

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**DESARROLLO DE UNA ANTENA BANDA ANCHA PARA  
SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE.**

**María Pablo Fernández**  
**Tutor: Miguel Alejandro Salas Natera**  
**Ponente: José Luís Masa Campos**

**Julio 2017**



# **DESARROLLO DE UNA ANTENA BANDA ANCHA PARA SISTEMAS DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE.**

**AUTOR: María Pablo Fernández  
TUTOR: Miguel Alejandro Salas Natera  
PONENTE: José Luís Masa Campos**

**Grupo de Radiofrecuencia, Antenas, Circuitos y Sistemas  
Dpto. de Tecnologías Electrónicas y de Comunicaciones  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad Autónoma de Madrid  
Julio de 2017**





# Resumen (castellano)

Este Trabajo Fin de Grado trata sobre las implementaciones de mejoras al sistema diseñado como continuación del proyecto “Diseño de antenas para estaciones de GPS mediante parametrización de las corrugaciones de choke” [1]. Estas mejoras pasan por el diseño e implementación de un nuevo elemento radiante que cubra todas las bandas de los sistemas GNSS actuales y futuros, y la definición de una alimentación para polarización circular más apropiada para mejorar la relación axial de la antena.

El objetivo principal de ese proyecto es implementar un sistema capaz de recibir las señales de las bandas comprendidas entre las frecuencias de 1.15 – 1.65 GHz, por medio de sistemas con estructuras de chokes 3D para la eliminación de los efectos multi-trayecto<sup>1</sup> y ondas de bajo nivel de incidencia sobre la estructura.

El sistema de antena de referencia anterior para GPS ha sido diseñado con una estructura de chokes 3D y un parche circular apilado con polarización circular a derechas, (RHCP). Por tanto, en este trabajo de fin de grado se busca la mejora de dicho parche para obtener un ancho de banda mayor comprendido entre 1.15 – 1.65 GHz, para las señales L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5 Y E6.

Por lo anterior, es necesaria la optimización del ancho de banda y de su ancho de haz en el diagrama de radiación mediante la parametrización de los elementos finales que componen el parche.

Intentando mejorar también la disminución del rizado en el centro de fase, obteniendo un centro de fase estable, y con ello la mejora de la ubicación en los diferentes sistemas de navegación.

Los pasos seguidos en esta memoria son: en primer lugar, la explicación de los diferentes conceptos necesarios para el estudio y realización del sistema final, entre los que se comprende cada uno de los conceptos de antenas y el concepto de chokes 3D junto con las mejoras que presta esta estructura al sistema.

En segundo lugar, realizar la búsqueda y estudiar los elementos capaces de cumplir con los requisitos, donde se ha obtenido un elemento de parche circular diseñado por los autores en el documento [1].

Este elemento se implementa con las condiciones creadas por el autor, y una vez visualizada la respuesta final se buscan las modificaciones necesarias para terminar de cumplir con los requisitos. Estas modificaciones son la introducción de cuatro coaxiales para la implementación de un sistema con polarización circular a derechas.

En tercer lugar, tras diseñar este primer parche se estudia y se diseñan diversos elementos capaces de mejorar la respuesta en los parámetros S11, del diagrama de radiación y sobre todo la mejora del centro de fase final, el cual es necesario que sea estable para una correcta obtención de la ubicación final en los sistemas de navegación. Estas modificaciones hacen obtener un elemento radiante compuesto por un parche simple con dipolos parásitos apilados capaces de mejorar dicho centro de fase.

Finalmente, tras la implementación de dicho parche con las características mencionadas se implementa el sistema final compuesto por el parche y la estructura de chokes 3D, nombrada

---

<sup>1</sup> Multi-trayecto: efectos creados por reflexiones en objetos u obstáculos adyacentes al sistema.

anteriormente, para el estudio final de las soluciones y visualización de las posibles líneas futuras de investigación con el objetivo de mejorar los sistemas de navegación por satélite.

# Abstract (English)

This bachelor thesis is about the improvement of a system “Antennas design for GPS stations through parametrization of choke corrugations”. [1] These improvements include the design and implementation of a new radiant element that covers all bands of current and future GNSS systems. And define the new circular polarization feed to improve the axial ratio of the antenna.

The aim of this work is to implement a system which receives some of the signal existing in GNSS systems, with frequencies in the range between 1.15 to 1.65 GHz. This goal is achieved through a structure of 3D Chokes. The structure 3D Chokes can regulate multipath effects and low-level waves that fall upon the structure to improve bandwidth and phase center.

