aparecen las denominadas simetrías de orden superior y son

las que se van a utilizar en la creación de estructuras periódicas. El foco se centra en la simetría de deslizamiento o también llamada *glide symmetry*, aunque se explica del mismo modo la *twist symmetry*, ya que es usada con frecuencia a la par que la anterior en las estructuras periódicas.

3.2.1. *Glide Symmetry*

Esta simetría conocida también con el término traslareflexión es un tipo de simetría combinación de dos de las fundamentales. Éstas son la traslación y la reflexión. Si se considera la imagen de la Fig. 3.3, la reflexión se produce respecto al eje horizontal y la traslación según el eje vertical.

$$(x, y) \rightarrow (x + t, -y) \tag{3.1}$$

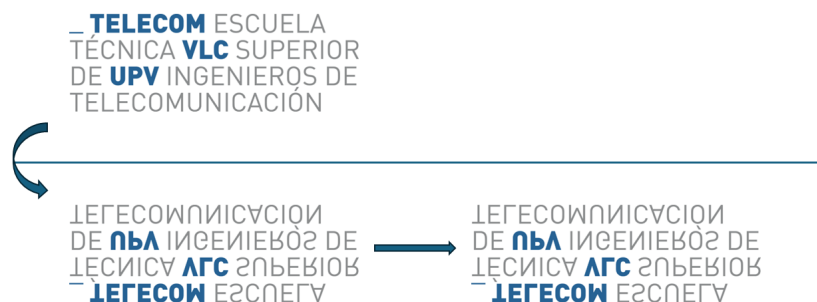


Figura 3.3: Simetría *glide*.

La razón por la que se estudia el uso de esta simetría es que ha demostrado ventajas respecto a la implementación de las estructuras periódicas típicas sin incrementar ni la complejidad ni el coste de fabricación. Se puede ver en [41] cómo el uso de la simetría de deslizamiento produce baja dispersión en el índice de refracción, lo que permite realizar diseños de banda ultra ancha. Otra ventaja que presenta es la posibilidad de realizar un guiado de ondas de manera eficiente y eficaz como podemos observar en [42]. Además, el uso de esta simetría permite reducir la dispersión en tecnología coplanar así como la propagación en guías de onda. Esto puede ser empleado para controlar la ubicación de la banda de frecuencias prohibida (*bandgap*) y crear antenas *leaky-wave* poco dispersivas [39].

3.2.2. *Twist Symmetry*

Otra simetría de orden superior muy utilizada y que ya ha sido mencionada antes es la *Twist Symmetry*. La diferencia con la anterior es que esta combina la traslación con la simetría esférica. Este tipo de estructuras se crean haciendo traslaciones y rotaciones

angulares. Como se puede ver en la Fig. 3.4. En este caso podemos expresar la simetría mediante la siguiente ecuación:

$$(x, y) \rightarrow (x + t, y + \theta) \quad (3.2)$$

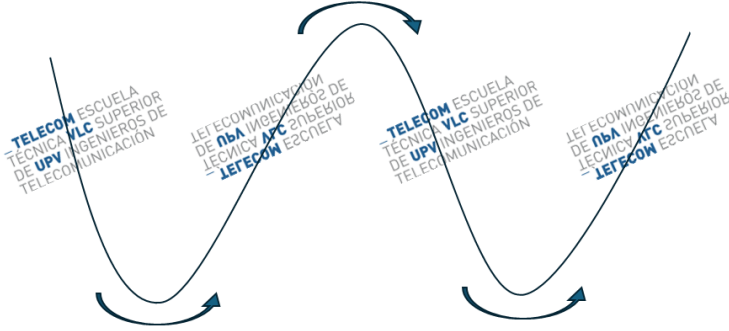


Figura 3.4: Simetría *twist*.

Esta simetría está aún por explotar, ya que la *glide* tiene una aplicación e implementación más sencilla. No obstante es de gran utilidad cuando se trabaja con cables coaxiales como puede apreciarse en [43], donde se demuestra que la implementación de la simetría *twist* reduce significativamente la dispersión presente en un cable coaxial habitual.

3.3. Aplicaciones en dispositivos en la banda de milimétricas

La presencia de la simetría *glide* en estructuras periódicas puede introducir modificaciones muy beneficiosas en las propiedades electromagnéticas de este tipo de estructuras. La diferencia entre una estructura *glide* o *no-glide* se debe al acoplamiento distintivo de las unidades subcelulares que las componen. Ahora que ya han sido expuestos los diferentes tipos de simetrías y las ventajas que pueden presentar el uso de las simetrías de orden superior, se procede a analizar sus aplicaciones en el ámbito de las microondas y la banda de milimétricas.

En el contexto de tecnologías pioneras que han solucionado muchos problemas de ensamblado en la banda de milimétricas destaca la tecnología Gap Waveguide. Esta tecnología básicamente es capaz de conseguir un guiado de ondas mediante el control de su propagación en la dirección deseada utilizando dos placas paralelas. Este concepto se basa en los principios de condiciones de contorno y superficies canónicas, lo cual permite un eficiente guiado de ondas electromagnéticas. El desarrollo de esta tecnología ha facilitado la creación de múltiples dispositivos como redes de distribución de potencia, antenas, filtros, diplexores, híbridos y acopladores, entre otros [44]-[50].

Un aspecto crucial de esta tecnología es la creación de una banda prohibida (EBG, por sus siglas en inglés), la cual es esencial para el guiado de ondas. Sin embargo, los

pinos utilizados en la tecnología presentan problemas a frecuencias elevadas, por encima de 60 GHz, lo que ha llevado a la recomendación del uso de agujeros. Esto es porque es más fácil fresar agujeros que pinos a bandas altas y el comportamiento es parecido. No obstante, las estructuras típicas de agujeros como sustitutos de los pinos no siempre logran la banda ni la atenuación deseadas [51]. Para superar esta limitación, se emplea la simetría *glide* que mejora el *bandgap* obtenido por la estructura. Si bien los agujeros tienen la contrapartida de ser más grandes y menos factibles para ser utilizados en estructuras compactas, sí son una buena alternativa que complementa la idea original de la tecnología Gap Waveguide, y en cierto modo son una extensión de la misma. Así pues, en la Fig. 3.5 se ilustra este concepto. Gracias a la simetría *glide*, la onda puede ser guiada de forma eficiente. Este concepto, igualmente, ya ha sido implementado en numerosos prototipos, como desfasadores [52], filtros [53] y arrays de antenas [54].

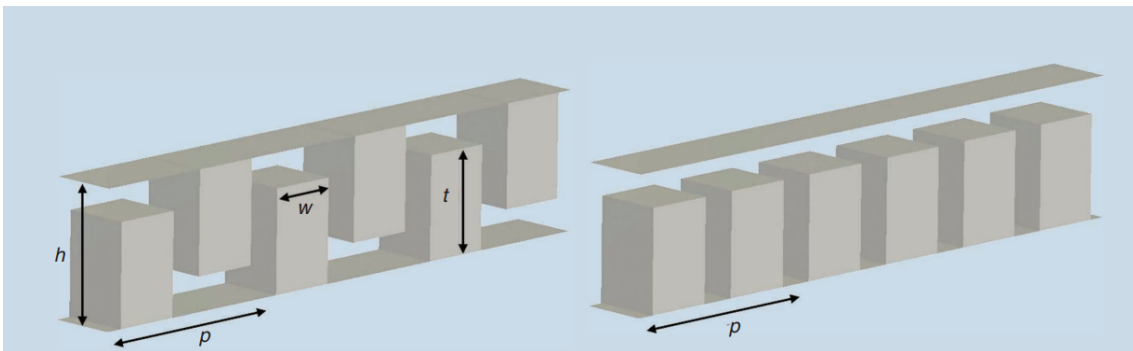


Figura 3.5: Uso de la simetría *glide* en guiado de ondas con pinos [55].

En segundo lugar, como se ha esbozado en el apartado anterior, esta tecnología puede ser usada a su vez para la construcción de filtros. Comúnmente se emplean estructuras periódicas de pinos, pero es aquí dónde los agujeros de esta tecnología pueden reemplazar a los pinos. Además también se usa la simetría *glide* para tecnología planar [56].

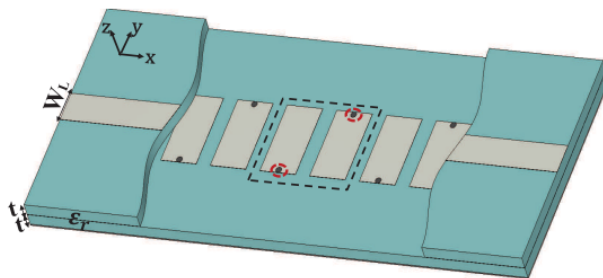


Figura 3.6: Implementación en un filtro de agujeros con simetría *glide* en el eje X [57].

Por último, otra aplicación destacable son las antenas tipo *leaky-wave*. Debido a la convergencia del primer y segundo modo en la primera zona de Brillouin, las estructuras simétricas con tecnología *glide* son muy útiles para producir radiación hacia atrás [58]. El uso de agujeros en guías de onda con ranura, ha demostrado controlar de mejor manera las fugas que sus homólogos que no emplean simetría de deslizamiento [59].

3.4. Implementación real en el trabajo. Estudio paramétrico

Una vez han sido detallados los aspectos generales y teóricos de las simetrías fundamentales y cómo de ellas derivan las de orden superior, se implementa ahora un diseño particular para ser usado en las estructuras bajo estudio. En el siguiente capítulo, se estudia cómo hacer uso de la tecnología *glide* en la implementación del diseño de la antena, en el cual se crea una estructura metálica con una distribución periódica de agujeros en lugar de la tradicional guía de onda hueca metálica con paredes sólidas. Este capítulo III se centra primero en comprender bien qué dimensiones y periodo entre agujeros son óptimos para el diseño requerido.

En primer lugar, en la Fig. 3.7 y Fig. 3.8 se puede ver un ejemplo del tipo de estructura que se desea diseñar.

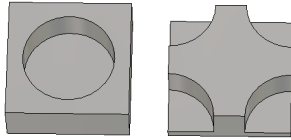


Figura 3.7: Agujeros de la simetría *glide*.

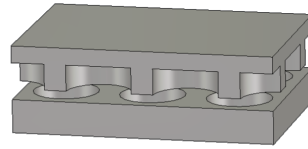


Figura 3.8: Boceto de estructura periódica con agujeros y simetría *glide*.

Para la realización del estudio, que se centra en encontrar el rango de frecuencias a los que se desea que no haya propagación, se han tenido en cuenta los siguientes parámetros: la altura de los agujeros (h_{ag}), el radio del agujero (r), el período (p) y el *gap* (g) de aire entre las placas. La elección de los valores iniciales de estos parámetros se han calculado de manera aproximada según [60].

En esta publicación se presenta un estudio de la variación del *bandgap* en función de la modificación de diferentes parámetros (altura, periodo, gap de aire, profundidad de los agujeros). Dicho estudio está centrado para bandas por encima de los 40 GHz, en las bandas U y V (entre 40 y 75 GHz), y el trabajo aquí presentado está orientado para la banda Ka (alrededor de 30 GHz) por tanto hay que escalar los valores para ajustarlos a la banda de interés. A tenor de esto, se han escogido los siguientes valores iniciales, que se pueden ver en la Tabla 3.2.

Parámetro	Valor (mm)
Altura Agujero	2.4
Radio Agujero	3
Período	8
Gap	0.2

Tabla 3.2: Parámetros iniciales. Elaboración propia a partir de datos obtenidos en [60]

Altura del agujero

Este parámetro mide la profundidad del agujero tal y como se puede observar en la Fig. 3.9. En un principio se podría haber pensado que iba a tener un comportamiento crítico en el diseño. Pero tras la realización del estudio se ha podido observar que su variación apenas afecta al *bandgap*, como se aprecia en la Fig. 3.10. Esta variación no afecta ya que sobrepasado el mínimo de profundidad requerida para el agujero cualquier variación deja inalterado el *bandgap* [61].