The structure has been implemented with 3D chokes and a stacked circular patch with right circular polarization. As part of enhancement proposal from 2015-16 project, this improvement consists on increasing the bandwidth range to capture the signal's, L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5, E6, in some frequencies between 1.15 to 1.65 GHz. The aim is to optimize the bandwidth and beamwidth in the radiation diagram by modifying the parameters of all the elements included in the radiation patch.

Also, another improvements are to decrease the ripple in the phase center and achieving a satisfactory localization in the satellite navigation system by enhancing the stability of the phase center.

The steps followed in this bachelor thesis are first, the explanation of concepts about antennas for good understanding and background, including the concept of 3D chokes and the improvements that it brings to previous proposed 2D solutions. And second, the explanation of radiant elements needed to meet the required specifications.

Secondly, the initial analysis and this study chose to apply a circular patch as the final case of study, fully proposed and designed by the creators of this thesis [1].

After implementing this patch, some modifications are needed to meet our requirements, such as the introduction of four coaxial elements to implement a circular polarization system.

In third place after obtaining the circular polarization new elements capable of improving the characteristics are mentioned. The modifications are a circular patch stacked and dipoles parasites to meet a improve in a phase center.

The next step after the first patch is designed, few new elements are studied and designed. These elements are capable of improving the S parameters response and the radiation diagram, enhancing mostly the final phase center of the Navigation systems. These improvements are built by inserting a stacked patch and parasite dipoles both capable of improving the phase center.

Finally, after the final radiant element is finished, the last step is done. This step consists in the implementation of the radiant element together with the structure of 3D chokes.

After visualizing the results, we proceed to the extraction of the conclusions and the possible improvements to be made in the future time.

## **Palabras clave (castellano)**

Antena de Choke, chokes 3D, parche circular, parámetros S, diagrama de radiación, centro de fase, dipolos, parche apilado, alimentadores, filamentos, conector SMA, GPS, GNSS, GALILEO, GLONASS, EGNOS, WASS, COMPASS, QZSS, multi-trayecto, polarización circular a derechas RHCP, monopolo sinusoidal, relación axial, componente copolar, componente contrapolar.

## **Keywords (inglés)**

Choke ring antenna, Chokes 3D, Circular patch, S-parameters, radiation pattern, Phase Center, dipoles, patch stacked, feeds, filaments, SMA connector, GPS, GNSS, GALILEO, GLONASS, EGNOS, WASS, COMPASS, QZSS, Multipath, Right circular polarization RHCP, Monolith, Axial Relationship, copolar component, countercopolar component.



## ***Agradecimientos***

*Después de 5 largos años me dispongo a escribir estas líneas acordándome de todas las personas que han estado a mi lado, tanto en las buenas como en las malas, y es de agradecer porque ha sido un largo camino, con muchos altibajos, con gente que siempre me ha dado su mano para seguir adelante.*

*En primer lugar, quería agradecer a mi tutor Miguel Salas por ofrecerme la oportunidad de realizar este trabajo, por su paciencia, su ayuda, por sus ánimos constantes. Y por todos los consejos que me ha hecho de cara al futuro. Gracias por todo.*

*También quiero agradecer a todas esas personas que he conocido en la universidad, porque puedo decir que son buenos amigos con los que muchas veces he pasado más tiempo que con mi familia. Por esos momentos de agobios comunes, pero también con momentos de risas. De esas personas que he conocido en la universidad quiero agradecer en especial a dos de ellas, Irene y Mamen, Gracias por todo, hoy puedo decir que tengo dos hermanas que me apoyan en todo, de esas amigas que están para lo bueno y para lo malo. Gracias sobre todo por estar a mi lado este último año. Y por aguantarme que no es fácil.*

*Otras de las personas a las que tengo que agradecer es a mis “Maleconas” que, aunque cada una esté en un lugar diferente, siempre están ahí. Gracias por esos momentos de risas, por la recarga de energías que me dais siempre, y gracias por creer en mí y darme los ánimos que necesitaba en muchos momentos. También agradecer a una de mis compis de piso Cris, bendito destino que nos hizo cruzarnos. Gracias gema.*

*Y por último quiero agradecer a las personas más importantes de mi vida, mi familia. A mis padres por vuestro apoyo incondicional durante estos 23 años. Por creer en mí cuando ni yo lo hacía, por no dejarme que tirase la toalla, por aguantar esos cambios de humor y sobre todo por enseñarme que con esfuerzo y constancia todo se consigue. Después de mis padres quiero agradecer a mis hermanos, Jorge y Lucía, porque vosotros siempre habéis sido el espejo donde mirarme e inspirarme día a día. Por ser apoyos incondicionales. Se que a vuestro lado todo se puede y es mejor.*

*Gracias a todos por acompañarme en este camino llamado vida.*

*Con esto termino una etapa y doy comienzo a la búsqueda de nuevos caminos.*

*María Pablo Fernández*

*Junio 2017*



## INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Estado del arte .....	3
2.1	Alcance de la tecnología.....	3
2.1.1	Aplicaciones.....	3
2.2	Marco teórico.....	5
2.2.1	Concepto de antena.....	6
2.2.2	Bandas de frecuencias y longitud de onda.....	6
2.2.3	Parámetros circuitales.....	7
2.2.4	Parámetros direccionales.....	7
2.2.4.1	Polarización.....	8
2.2.4.2	Centro de fase.....	8
2.2.4.3	Parámetros S.....	8
2.2.4.4	Parámetro VSWR.....	9
2.3	Diseño.....	9
2.3.1	Técnicas de diseño.....	9
2.3.2	Diseños actuales.....	10
2.3.2.1	Tipos de Antenas.....	10
2.3.2.2	Ventajas de este diseño.....	13
2.3.3	Propuesta de diseño.....	14
3	Caso de estudio.....	15
3.1	Parámetros importantes para el análisis de diseño.....	15
3.1.1	Parámetros S11.....	15
3.1.2	Parámetro VSWR.....	15
3.1.3	Diagrama de radiación.....	15
3.1.4	Polarización.....	16
3.1.5	Centro de fase.....	16
3.2	Requisitos del sistema y Especificaciones de diseño.....	17
4	Diseño de antena.....	19
4.1	Revisión de los elementos radiantes candidatos.....	19
4.2	Selección de diseño.....	21
4.3	Descripción de los componentes de la antena seleccionada.....	22
4.3.1	Elemento radiante.....	22
4.3.2	Alimentación del elemento radiante.....	23
4.4	Descripción de la implementación de diseño inicial en CST.....	24
4.5	Diseño de componentes bajo estudio.....	24
4.5.1	Parche activo simple.....	25
4.5.2	Parche apilado.....	25
4.5.3	Parche con dipolos parásitos.....	25
4.6	Estructura con chokes 3D.....	25
5	Análisis de resultados.....	27
5.1	Resultados CST.....	27
5.1.1	Elemento radiante.....	27
5.1.2	Elemento radiante más estructura con chokes 3D.....	34
5.2	Conclusiones.....	39

5.3 Líneas futuras .....	40
Referencias .....	41
Glosario .....	- 1 -
Anexos.....	- 2 -
A        Sistemas de posicionamiento: GPS, GLONASS, EGNOS, WASS, GALILEO..	- 2 -
B        NDA .....	- 4 -
C        Chokes. ....	- 6 -
D        Elementos candidatos para GNSS .....	- 7 -
E        Sistemas Comerciales. ....	- 9 -
F        Explicación parámetros Circuitales y direccionales. ....	- 10 -
G        Herramientas de diseño .....	- 14 -
H        Herramientas de cálculo. ....	- 16 -
I        Descripción de la implementación en CST. ....	- 18 -
1 Elemento radiante .....	- 18 -
1.1 Parche activo.....	- 18 -
1.2 Parche Apilado .....	- 19 -
1.3 Parche con parásitos .....	- 19 -
2 Elemento de alimentación .....	- 21 -
J        Diseño de componentes bajo estudio.....	- 22 -
1. Parche activo.....	- 22 -
2. Parche apilado.....	- 24 -
3. Dipolos Parásitos. ....	- 26 -
3.1 Fase 1: Parche con dipolos. ....	- 27 -
3.2 Fase 2: Parche con dipolos sin parche apilado. ....	- 27 -
3.3 Fase 3: Modificación de dipolos.....	- 28 -
5.3.1 Alimentación .....	- 29 -
K        Comparativa de las bandas de frecuencia.....	- 32 -
L        Materiales. ....	- 32 -
M        Estructura de chokes 3D final.....	- 33 -
N        Construcción.....	- 35 -