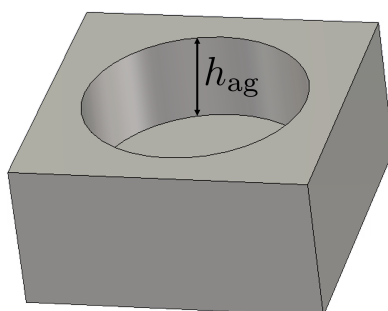


Figura 3.9: Dimensión altura del agujero.

Como primer valor y a partir del cual se han ido haciendo el resto de medidas, se escogió el de 2.4 mm, como se muestra en la Tabla 3.2. Para el caso particular de este parámetro, tanto el *bandgap* como la frecuencia central han permanecido prácticamente inalteradas. Lo que a la hora de hacer el diseño final de la antena será de gran ventaja de cara a su implementación ya que el grosor de cada placa es también un parámetro considerado en el diseño de una antena. En la Tabla 3.3 se muestra a modo de síntesis el estudio realizado, y del que obtenemos que para todos los valores de la altura obtenemos una frecuencia central de 29,5 GHz y un *bandgap* de unos 14 GHz aproximadamente.

Altura (mm)	<i>Bandgap</i> (GHz)	Frecuencia central (GHz)
2.8	14.2	29.5
2.6		
2.4		
2.2		
2		

Tabla 3.3: Resumen del estudio paramétrico de la altura del agujero

Por último y tras las simulaciones para encontrar la banda de frecuencia deseada se han obtenido las gráficas expuestas en la Fig. 3.10. Figura en la que se puede observar los dos primeros modos de propagación para los diferentes valores de altura que se han probado. La altura en el diseño de la antena final dependerá del grosor de cada capa.

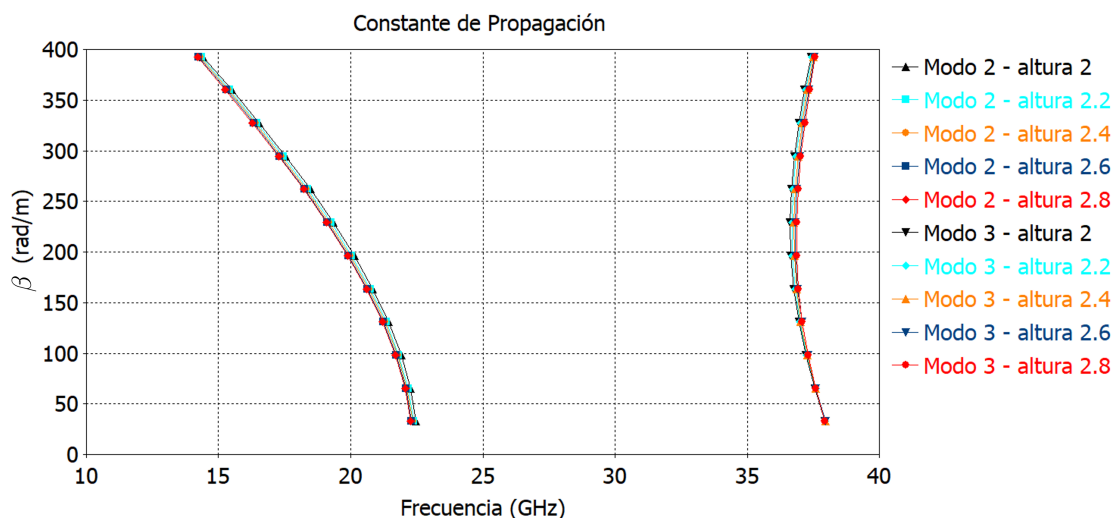


Figura 3.10: Variación del *bandgap* con la altura (mm).

Radio del agujero

A diferencia de la altura, el radio del agujero es un parámetro que introduce notables cambios en el *bandgap*. Este parámetro que se muestra en la Fig. 3.11 se ha modificado con un paso de 0,2 mm entre simulaciones, empezando por el de valor 3 mm. Se ha elegido el valor de 3 mm, porque el estudio mencionado al principio de este apartado para una banda de frecuencias superior toma como referencia 1,4 mm. Y para el caso de estudio, que la banda es inferior, según [60], se debe incrementar el radio para reducir las frecuencias que limitan el *bandgap*.

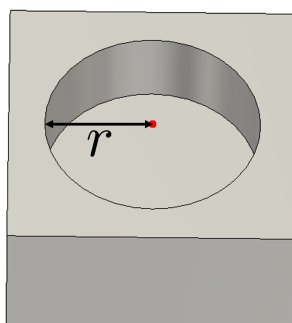


Figura 3.11: Dimensión radio del agujero.

En la Tabla 3.4 se pueden los valores obtenidos para los diferentes radios. Se puede concluir que para el radio de 3 mm se obtiene el *bandgap* máximo de aproximadamente unos 14.3 GHz. A partir de este valor, si se toman mayores valores del radio, se observa una disminución de la banda y de la frecuencia central. Si se escogieran valores más pequeños del radio, el resultado para la banda sería el mismo, aunque la disminución es notablemente

mayor para el decremento de 0.2 mm que para el aumento; pero por otro lado se produce una subida en la frecuencia central.

Radio (mm)	Bandgap (GHz)	Frecuencia central (GHz)
2.6	7.6	31.1
2.8	11.66	30.87
3	14.3	29.5
3.2	13.6	27.97
3.4	11.45	27.15

Tabla 3.4: Resumen del estudio paramétrico del radio del agujero

A modo de síntesis y al igual que antes, se muestra gráficamente en la Fig. 3.14 la variación del *bandgap* según los diferentes modos de propagación y los valores dados para el radio del agujero. A la hora de observar este parámetro, se puede concluir que es más crítica su variación. Pero no es el parámetro que más influye en lo que se está buscando. Más adelante se mostrará como el período es más importante y provoca variaciones más importantes de los valores que buscamos. Para el trabajo se optará por un valor cercano a los 3 mm.

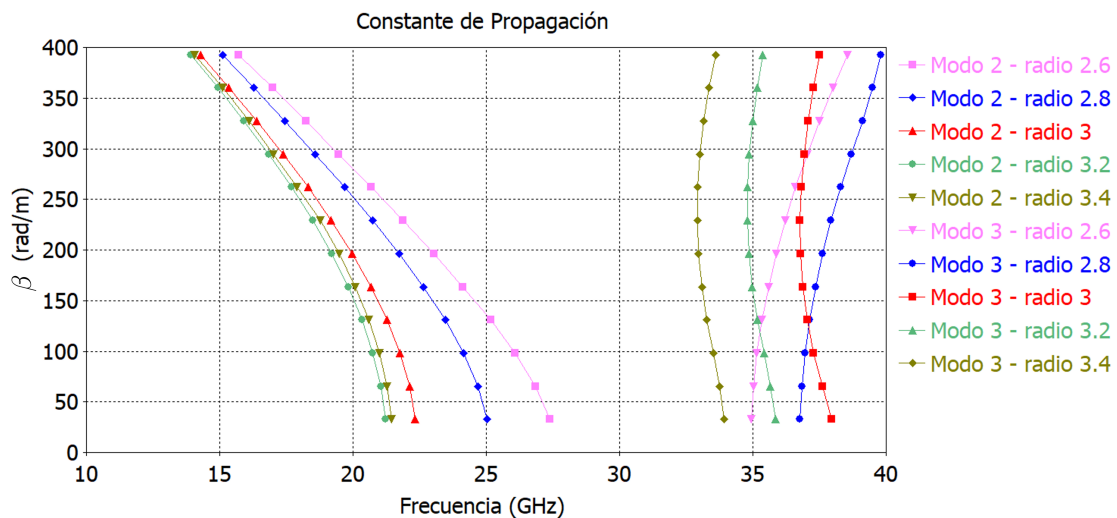


Figura 3.12: Variación del *bandgap* con el radio (mm).

Período

Tras haber realizado el estudio de la altura y del radio del agujero, se procede a hacer el análisis del período, parámetro fundamental a la hora de realizar el diseño final de la antena. En la Fig. 3.13 se puede ver a lo que hace referencia esta magnitud, que se puede definir como se aprecia en la figura y también como la distancia entre los centros de la circunferencia de los agujeros anexos.

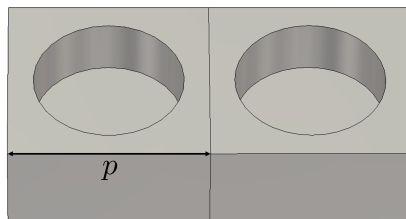


Figura 3.13: Dimensión período del agujero.

Con respecto al estudio del período, se ha propuesto como valor inicial 8 mm, de manera similar a lo que antes ocurría con el radio, si crece el período el *bandgap* decrece, pero en este caso a mayor período menor frecuencia central y a mayor período, la frecuencia central crece. Los cambios tanto en la frecuencia central como en el *bandgap* en este caso y como se había introducido antes, son más bruscos que para el radio y es porque el período es un parámetro más crítico. Esta información descrita se presenta de manera resumida en la Tabla 3.5.

Período (mm)	Bandgap (GHz)	Frecuencia central (GHz)
10	4.1	25.05
9	8.35	27.5
8	14.4	29.5
7	12.2	31.25
6	2.7	37.7

Tabla 3.5: Resumen del estudio paramétrico del período

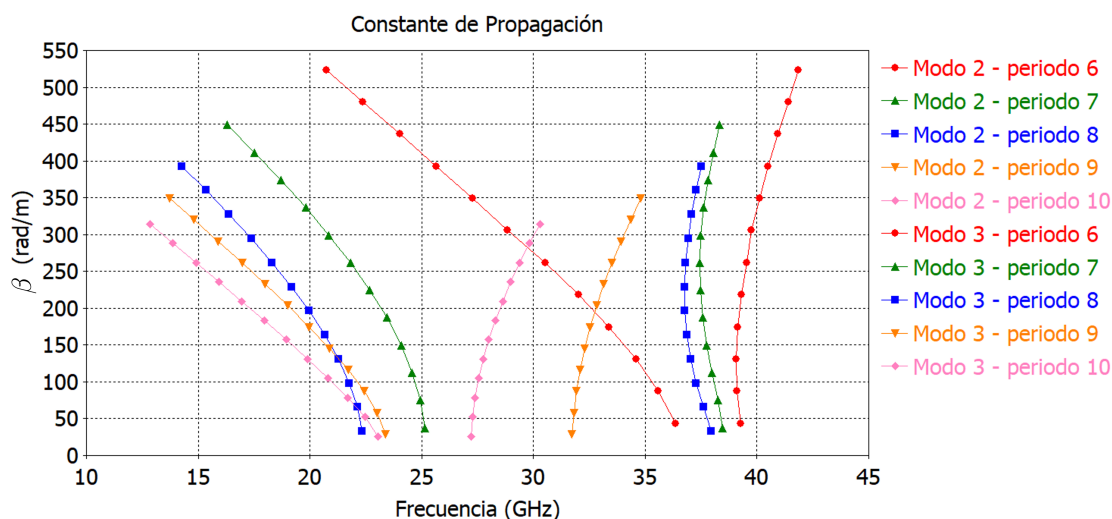


Figura 3.14: Variación del *bandgap* con el período (mm).

A continuación y de manera más gráfica se exponen en la Fig. 3.14 las simulaciones

realizadas para hallar el *bandgap* óptimo para los diferentes períodos que se han comentado antes. Para el diseño de la antena, que es el objetivo del proyecto, se utilizará un período cercano a 8 mm al que se le introducirán pequeñas variaciones para poder ajustarlo mejor. Se escoge este valor porque es el que más *bandgap* nos ofrece, además de estar centrado en una frecuencia cercana a los 30 GHz.

Analizado el peso del período en el *bandgap* se procede a ver la gran influencia que tiene el *gap* de aire entre las placas.

Gap de aire

Para finalizar el estudio paramétrico, se analiza como afecta el *gap* de aire entre las placas al *bandgap* y a la frecuencia central de ese rango de frecuencias. A modo ilustrativo en la Fig. 3.15 se puede ver a qué parámetro nos referimos cuando hablamos de *gap*.

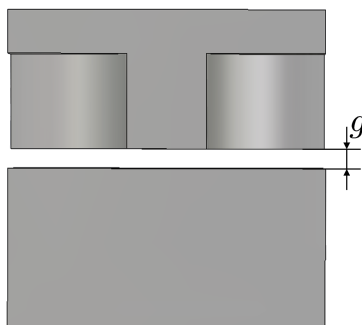


Figura 3.15: Dimensión *gap* de aire entre las placas.

A continuación en la tabla 3.6 se expone una síntesis de las simulaciones realizadas. Como se puede apreciar a mayor *gap* entre las dos placas mayor frecuencia central y menor *bandgap*, del mismo modo, a menor *gap* mayor *bandgap* y menor frecuencia central, por lo que se puede concluir que el *gap* y el *bandgap* son inversamente proporcionales, conclusión que será de gran relevancia para el diseño final. El cual se realizará con el menor *gap* que se pueda ya que para un *gap* se ha demostrado obtener un comportamiento óptimo y cercano al que se está buscando.

Gap aire (mm)	Bandgap (GHz)	Frecuencia central (GHz)
0.2	14.4	29.5
0.175	15.35	29.2
0.15	16.25	28.82
0.125	17.45	28.3
0.1	18.85	27.8

Tabla 3.6: Resumen del estudio paramétrico del *gap* de aire

Por último y al igual que con el resto de parámetros que se han estudiado a lo largo de

este apartado, se muestra en la Fig. 3.16 un resumen gráfico de la influencia del período en el *bandgap*. Se puede concluir que el *gap* no altera la frecuencia máxima del rango de frecuencias del *bandgap*, sino que lo que hace es reducir el valor de la frecuencia mínima de dicho rango, provocando los efectos que se han descrito anteriormente.

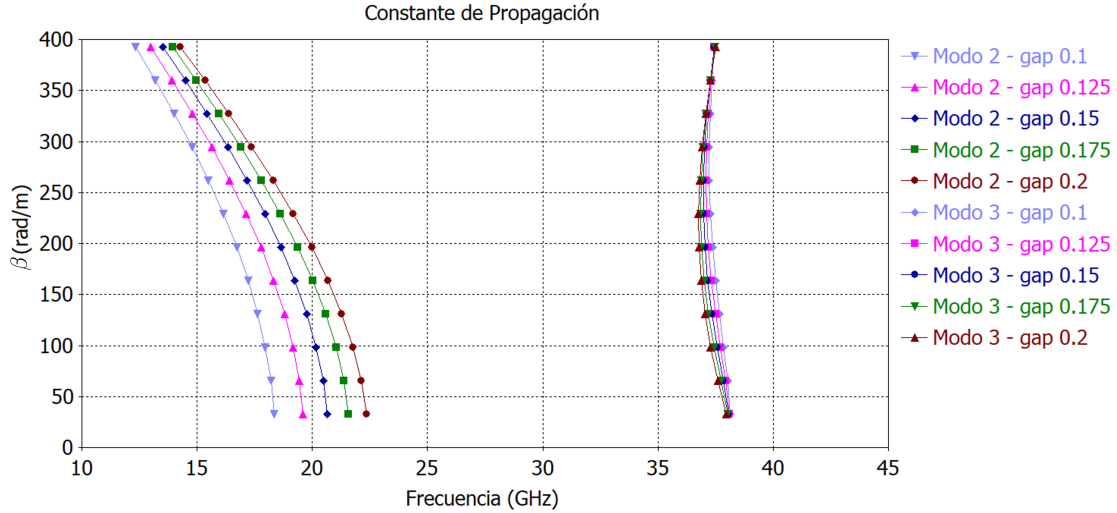


Figura 3.16: Variación del *bandgap* con el *gap* de aire.

Simulación de la guía de ondas

Para cerrar este capítulo de simetrías de orden superior, se expone el comportamiento de una guía de onda convencional que se va usar como referencia para comparar el funcionamiento de la guía con *glide*. Se comprueba que efectivamente mediante el uso de esta simetría la aparición de un *gap* de aire entre placas paralelas metálicas no estropea el funcionamiento de la guía y puede confinar con gran eficacia el campo.

Las simulaciones que se muestran son tres, primero se simula una guía de onda convencional perfectamente sellada. Esta guía de onda ampliamente estudiado sirve como marco de referencia. Después se realiza la misma simulación pero con separación entre las placas y se aprecia el efecto notable del campo y cómo el funcionamiento se estropea completamente. Por último, se simulará la misma guía de onda pero esta vez con el uso de la simetría *glide* y con el mismo *gap* que se ha dejado en el caso anterior. Se observa así cómo existe una mejora muy notable al usar esta tecnología.

Para comprobar el comportamiento de las guías mencionadas anteriormente, hay que fijarse en los parámetros S, o también llamados coeficientes de *scattering* o de dispersión, concretamente en el S_{11} . Este parámetro se define como el coeficiente de reflexión, es decir, cuanta potencia se refleja [62]. Para considerar el valor del S_{11} como bueno debe de tomar un valor inferior a -15 dB o -20 dB.

Además CST ofrece poder ver de un modo muy intuitivo los campos en las guías mediante los *field monitors*, que también se mostraran para cada caso y que serán de gran ayuda para observar lo buena o mala que es la guía bajo las condiciones estipuladas.

En la Fig. 3.17, se puede observar como es una guía de onda convencional perfectamente sellada. A partir de este modelo se han realizado las tres pruebas previstas que cierran este capítulo.

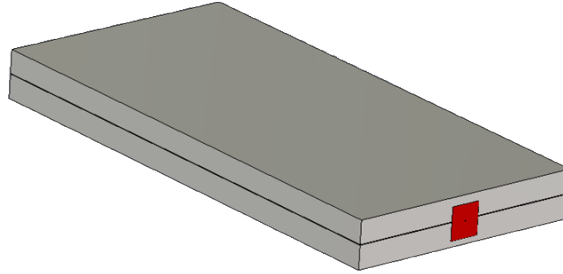


Figura 3.17: Guía de onda convencional.

En primer lugar, siguiendo la línea de lo comentado al principio se ha simulado el comportamiento de la guía de onda convencional perfectamente sellada. Habiendo realizado la primera simulación para esta guía se observa en la Fig. 3.18a como el campo queda perfectamente confinado en el interior. Además también se puede ver en la Fig. 3.18b como el parámetro S_{21} es de 0 dB en toda la banda de frecuencias y además el S_{11} está por debajo de -50 dB que es muy por debajo del nivel de -20 dB que se estaba buscando, esto quiere decir que la reflexión es prácticamente nula; tal y como se espera del comportamiento de estas guías en las que la onda está confinada en su totalidad.

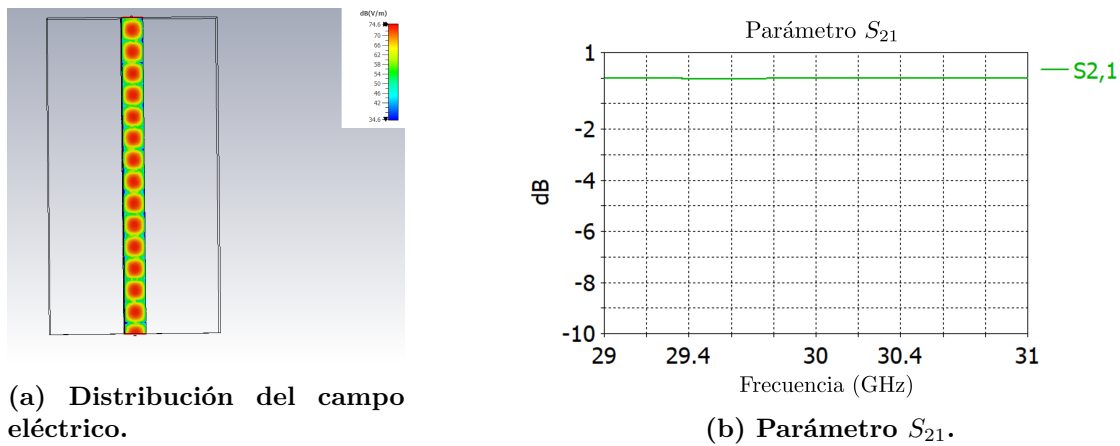


Figura 3.18: Guía de onda convencional sin *gap* de aire

Tras haberse comprobado el comportamiento del campo con un *gap* de aire nulo, se procede a simular que ocurriría si se cambiara ese sellado perfecto por una separación de unos $100 \mu\text{m}$.

Habiendo realizado la simulación, se puede apreciar en la Fig. 3.19a el efecto tan destacado de la separación de las placas. El campo se fuga por completo, estropeándose así el funcionamiento de la guía de onda. Este mal comportamiento se puede corregir.

Algunas de las opciones para corregir estos comportamientos es el uso de pines como en [63] o en este caso con el uso de agujeros mediante la simetría *glide* como se comentará a continuación. Además para confirmar que efectivamente el funcionamiento no es el que se

espera, se comprueba en la Fig. 3.19b como el coeficiente de reflexión de la guía en la gran mayoría de la franja de frecuencia de interés es mayor que los -20 dB que se requerían como mínimo para considerar un buen parámetro S_{11} .

Por lo que esto sigue recalcando la necesidad del uso de alguna tecnología para mejorar el funcionamiento de las guías al introducir separación entre las placas.

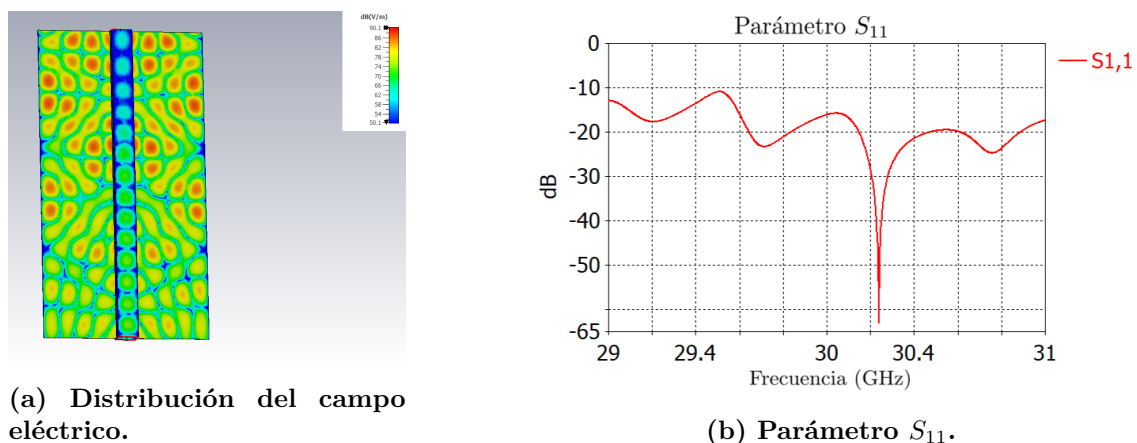


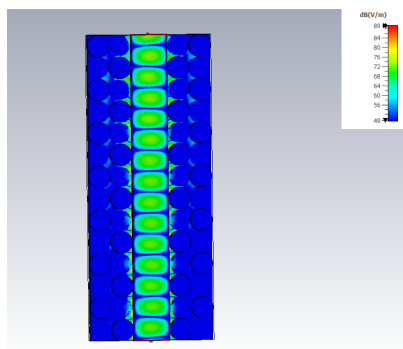
Figura 3.19: Guía de onda convencional con *gap* de aire

Por último, se presenta ahora la misma guía de onda con la que se ha estado trabajando desde el inicio pero ahora con la peculiaridad ya comentada. Se introducen los agujeros con simetría *glide* que mejoran de manera notable el comportamiento de la guía con separación entre las placas.