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: ANTENA TRANSMISORA Y ANTENA RECEPTORA [9] .....	6
FIGURA 2-2: PARÁMETROS S.....	8
FIGURA 2-3: ANTENA DE PARCHES [9] .....	10
FIGURA 2-4: ANTENA LEAKY-WAVE [39] .....	11
FIGURA 2-5: ANTENA VERAPHASE.....	11
FIGURA 2-6: PARCHES CIRCULARES ALIMENTADOS POR SONDAS COAXIALES [18].....	12
FIGURA 2-7: PARCHES CIRCULARES CON ALIMENTACIÓN POR ACOPLAMIENTO [18].....	12
FIGURA 2-8: ANTENAS DE CHOKES [26].....	13

FIGURA 3-1: COMPONENTE COPOLAR DIAGRAMA DIRECTIVO [39].....	15
FIGURA 3-2: COMPONENTE COPOLAR RESPUESTA OMNIDIRECCIONAL [41] .....	16
FIGURA 3-3: CENTRO DE FASE [9] .....	16
FIGURA 4-1: CONECTOR SMA.....	24
FIGURA 4-2: ELEMENTO FINAL CON LA ESTRUCTURA DE CHOKES 3D.....	26
FIGURA 5-1: ELEMENTO FINAL, VISTA SUPERIOR Y PERFIL.....	27
FIGURA 5-2: PARÁMETROS S PARCHE INICIAL Y PARCHE FINAL.....	28
FIGURA 5-3: CARTA DE SMITH .....	28
FIGURA 5-4: FASE DE PARCHE ACTIVO SIMPLE Y PARCHE CON DIPOLOS APILADOS .....	29
FIGURA 5-5: COMPONENTE COPOLAR E PARA CADA SEÑAL COMPRENDIDA EN LA BANDA DE 1.15 – 1.65 GHz, PARA EL PARCHE ACTIVO SIMPLE.....	30
FIGURA 5-6: COMPONENTE COPOLAR E PARA CADA SEÑAL COMPRENDIDA DA EN LA BANDA DE 1.15 - 1.65 GHz, PARA EL ELEMENTO RADIANTE FINAL.....	30
FIGURA 5-7: COPOLAR H PARCHE ACTIVO SIMPLE .....	31
FIGURA 5-8: COPOLAR H ELEMENTO RADIANTE FINAL .....	31
FIGURA 5-9: VARIACIÓN DEL CENTRO DE FASE ENTRE LOS PARCHES SIMPLE Y EL ELEMENTO RADIANTE FINAL.....	33
FIGURA 5-10: VSWR DEL ELEMENTO INICIAL, PARCHE ACTIVO SIMPLE, Y EL ELEMENTO RADIANTE FINAL .....	33
FIGURA 5-11: VISTA ISÓMETRICA DEL ELEMENTO RADIANTE CON CHOKES 3D.....	34
FIGURA 5-12: PARÁMETROS S, ESTRUCTURA CON CHOKES 3D .....	35
FIGURA 5-13: FASES DE ELEMENTO RADIANTE Y ELEMENTO RADIANTE MÁS CHOKES 3D .....	35
FIGURA 5-14: CARTA DE SMITH ESTRUCTURA CON CHOKES 3D .....	36
FIGURA 5-15: RADIACIÓN COPOLAR CAMPO E PARA CADA SEÑAL DE LAS BANDAS GNSS.....	37
FIGURA 5-16: RADIACIÓN COPOLAR CAMPO H PARA CADA SEÑAL DE LAS BANDAS GNSS.....	37
FIGURA 5-17: VARIACIÓN DEL CENTRO DE FASE .....	38
FIGURA 5-18: VSWR ELEMENTO RADIANTE Y ELEMENTO CON ESTRUCTURA DE CHOKES 3D.....	39
FIGURA 0-1: ANTENA CON ACOPLADOR HÍBRIDO .....	- 5 -
FIGURA 0-2: ANTENA QUADRIFILAR HELICOIDAL [39] .....	- 7 -
FIGURA 0-3: ANTENA RANURADA HEXAFILAR. [13] .....	- 8 -
FIGURA 0-4: ANTENAS PLANAS E INCLINADAS DE TORNIQUETE [18] .....	- 8 -
FIGURA 0-5: SISTEMA DE UNA ANTENA [9] .....	- 10 -
FIGURA 0-6: DIAGRAMA DE RADIACIÓN 3D [9] .....	- 11 -
FIGURA 0-7: DIAGRAMA DE RADIACIÓN NORMALIZADO [9].....	- 12 -
FIGURA 0-8: LINECAL.....	- 14 -
FIGURA 0-9: MODELING CST .....	- 14 -
FIGURA 0-10: SIMULATION CST .....	- 15 -
FIGURA 0-11: MATLAB.....	- 16 -
FIGURA 0-12: MATHCAD .....	- 16 -