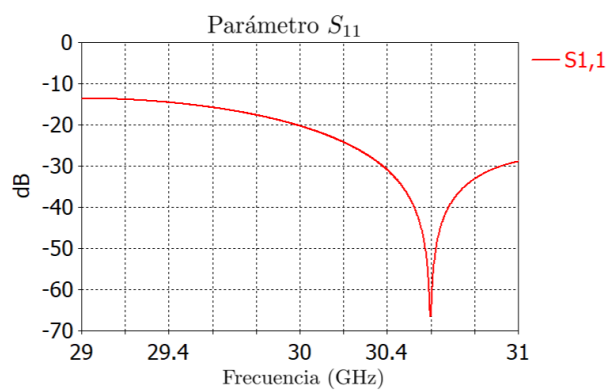
Por un lado en la Fig. 3.20a se puede ver que el confinamiento en la guía no es perfecto pero notoriamente mejor que en el caso de la guía convencional. Se aprecia campo que se escapa de la guía pero con un nivel de intensidad muy bajo, de ahí el color azul que se puede ver en la imagen.

Por otro lado, se puede observar como con respecto a la simulación anterior, en la que no se usaba simetría, hay una gran mejora en el coeficiente de reflexión. Esta mejora puede verse en la Fig. 3.20b, dónde se ve que la guía está adaptada a partir de los 30 GHz. Este valor de frecuencia se podría bajar si fuera necesario optimizando con el CST. Pero actualmente es útil ver esa adaptación para confirmar la gran mejoría que supone el uso de los agujeros con simetría *glide*.

Con todo esto, se puede concluir que el uso de la simetría de orden superior es realmente beneficiosa para estructuras como la que se va a diseñar.



(a) Distribución del campo eléctrico.



(b) Parámetro S_{11} .

Figura 3.20: Guía de onda con simetría *glide* y *gap* de aire

Capítulo 4

Diseño de la antena con tecnología *glide*

En este capítulo se afronta el diseño de la antena con la simetría presentada en el capítulo anterior. Previamente a este diseño se comienza con una exposición de la estructura inicial de la antena. Este dispositivo está hecho todo de metal y sin espacio entre sus componentes para poder así optimizar todas las variables y conseguir una buena adaptación.

Tras obtener esta adaptación, que se consigue haciendo que el valor del S_{11} esté por debajo de -10 dB, se incorporan los agujeros con la simetría *glide*. Después de optimizar la antena con esta nueva tecnología se expone su aplicación a las plataformas de alta altitud explicadas en el Capítulo II.

4.1. Diseño y optimización del prototipo inicial

El prototipo del que se va a partir en este trabajo es una antena compuesta por 3 capas tal y como puede verse en la Fig. 4.1. La primera de estas capas se conoce como *feeding layer* o capa de alimentación. Esta capa (en azul) incluye el puerto de entrada en guía rectangular estándar y es fundamentalmente un divisor de potencia de 1 a 4 en guía. Cada una de las salidas del divisor se conecta a través de una ranura a la capa intermedia de la antena, conocida como *coupling layer* o capa de acoplo (en rojo). Esta capa contiene unas cavidades de acoplo que sirven de alimentación de las ranuras radiantes situadas en la capa superior, la cual se conoce como *radiating layer* o capa radiante (en verde). Cabe resaltar que las ranuras radiantes están embebidas en unas cavidades que sirven para reducir los acoplos mutuos entre radiadores [64].

Estas son las 3 capas de las que se compone la antena y que en un inicio serán totalmente de metal. En estas capas, muchas variables requieren un proceso de optimización que se desarrolla de manera independiente para cada una de ellas más adelante. La antena está diseñada para funcionar en la banda Ka (en torno a los 30 GHz) y con polarización lineal.

El prototipo tiene de inicio unas dimensiones de 45 mm de ancho y 45 mm de largo, mientras que de alto mide 15.9 mm. Esta última podrá variar, ya que la altura de la capa

radiante va a ser optimizada.

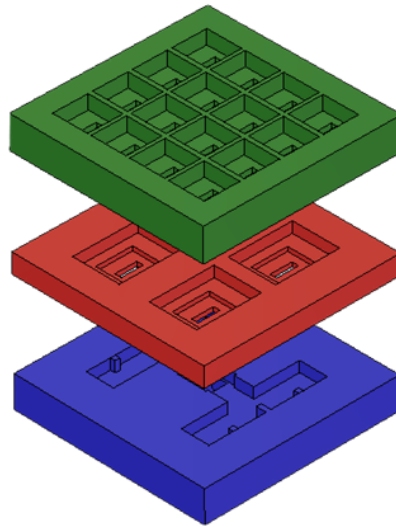


Figura 4.1: Estructura del prototipo.

4.1.1. Capa de alimentación

Para empezar con el desarrollo del prototipo, se toma como punto de inicio la capa inferior, que se puede ver en la Fig. 4.2. Esta capa está dividida en varios elementos que son explicados uno a uno.

La primera de estas partes es el puerto de entrada, que se ubica en la parte posterior de la capa y tiene las dimensiones ajustadas para coincidir con la guía de onda estándar WR-28. Estas dimensiones son $7.112\text{ mm} \times 3.556\text{ mm}$ como se puede ver en la Fig. 4.3 y que otorga una perfecta adaptación con la guía de onda que alimentará la antena.

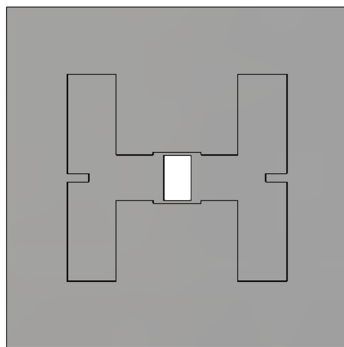


Figura 4.2: Capa de alimentación del prototipo.

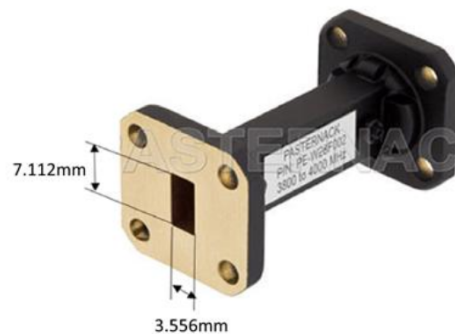


Figura 4.3: Dimensiones de la guía de onda WR-28.[65]

La segunda parte es el divisor 1 a 4, compuesto de varias secciones de guías de ondas y dos *septums*, tabiques que ayudan a la división de la señal. Tras llevar a cabo el proceso

de optimización del divisor se obtienen como resultado unos parámetros S_{21}, S_{31}, S_{41} y S_{51} de -6 dB, lo que nos indica que cada rama del divisor obtiene un cuarto de la potencia inicial tal y como se puede ver en la Fig. 4.5 y en la distribución del campo en la Fig. 4.6. Para su optimización se han colocado 4 puertos, uno en cada salida del divisor, además del que se sitúa en la parte posterior. Junto con esto, se han establecido unas condiciones de contorno, que se pueden ver en la Fig. 4.4 en la cual se aprecia como se han seleccionado paredes eléctricas (contorno verde). Las variables críticas para la optimización de esta primera capa han sido, la longitud de los *septums*, las tres dimensiones del puerto (largo, alto y ancho) y la anchura de la guía que va a las ramas del divisor. Tras optimizar el divisor, en la Fig. 4.5 se puede apreciar cómo el parámetro S_{11} en la banda deseada está por debajo de los -20 dB.

Por último, para la optimización del prototipo en su conjunto, se han considerado además de las variables ya ajustadas anteriormente, las longitudes de las guías (su separación con el corto) y la separación entre ambas ramas del divisor; junto con la posición y anchura de los iris.

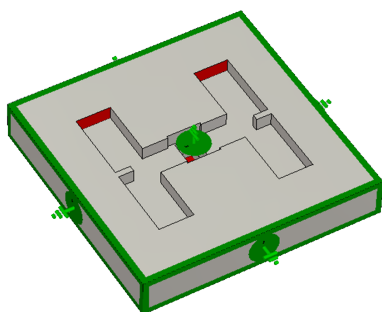


Figura 4.4: Condiciones de contorno del divisor de la capa de alimentación.

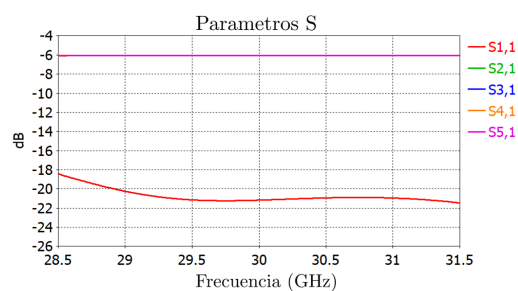


Figura 4.5: Parámetros S del divisor de la capa de alimentación.

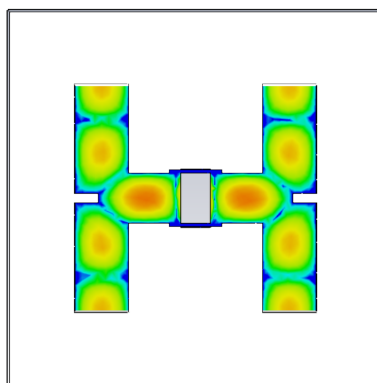


Figura 4.6: Distribución del campo eléctrico en el divisor 1 a 4

4.1.2. Capa de acoplo

Tras analizar la capa de alimentación, se procede a estudiar la capa de acoplo. En la Fig. 4.7 se puede observar la disposición de la misma.

Esta capa puede descomponerse a su vez en varias partes. Se encuentran dentro de la capa cuatro cavidades de acoplamiento. Estas cavidades se irán abriendo sucesivamente con el objetivo de lograr una mejor adaptación. Dentro de estas cavidades se encuentran las ranuras de acoplamiento que tienen como función dividir la señal. Dentro de la etapa de optimización que se ha llevado a cabo, para esta capa han sido optimizadas las dimensiones y la posición de las cavidades y de las ranuras.

Para el proceso de optimización de esta capa se han seleccionado debido a su gran importancia, las 3 dimensiones de las cavidades además de las tres dimensiones de la ranura de acoplamiento.

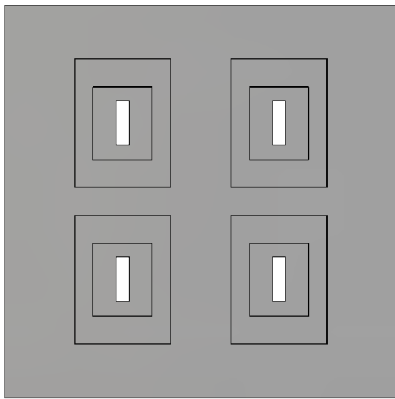


Figura 4.7: Capa de acoplo del prototipo

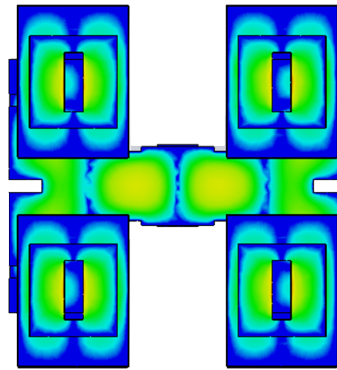


Figura 4.8: Distribución del campo eléctrico en la capa de acoplo.

En la Fig. 4.8 se observa cómo se distribuye el campo en esta capa intermedia. Esta distribución hará posible la alimentación de cuatro ranuras radiantes.

4.1.3. Capa radiante

Por último la capa superior, también llamada capa radiante, está compuesta por 16 cavidades alimentadas cada grupo de 4 por una de las cavidades de la capa de acoplo. En el interior de cada cavidad tenemos a su vez una ranura. En la Fig. 4.9 se puede observar cómo es la disposición de los elementos mencionados en el prototipo.

Dentro de la optimización, concretamente en lo que correspondería a esta capa, se ha considerado solamente la profundidad de la cavidad como variable crítica. En la Fig. 4.10 se puede ver como se distribuye el campo eléctrico por toda la capa radiante.

Por último, en todo momento dentro del proceso de optimización y mejora del prototipo, se ha intentado y conseguido obtener un parámetro S_{11} que se encontrará por debajo de los -10 dB en el rango de frecuencias de 29 GHz a 31 GHz. Además para este rango frecuencial se podrá bajar el límite hasta -11 dB e incluso reducirlo ligeramente

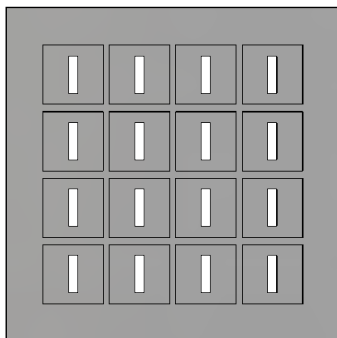


Figura 4.9: Capa radiante del prototipo

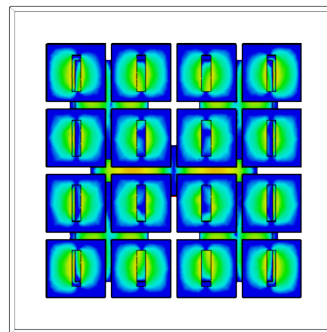


Figura 4.10: Distribución del campo eléctrico en la capa de radiante.

por debajo de este valor.

Tras haber sido analizadas las capas por separado, se van a presentar los parámetros más relevantes del prototipo.

En primer lugar se presenta el S_{11} , que como puede verse en la Fig. 4.11, se encuentra por debajo de -10 dB en el rango de frecuencias deseado. Además también se ha logrado conseguir este objetivo en el rango de 27 a 31 GHz.

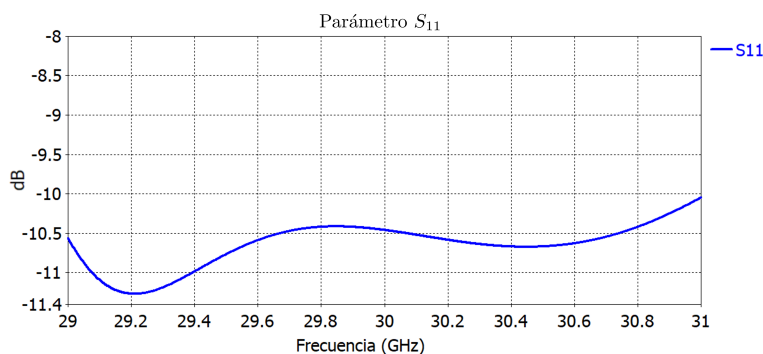


Figura 4.11: Parámetro S_{11} del prototipo

El diagrama de radiación es una herramienta clave a la hora de analizar el rendimiento y la capacidad de transmisión de la antena. En la Fig. 4.12 y Fig. 4.13 se puede observar el diagrama de radiación en campo lejano de la antena prototipo desde varias perspectivas. Los principales parámetros del prototipo que se pueden tomar del diagrama de radiación, son en primer lugar, el NLPS (Nivel Lóbulo Principal a Secundario) que es de -12.6 dB para la frecuencia de 30 GHz, que es la que se usará para comparar algún resultado teórico con los experimentales. Además el prototipo tiene una eficiencia de -0.2463 dB lo que es equivalente en lineal a un 94.48%. Y por último el ancho de haz a menos 3 dB es de 14.1° , esto es el ancho del haz a la mitad de la potencia. Esta última indica que la antena tiene gran directividad, que se comprobará más adelante. Estas prestaciones son de gran importancia a la hora de implementar esta antena en un sistema *HAPS*, ya que este tipo de enlaces (comunicaciones por satélite) requieren antenas muy directivas. Además un haz estrecho y los bajos lóbulos secundarios, reducen el riesgo de interferencias de otras señales

no deseadas de otras direcciones.

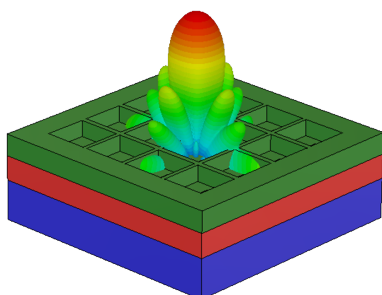


Figura 4.12: Diagrama de radiación

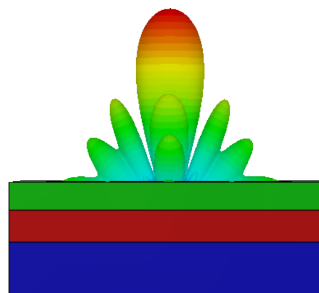


Figura 4.13: Vista de perfil del diagrama de radiación

Como se explicó en el capítulo de Introducción, uno de los parámetros más relevantes de una antena es la directividad. En la Fig. 4.14, podemos observarla, medida en dBi. La directividad tiene un valor para las diferentes frecuencias en torno a los 21.2 dBi, pero varía con la frecuencia. Este valor es muy parecido al que se obtiene realizando los cálculos de manera teórica. Tomando de partida la fórmula de la directividad expuesta en el Capítulo I, y tomando una eficiencia de apertura ideal:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{A \cdot 4\pi}{\lambda^2} \quad (4.1)$$

Se toma como referencia la frecuencia de 30 GHz. Lo que significa una longitud de onda de 10 mm. Se escoge además un área de 2025 mm² (tomando como referencia el lado de 45 mm y que la antena es cuadrada). Con estos datos se obtiene una directividad de 21.9 dBi. Valor próximo al obtenido por la simulación, que eran 21.12 dBi. En la Fig. 4.14 se puede observar la directividad a distintas frecuencias según el ángulo θ .

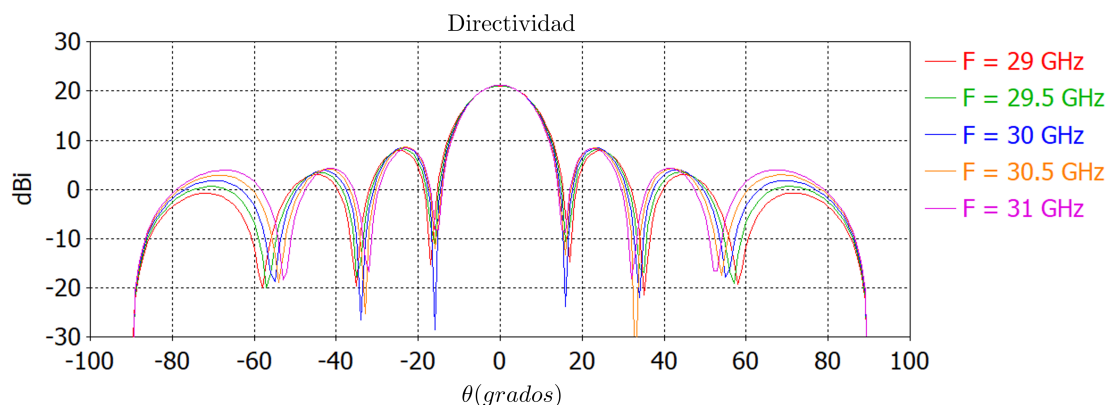


Figura 4.14: Directividad de la antena a diferentes frecuencias.

Por último, en la Fig. 4.15, se puede observar el campo eléctrico del prototipo visto de perfil, en el que se aprecia como fluye el campo eléctrico por la antena y al no existir *gap* de aire entre las placas, el prototipo queda perfectamente sellado, no hay fugas entre las capas.

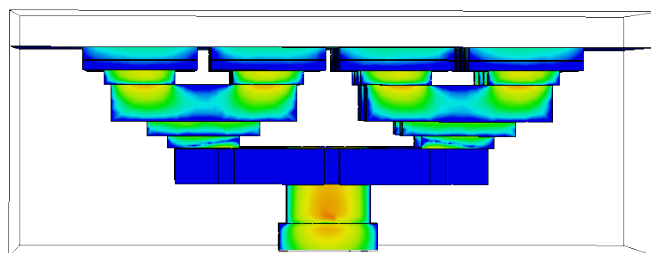


Figura 4.15: Campo eléctrico del prototipo. Vista de perfil.

Síntesis del proceso de optimización

Para finalizar este apartado de diseño y optimización del prototipo inicial, se expone a continuación un tabla que plantea de manera resumida tanto como los valores iniciales, como los finalmente optimizados. Juntamente se define a que hace referencia cada uno de ellos. En primer lugar y de una manera más visual se muestra la Fig. 4.16 en la que se muestran marcadas las medidas a mejorar de las cavidades, ya que de manera descriptiva pueden no llegar a comprenderse correctamente. Después de esta figura, se presenta a modo de resumen la tabla 4.1 en la que están descritas el resto de las variables que se han sometido a la optimización a la par que sus valores iniciales y el finalmente optimizado.

Dimensión	Valor Inicial	Valor Final	Definición
x_{3ca}	11	9.511	Fig. 4.16
x_{2ca}	6.8	7.606	
x_{1ca}	1.5	5.121	
y_{3ca}	14.75	13.096	
y_{2ca}	8.4	7.979	
y_{1ca}	5.1	5.12	
z_{3ca}	1	0.98	Profundidad de las cavidades
z_{2ca}	1	1.026	
z_{1ca}	2.5	2.587	
z_{co}	2.5	2.62	Dimensión Z de la capa radiante
x_{pin}	1.1	1.156	Dimensión X de los pines de la capa de alimentación
x_{WG}	0	0.112	Desplazamiento de las guías de ondas de la capa de alimentación
y_{WG}	22.5	22	Dimensión Y de las guías de onda de la capa de alimentación
mov_{sep}	7	6.885	Dimensión X de los septums de la capa de alimentación

Tabla 4.1: Tabla síntesis de los parámetros de la optimización.

Finalizado este proceso, en el siguiente apartado se explica cómo, a partir de este

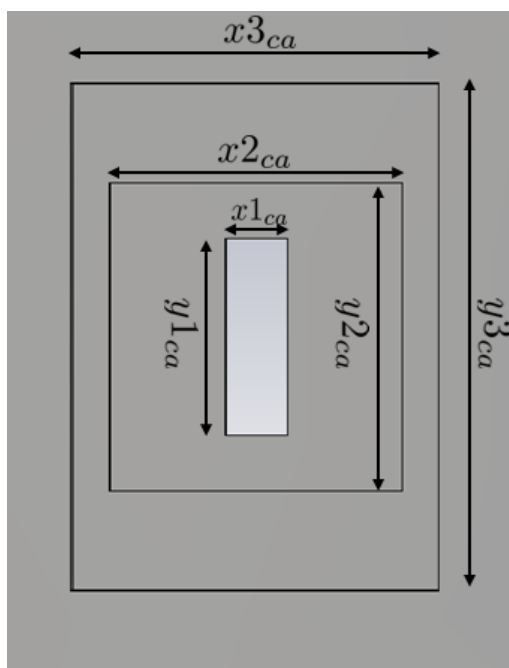


Figura 4.16: Dimensiones x e y de las cavidades de la capa de acoplo.

prototipo inicial se ha construido la antena final mediante la aplicación de simetrías de orden superior, objetivo principal de este trabajo.

4.2. Diseño y optimización de la antena con simetría *glide*

Esta sección, como ya ha sido expuesto con anterioridad, define la antena final que se ha diseñado en el trabajo.

En primer lugar, siguiendo el estudio paramétrico que se realizó para el Capítulo III, se han seleccionado los valores de período, radio y altura de los agujeros a insertar. Los agujeros están repartidos por la parte superior de la capa de alimentación y por la parte inferior de la capa de acoplo. De tal manera que al introducir un hueco de aire entre ambas capas, el campo quede confinado y la antena funcione correctamente.

Las dimensiones de radio y período para ambas capas han sido las mismas, no así las alturas de los mismos, ya que al tener las capas alturas y una configuración diferentes no podían ser elegidas las mismas alturas. Se presenta ahora en la tabla 4.2 un resumen de los valores de los parámetros escogidos. Estos valores han sido escogidos según la forma de la antena prototipo. Tanto las dimensiones de la misma como la distribución de los elementos de cada capa han tenido gran relevancia ya que los agujeros según sus parámetros podían obstaculizar las guías de la onda de la capa de alimentación o interferir con las cavidades de la capa de acoplo. Previamente a su implementación en la antena, se simuló en una guía de onda convencional, de iguales medidas a la del prototipo, los valores de los agujeros para poder comprobar que efectivamente estos agujeros realizaban su función.

Tras conocer los valores óptimos, la segunda fase a la hora de diseñar la antena final,

Parámetro (mm)	Capa de alimentación	Capa de acoplo
Período	7.5	
Radio	3.2	
Altura	2.5	1.5

Tabla 4.2: Resumen de los valores de los parámetros en la configuración de los agujeros

ha sido implementarlos en las respectivas capas dejando un *gap* de aire de $50\ \mu\text{m}$ entre ambas.

Se comenzó por la capa de alimentación en la que se dispusieron los agujeros como se puede ver en la Fig. 4.17. A la hora de disponer los agujeros, se han tenido en cuenta algunos factores, como por ejemplo, la distancia a los extremos de la antena o la distancia al divisor 1 a 4. Ya que si estaban excesivamente cerca no funcionaba correctamente.

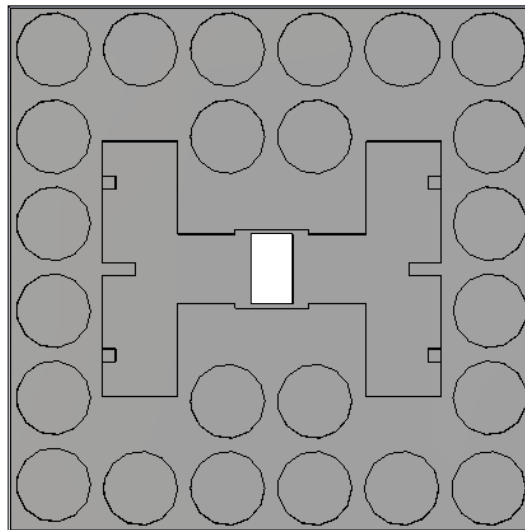


Figura 4.17: Vista superior de la capa de alimentación de la antena diseñada.

Una vez se ha diseñado la capa de alimentación, el siguiente paso consiste en realizar la implementación de los agujeros en la parte inferior capa de acoplo. En la Fig. 4.18 se puede ver la disposición de los mismos. Han sido colocados siguiendo los fundamentos de la simetría *glide*, esto es, reflexión y traslación. Se ha optado por un arreglo similar al que se puede observar en [66]. Esta disposición agujeros entrelazados se puede ver en la Fig. 4.19, en la cual los agujeros rojos son los de la capa de alimentación y los negros los de la capa de acoplo.

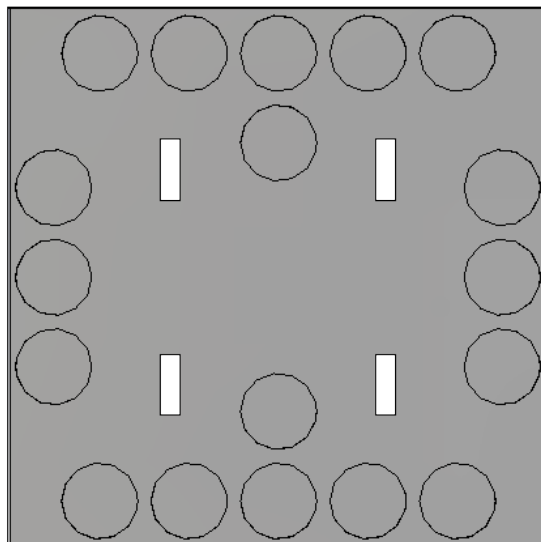


Figura 4.18: Vista inferior de la capa de acoplo de la antena diseñada.

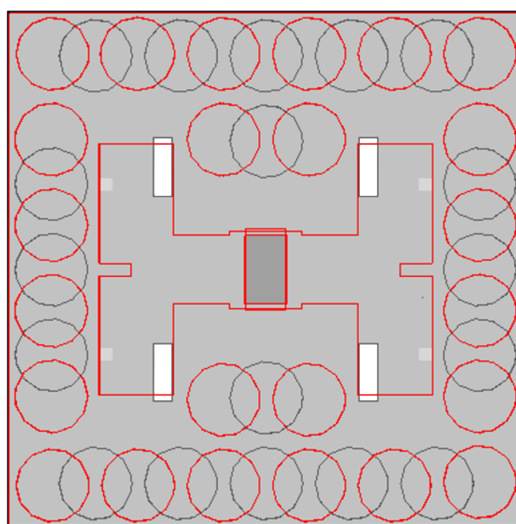


Figura 4.19: Vista de la disposición de los agujeros entrelazados.

Tras haber dispuesto todos los agujeros de la antena, a continuación se detallan los resultados simulados de la antena. Se expone primero el parámetro S_{11} , después se visualiza el diagrama de radiación junto con los comentarios de los parámetros más relevantes del mismo. Además se muestra la distribución del campo eléctrico en algunas capas así como por la antena en su conjunto. Por último, se establece una comparativa de estos valores comentados de ambas antenas.

En primer lugar, el S_{11} es el que se muestra en la Fig. 4.20, en un principio se había tratado de que estuviera por debajo de -10 dB pero debido a la gran utilidad de los agujeros se ha conseguido reducirlo y dejar un gran margen hasta los -14 dB en toda la banda de frecuencias prácticamente.

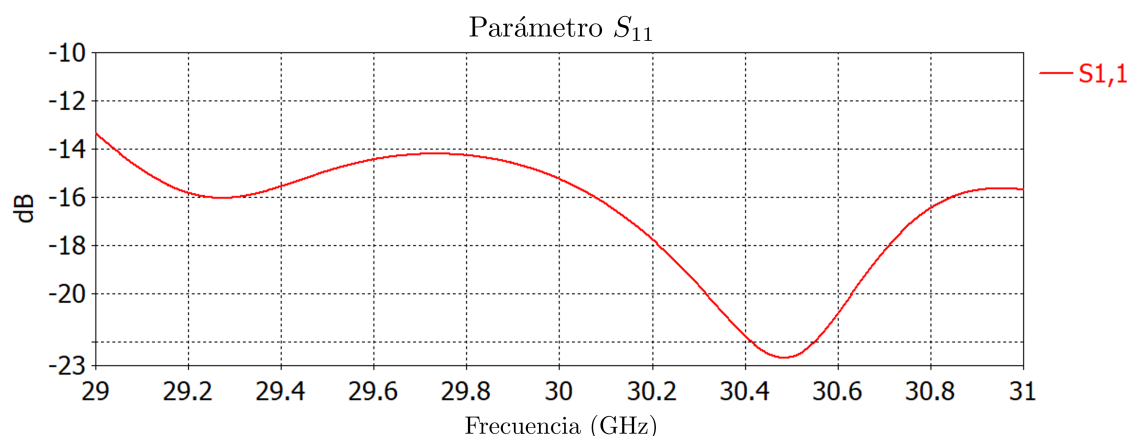


Figura 4.20: Parámetro S_{11} de la antena.

A continuación, del diagrama de radiación, que es equivalente al de la anterior antena, se obtienen los parámetros comentados antes. El NLPS, el ancho de haz a menos 3 dB y la directividad toman exactamente los mismos valores que el prototipo. Por lo que no hace falta volver a mostrar estas gráficas. Estos resultados indican que pese a haber dejado un *gap* de aire, que no tiene por qué haber sido intencionado sino un defecto de fabricación, el funcionamiento de la antena es idéntico al prototipo ideal.

Sin embargo en este caso sí que cambia la eficiencia que ahora toma el valor de -0.6262 dB, lo que equivale a 86.6 % en lineal. Esa eficiencia es bastante positiva ya que la antena sin los agujeros y con este hueco entre las capas otorga una eficiencia del 65 % bastante más baja que la anterior. Esto quiere decir que el hecho de haber introducido los agujeros hace que aumente la eficiencia de la antena en más de un 20 %, debido a que el campo ahora no se está fugando. Estas prestaciones hacen que, como se ha comentado antes esta antena sea idónea para la implementación en pseudo-satélites. El cambio que sufre la eficiencia entre las dos antenas provoca que la antena diseñada tenga una ganancia menor que la ideal. Esto es debido a la forma en la que se relacionan la ganancia y la directividad, tal y como fue expuesto en el capítulo introductorio. Para la antena diseñada la ganancia es de 20.62 dBi, en cambio la del prototipo es de 21.29 dBi.

En tercer lugar, se muestra la distribución del campo eléctrico en diferentes capas y luego en su conjunto visto de perfil como en el caso del prototipo. Para comenzar, la primera tiene una distribución que se puede ver en la Fig. 4.21. En base a esta figura se aprecia como los agujeros realizan su función, contener al campo y evitar las fugas.

Se presentan además conjuntamente las distribuciones del campo en la capa de acoplo (Fig. 4.23), la capa radiante (Fig. 4.22) y de toda la antena en su conjunto (Fig. 4.24).

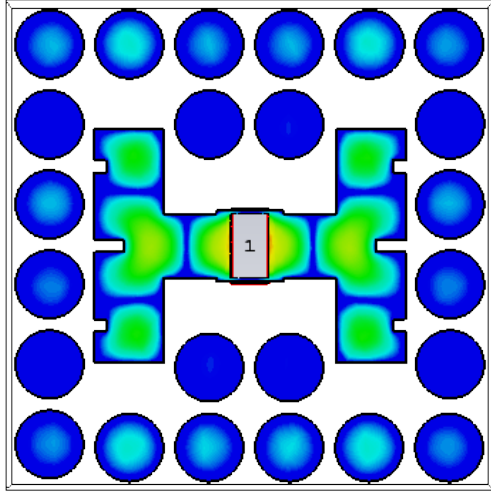


Figura 4.21: Distribución del campo eléctrico en la capa de alimentación.

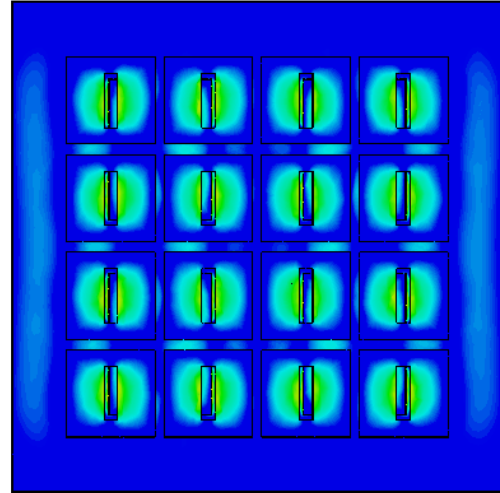


Figura 4.22: Distribución del campo eléctrico en la capa radiante.

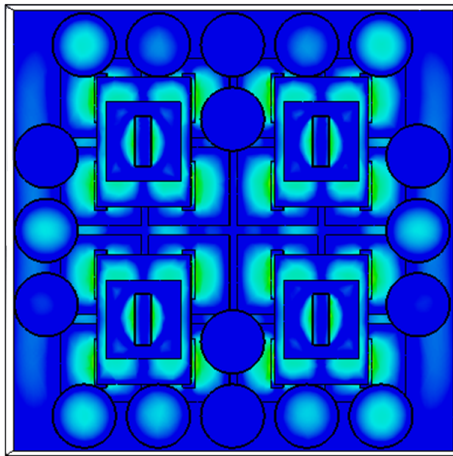


Figura 4.23: Distribución del campo eléctrico en la capa de acoplo.

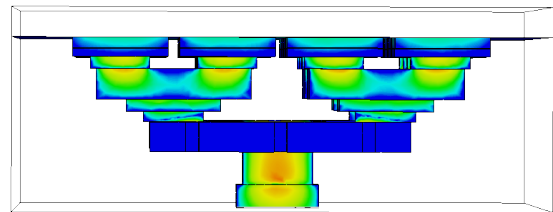


Figura 4.24: Distribución del campo eléctrico en la antena.

Por último, para cerrar este apartado, se presenta en la tabla 4.3 una comparativa de los parámetros más relevantes de cada antena.

Parámetro	A. Inicial	A. Final
NLPS (dB)	-12.6	
θ_{-3dB} (°)	14.1	
S_{11} (dB)	< -10	< -14
Ganancia (dBi)	21.29	20.62
η_{rad} (%)	96.3	89.1
η_{total} (%)	94.48	86.6
Directividad (dBi)	21.13	

Tabla 4.3: Resumen comparativo de los parámetros de las antenas a 30 GHz.

4.3. Aplicación en sistemas *HAPS*

Tras haber analizado la antena objeto de diseño y visto sus parámetros más relevantes, se procede a explicar cómo esta antena se va implementar en los sistemas *HAPS* descritos al inicio del trabajo.

Se toma como punto de partida la ecuación de transmisión de Friis en escala logarítmica. Para este caso, se han descartado varios agentes que podrían afectar en la transmisión, entre ellos, la refracción en la troposfera, la atenuación atmosférica y la atenuación por hidrometeoros. Además se ha descartado el efecto de la propagación ionosférica porque para frecuencias superiores a 30 MHz no se considera [67]. Junto con esto se ha despreciado el efecto del ruido y de las interferencias. Pese a esto, el modelo de Friis es un gran método de estimación de la señal recibida.

$$P_R(dBm) = P_E(dBm) + G_T(dB) + G_R(dB) - 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (4.2)$$

En la que P_R representa la potencia recibida por el receptor, P_T la transmitida, G_R , la ganancia del receptor, G_T la ganancia del transmisor y el factor logarítmico que va restando son las pérdidas de propagación espacio libre. En este factor, λ es la longitud de onda de operación que en este caso será la equivalente a una frecuencia de 30 GHz, y la R la distancia que separa ambas antenas. Para el análisis se tomará como ganancia 20.62 dBi y una distancia típica de 19.5 km, ya que [68] muestra que la altura actual típica está entre 17 y 22 km, y se ha optado por escoger el punto medio entre estas alturas.

Teniendo en cuenta todos estos parámetros, y siguiendo las recomendaciones de la ITU en cuanto a las características del enlace, se obtiene una $P_R = -77,345$ dBm, que está por encima de la sensibilidad que marca el ejemplo típico de la ITU [69].

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se exponen las conclusiones finales de este trabajo, extraídas de la investigación y la simulación, además se explicarán juntamente algún posible desarrollo futuro de esta antena y su implementación en las plataformas de alta altitud.

En el **Capítulo 1** se ha explicado el papel tan esencial que juegan las antenas en las comunicaciones y que se entiende por antena. Junto con esto, se han analizado los parámetros más importantes desde el punto de vista de la aplicación directa al trabajo. Se ofrece a la par un esbozo sobre posibles aplicaciones de los sistemas *HAPS* en nuestro día a día en línea con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En el **Capítulo 2**, se han estudiado en profundidad las plataformas *HAPS*. Comenzando por sus aplicaciones actuales, entre las que destaca en gran medida la ayuda a la mejora continua de las infraestructuras y a las zonas menos desarrolladas. Además se ha establecido una comparativa con sus homólogos de más altitud, los satélites, analizando en profundidad qué prestaciones tienen y cómo estas plataformas pueden suponer un gran cambio en el panorama actual de las telecomunicaciones debido a la mejora de factores críticos de los satélites. También se expone la actualidad en el desarrollo de esta tecnología a nivel nacional e internacional y para finalizar, su futura aplicación en redes 6G.

El **Capítulo 3** muestra el estudio de las simetrías de orden superior, el uso de éstas desde hace más de 700 años en diferentes campos y su reciente aplicación desde el siglo pasado en las primeras estructuras electromagnéticas. Junto con esto, se han expuesto las aplicaciones actuales de estas simetrías en, por ejemplo, la tecnología *gap waveguide* o en los filtros de microondas. Además se ha hecho un estudio paramétrico de los factores que más afectan en los agujeros para el confinado de la onda y se ha visto la efectividad de los mismos al simular una guía de onda con esta tecnología y sin ella, dejando un hueco entre las placas para ver que estos cumplen su función.

Para concluir, en el **Capítulo 4**, se ha diseñado un prototipo de antena para comunicaciones espaciales al que posteriormente, tras un proceso de optimización, se le han añadido los agujeros con la simetría de desplazamiento. A continuación, tras añadir dichos agujeros y optimizar la antena final, se ha comprobado que son de gran utilidad para evitar las fugas. Para finalizar se ha expuesto la aplicación en los sistemas *HAPS* y se ha comprobado que podría producirse la transmisión correcta de la señal según los parámetros y condiciones que establece la ITU para un caso típico.

Líneas futuras

El trabajo crea un buen punto de partida, y abre puertas para futuros desarrollos. Tanto la tecnología Gap Waveguide como la *Glide Symmetry* tienen todavía caminos por explorar y potenciales aplicaciones en la banda de milimétricas (diseños más compactos, más eficientes, más ligeros, de menor perfil y en general con incluso mejores prestaciones). Particularizando en el trabajo realizado se proponen las siguientes líneas futuras:

- El diseño de la antena presentado tiene polarización lineal. Un posible desarrollo futuro consistiría en integrar polarizadores o usar metasuperficies en la capa superior para transformar la polarización y convertir la polarización lineal en circular.
- Con respecto a la fabricación de la antena, el diseño ha sido pensado para ser fabricado en CNC. Una alternativa a considerar sería un ligero rediseño de la antena considerando también como alternativa la fabricación 3D. Algunas técnicas que podrían usarse efectivamente para fabricar la antena serían el modelado por deposición fundida (FDM), la estereolitografía (SLA), fusión selectiva por láser (LSM) o la inyección aglutinante, más conocida como *Binder Jetting* (BJ).
- Otro posible campo de desarrollo es el uso de la otra tecnología de orden superior. Particularmente, propondría la *twist symmetry*. Esta tecnología implica el uso de simetría que están aún por explotar.
- En último lugar, y en relación con la antena diseñada, podrían crearse estructuras híbridas. En la práctica consistiría en fabricar pines a partir del solapamiento entre agujeros. Es decir, si el periodo entre agujeros es menor que el diámetro de dichos agujeros se crean unos pines de paredes redondeadas de muy fácil fabricación. Un ejemplo de esto se puede ver en la Fig.5.1.

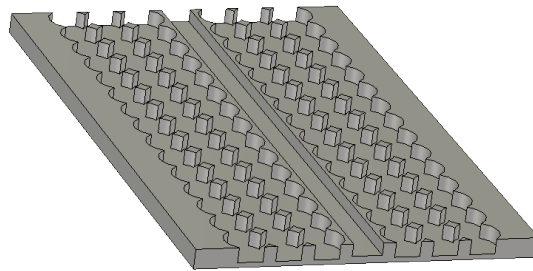


Figura 5.1: Diseño de pines mediante agujeros y simetría *glide*

Bibliografía

- [1] José Manuel Huidobro. “Antenas de telecomunicaciones”. En: *Revista digital de acta* 18 (2013).
- [2] “IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas”. En: *IEEE Std 145-1983* (1983), págs. 1-31. DOI: 10.1109/IEEESTD.1983.82386.
- [3] Alicia López Sánchez et al. “DISEÑO DE ANTENA REFLECTARRAY DE POLARIZACIÓN CIRCULAR PARA MISIONES CUBESAT DE ESPACIO PROFUNDO”. En: (2023).
- [4] Pramod Dhande. “Antennas and its Applications”. En: *DRDO Science Spectrum* (2009), págs. 66-78.
- [5] International Telecommunication Union. “Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications”. En: (ago. de 2015). Recommendation ITU-R V.431-8.
- [6] Emilio Monachesi et al. “Conceptos generales de Antenas”. En: *Recuperado de: http://www.edutecne.utn.edu.ar/wlan_frt/antenas.pdf* (2011), pág. 20.
- [7] Porter S.A. *Tipos de antenas y sus características: una guía completa*. Consultado: 29 de mayo de 2024. 2023. URL: <https://www.portersa.com/tipos-de-antenas/>.
- [8] Ahmed A Kishk. “Fundamentals of antennas”. En: *Antennas for base stations in wireless communications*. Vol. 1. The McGraw Hill Companies, 2009, pág. 13.
- [9] José Manuel Huidobro. “Antenas de telecomunicaciones”. En: *Revista digital de acta* 18 (2013).
- [10] Magdalena Ivars Soriano et al. “Integración de IA y RPAS en la vigilancia portuaria: desarrollo, aplicaciones y perspectivas en el contexto español”. En: (2024).
- [11] Sara Byala. “WATER, WASTE, ENERGY”. En: (2018).
- [12] Alice Morandin. “Responsabilità sociale d’impresa: il caso” The Coca-Cola Company”. En: ().
- [13] *HAPS – High-altitude platform systems*. URL: <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx>.
- [14] *HAPS, los híbridos entre satélite y dron que usará la ESA para ampliar la exploración y mejorar las comunicaciones*. URL: <https://www.xataka.com/espacio/haps-los-hibridos-entre-satelite-y-dron-que-usara-la-esa-para-ampliar-la-exploracion-y-mejorar-las-comunicaciones>.

-
- [15] Dong Zhou et al. “Overview of development and regulatory aspects of high altitude platform system”. En: (2020).
- [16] GSMA. “High Altitude Platform Systems Towers in the Skies”. En: (2021).
- [17] *Broadband Commission urges collaborative action to accelerate connectivity and progress on Sustainable Development Goals*. 2023. URL: <https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/PR-2023-09-16-Broadband-Commission-annual-fall-meeting.aspx>.
- [18] Takehiro Nakamura. “5G Evolution and 6G”. En: *2020 IEEE symposium on VLSI technology*. IEEE. 2020, págs. 1-5.
- [19] Gerard Papaseit Bielsa. “HAPS-High Altitude Platform Stations: Análisis y simulación de sistemas de comunicaciones mediante haps”. En: (2010).
- [20] Md Sahabul Alam et al. “High altitude platform station based super macro base station constellations”. En: *IEEE Communications Magazine* 59.1 (2021), págs. 103-109.
- [21] Flavio Araripe d’Oliveira, Francisco Cristovão Lourenço de Melo y Tessaleno Campos Devezas. “High-altitude platforms—Present situation and technology trends”. En: *Journal of Aerospace Technology and Management* 8 (2016), págs. 249-262.
- [22] Jesús Gonzalo et al. “On the capabilities and limitations of high altitude pseudo-satellites”. En: *Progress in Aerospace Sciences* 98 (2018), págs. 37-56.
- [23] *Thales Alenia Space anuncia la firma del contrato con la comisión europea y el arranque del proyecyo Eurohaps para la demostración de plataformas estratoféricas*. URL: https://www.thalesgroup.com/es/el-mundo/space/press_release/thales-alenia-space-anuncia-firma-del-contrato-con-comision-europea-el.
- [24] *Experimental Zephyr drone sets new record for uncrewed flight duration*. URL: <https://www.space.com/airbus-zephyr-drone-long-endurance-flight-record>.
- [25] *smartHAPS presentó al Ministerio de Defensa su solución de vigilancia aérea D’ICARO*. 2021. URL: <https://actualidad aeroespacial.com/smarthaps-presento-al-ministerio-de-defensa-su-solucion-de-vigilancia-aerea-dicaro/>.
- [26] *Canarias Stratoport for HAPS and UAS, un proyecto para diversificar la economía de Fuerteventura*. URL: <https://diariodefuerteventura.com/noticia/canarias-stratoport-haps-uas-un-proyecto-para-diversificar-la-econom%C3%ADa-de-fuerteventura>.
- [27] *CANARIAS GEO INNOVATION PROGRAM 2030*. URL: <https://canarias-geo-innovation.com/proyectos/>.
- [28] *Fuerteventura, Canary Islands, releases plans for HAPS stratoport*. URL: <https://www.unmannedairspace.info/latest-news-and-information/fuerteventura-canary-islands-releases-plans-for-haps-stratoport/>.
- [29] Barry Prentice. “Snow blindness: Airships in Canada’s northern transportation policy”. En: (2022).
- [30] A. Royo. *Dos empresas con sede en Irlanda optan a operar el hangar de pintura del Aeropuerto de Teruel*. URL: <https://www.diariodeteruel.es/teruel/dos-empresas-con-sede-en-irlanda-optan-a-operar-el-hangar-de-pintura-del-aeropuerto-de-teruel>.
-

- [31] *SCEYE*. URL: <https://www.sceye.com/>.
- [32] John C Chandy. “Desafíos en el diseño de sistemas Ciber-Físicos”. En: *Ingenierías USBMed* 1.1 (2010), págs. 6-14.
- [33] Gunes Karabulut Kurt et al. “A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future”. En: *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 23.2 (2021), págs. 729-779. DOI: 10.1109/COMST.2021.3066905.
- [34] Benjamin M Waggoner. “Phylogenetic hypotheses of the relationships of arthropods to Precambrian and Cambrian problematic fossil taxa”. En: *Systematic Biology* 45.2 (1996), págs. 190-222.
- [35] ALEXANDER Hessel et al. “Propagation in periodically loaded waveguides with higher symmetries”. En: *Proceedings of the IEEE* 61.2 (1973), págs. 183-195.
- [36] Raj Mittra y S Laxpati. “Propagation in a wave guide with glide reflection symmetry”. En: *Canadian Journal of Physics* 43.2 (1965), págs. 353-372.
- [37] PJ Crepeau y Paul R McIsaac. “Consequences of symmetry in periodic structures”. En: *Proceedings of the IEEE* 52.1 (1964), págs. 33-43.
- [38] Miroslav Lovric. “Magic geometry: mosaics in the Alhambra”. En: (2009).
- [39] Jose Luis Medran del Rio. *Study of the effects of applying higher symmetries to printed filters*. 2018.
- [40] Alba Rosa González y Libni Berenice. “El estudio de la simetría en la formación inicial de docentes”. En: (2017).
- [41] Oscar Quevedo-Teruel, Mahsa Ebrahimpouri y Malcolm Ng Mou Kehn. “Ultrawideband Metasurface Lenses Based on Off-Shifted Opposite Layers”. En: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 15 (2016), págs. 484-487. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2492678.
- [42] Eva Rajo-Iglesias, Mahsa Ebrahimpouri y Oscar Quevedo-Teruel. “Wideband Phase Shifter in Groove Gap Waveguide Technology Implemented With Glide-Symmetric Holey EBG”. En: *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 28.6 (2018), págs. 476-478. DOI: 10.1109/LMWC.2018.2832013.
- [43] O Dahlberg, RC Mitchell-Thomas y Oscar Quevedo-Teruel. “Reducing the dispersion of periodic structures with twist and polar glide symmetries”. En: *Scientific reports* 7.1 (2017), pág. 10136.
- [44] Alejandro Valero-Nogueira et al. “Switchable RHCP/LHCP slotted waveguide array antenna for SATCOM on-the-move applications in Ka-band”. En: *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*. IEEE. 2014, págs. 2047-2051.
- [45] Jose I Herranz-Herruzo et al. “Low cost switchable RHCP/LHCP antenna for SOTM applications in Ka-band”. En: *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE. 2015, págs. 1-4.
- [46] JI Herranz-Herruzo et al. “LOCOMO satcom terminal: A switchable RHCP/LHCP Array Antenna for on-the-move applications in Ka-band”. En: *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. IEEE. 2015, págs. 210-211.

-
- [47] Antonio Berenguer et al. “A fast analysis method for the groove gap waveguide using transmission line theory”. En: *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE. 2016, págs. 1-5.
- [48] Miguel Ferrando-Rocher et al. “Groove gap waveguides: A contactless solution for multilayer slotted-waveguide array antenna assembly”. En: *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE. 2016, págs. 1-4.
- [49] Miguel Ferrando-Rocher et al. “Circularly polarized slotted waveguide array with improved axial ratio performance”. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 64.9 (2016), págs. 4144-4148.
- [50] Jose I Herranz-Herruzo, Miguel Ferrando-Rocher y Alejandro Valero-Nogueira. “Multimode Coupled Slots for Wideband Circularly-Polarized mm-Wave All-Metal Antennas”. En: *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*. IEEE. 2022, págs. 399-400.
- [51] Debasis Dawn, Yoji Ohashi y Toshihiro Shimura. “A novel electromagnetic bandgap metal plate for parallel plate mode suppression in shielded structures”. En: *IEEE microwave and wireless components letters* 12.5 (2002), págs. 166-168.
- [52] Angel Palomares-Caballero et al. “Compact and low-loss V-band waveguide phase shifter based on glide-symmetric pin configuration”. En: *IEEE Access* 7 (2019), págs. 31297-31304.
- [53] Pablo Padilla et al. “Broken glide-symmetric holey structures for bandgap selection in gap-waveguide technology”. En: *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 29.5 (2019), págs. 327-329.
- [54] Angel Palomares-Caballero et al. “Millimeter-wave 3-D-printed antenna array based on gap-waveguide technology and split E-plane waveguide”. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 69.1 (2020), págs. 164-172.
- [55] Oscar Quevedo-Teruel et al. “Periodic structures with higher symmetries: Their applications in electromagnetic devices”. En: *IEEE Microwave Magazine* 21.11 (2020), págs. 36-49.
- [56] Oscar Quevedo-Teruel et al. “On the benefits of glide symmetries for microwave devices”. En: *IEEE Journal of Microwaves* 1.1 (2021), págs. 457-469.
- [57] Boules A Mouris et al. “On the increment of the bandwidth of mushroom-type EBG structures with glide symmetry”. En: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 68.4 (2020), págs. 1365-1375.
- [58] Jin Jei Wu et al. “Propagation of Low-Frequency Spoof Surface Plasmon Polaritons in a Bilateral Cross-Metal Diaphragm Channel Waveguide in the Absence of Bandgap”. En: *IEEE Photonics Journal* 7.1 (2015), págs. 1-8. DOI: 10.1109/JPHOT.2015.2392382.
- [59] Eva Rajo-Iglesias, Miguel Ferrando-Rocher y Ashraf Uz Zaman. “Gap Waveguide Technology for Millimeter-Wave Antenna Systems”. En: *IEEE Communications Magazine* 56.7 (2018), págs. 14-20. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700998.
- [60] Mahsa Ebrahimpouri, Oscar Quevedo-Teruel y Eva Rajo-Iglesias. “Design guidelines for gap waveguide technology based on glide-symmetric holey structures”. En: *IEEE microwave and wireless components letters* 27.6 (2017), págs. 542-544.
-

- [61] Mahsa Ebrahimpouri et al. “Using Glide-Symmetric Holes to Reduce Leakage Between Waveguide Flanges”. En: *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 28.6 (2018), págs. 473-475. DOI: 10.1109/LMWC.2018.2824563.
- [62] Piotr Gas. “Optimization of multi-slot coaxial antennas for microwave therapy based on the S11-parameter analysis”. En: *Biocybernetics and biomedical engineering* 37.1 (2017), págs. 78-93.
- [63] Miguel Ferrando-Rocher. “Antena monopulso compacta de una sola capa en banda Ka con tecnología Gap Waveguide”. En: (2021).
- [64] Miguel Ferrando-Rocher et al. “Single-layer circularly-polarized *Ka*-band antenna using gap waveguide technology”. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 66.8 (2018), págs. 3837-3845.
- [65] Eduardo Marrero Fernández y Daryl Ortega González. “DISEÑO DE UNA ANTE-NA HOLOGRÁFICA SIMPLE CAPA EN LA BANDA KA 30 GHZ”. En: *Revista Telemática. Vol 19.3* (2020), págs. 1-10.
- [66] Qiao Chen et al. “Glide-Symmetric Holey Leaky-Wave Antenna With Low Dispersion for 60 GHz Point-to-Point Communications”. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 68.3 (2020), págs. 1925-1936. DOI: 10.1109/TAP.2019.2944535.
- [67] Matías Ecija Fernández. “Proceso de replanteo, instalación y certificación de la tecnología LTE”. Tesis doct. Universitat Politècnica de València, 2019.
- [68] Javier Luque Ordóñez. “Comunicaciones por satélite”. En: *Revista Digital de ACTA* 19 (2013).
- [69] ITU-R. “Rec. ITU-R F.1569-0: Frequency and distance separation between stations in the fixed service”. En: (2002). URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/f/R-REC-F.1569-0-200205-I!!PDF-S.pdf.
- [70] Organización de las Naciones Unidas. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Consultado el: 28 de mayo de 2024. 2024. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

Parte I

Anexo

Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU

En el año 2000, fueron aprobados los Objetivos de Desarrollo del Milenio, que eran ocho. Los siete primeros buscaban ayudar a los países en vías de desarrollo y el último era para incrementar la asistencia en los países más desarrollados. Tras esto, una vez vencido el plazo de los ODM, surgen los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), implementados en 17 objetivos y 169 metas. En la Fig.1 podemos ver los actuales objetivos.



Figura 1: Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU [70].

En relación con el trabajo, se puede establecer relación con varios de los objetivos que se han expuesto.

Con respecto al uso de las plataformas *HAPS*, se puede concluir que guardan relación con el ODS 13 (Acción por el clima) y el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), ambos pilares claves en el desarrollo de la Agenda 2030. Los sistemas *HAPS* usan energía renovable, como se ha comentado en el capítulo II, y la utilización de placas solares ayudan al cumplimiento de ambos objetivos. Del mismo modo estas placas solares contribuyen al cumplimiento del ODS 13 ya que reducen la emisión de gases de efecto invernadero. Dichas plataformas además contribuyen a la reducción de la huella ecológica y, debido a su altura de operación y sus atributos, pueden ser unos buenos sustitutos de los satélites en algunos casos reduciendo así la huella de carbono.

Junto con estos objetivos el uso de estos pseudosatélites contribuyen a alcanzar el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructuras), ya que suponen una innovación tecnológica, y mejoras respecto a los satélites, menor latencia, menores pérdidas y servicios con mayor ancho de banda. Además esta innovación no es exclusiva de estas plataformas sino que contribuyen conjuntamente a la mejora de otros sectores. Junto con esto, dichos sistemas ayudan también a la mejora de las infraestructuras de telecomunicaciones.

Por lo tanto se puede observar como el trabajo está muy ligado y comprometido con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas. Sigue siendo necesario un gran esfuerzo conjunto y continuado para la implementación total de la Agenda 2030.