FIGURA 0-13: EXCEL .....	- 17 -
FIGURA 0-14: VISTA ISOMÉTRICA PARCHE SIMPLE .....	- 18 -
FIGURA 0-15: VISTA ISOMÉTRICA PARCHE APILADO .....	- 19 -
FIGURA 0-16: CONSTRUCCIÓN DE DIPOLOS .....	- 20 -
FIGURA 0-17: VISTA ISOMÉTRICA PARCHE CON DIPOLOS PARÁSITOS .....	- 20 -
FIGURA 0-18: SECCIÓN DE ALIMENTACIÓN DEL PARCHE .....	- 21 -
FIGURA 0-19: PARAMETRIZACIÓN PARÁMETROS S11 PARA ALTURA ENTRE PLANO DE MASA Y PARCHE SIMPLE SIENDO 14 MM.....	- 23 -
FIGURA 0-20: PARAMETRIZACIÓN DEL RADIO DE PLANO DE MASA Y SUSTRATOS SIENDO 62 MM... - 23 -	
FIGURA 0-21: PARAMETRIZACIÓN DE FACTOR DE ESCALA PARA PARCHE ACTIVO F_ESCALA = 1.2404 MM .....	- 24 -
FIGURA 0-22: PARAMETRIZACIÓN DE COLOCACIÓN DE PARCHE APILADO .....	- 24 -
FIGURA 0-23: PARAMETRIZACIÓN DE FACTOR DE ESCALA, 0.85, DEL PARCHE APILADO .....	- 25 -
FIGURA 0-24: PARAMETRIZACIÓN ALTURA PARCHE APILADO.....	- 25 -
FIGURA 0-25: PARCHE CON DIPOLOS.....	- 27 -
FIGURA 0-26: DIPOLOS APILADOS .....	- 28 -
FIGURA 0-27: DIPOLOS FINALES .....	- 28 -
FIGURA 0-28: RESPUESTA DE LOS DIPOLOS DE FIGURA 0-27 .....	- 29 -
FIGURA 0-29: IMPEDANCIA CONECTORES.....	- 30 -
FIGURA 0-30: CONECTORES .....	- 30 -
FIGURA 0-31: ALIMENTACIÓN.....	- 31 -
FIGURA 0-32: DISEÑO DE CHOKES 3D DE ADRIÁN [15] .....	- 33 -
FIGURA 0-33: ESTRUCTURA DE CHOKES [12].....	- 33 -
FIGURA 0-34: RESPUESTA CHOKES [12].....	- 33 -

## INDICE DE TABLAS

TABLA 2-1: FRECUENCIAS.....	7
TABLA 3-1: REQUISITOS .....	17
TABLA 3-2: ESPECIFICACIONES.....	17
TABLA 4-1: ELEMENTOS CANDIDATOS .....	21
TABLA 5-1: CENTRO DE FASE Y VARIACIÓN DEL CENTRO DE FASE, PARCHE SIMPLE.....	32
TABLA 5-2: CENTRO DE FASE Y VARIACIÓN DEL CENTRO DE FASE ELEMENTO RADIANTE FINAL ...	32
TABLA 5-3: CARACTERÍSTICAS DE RADIACIÓN DEL ELEMENTO RADIANTE.....	34
TABLA 5-4: CENTRO DE FASE Y RADIACIÓN ESTRUCTURA CON CHOKES 3D .....	38
TABLA 5-5: CARACTERÍSTICAS DE RADIACIÓN DE LA ESTRUCTURA CON CHOKES 3 .....	39
TABLA 0-1: SISTEMAS COMERCIALES .....	- 9 -
TABLA 0-2: DIMENSIONES PARCHE ACTIVO .....	- 24 -

TABLA 0-3: MEDIDAS DEL PARCHE APILADO .....	- 25 -
TABLA 0-4: DIMENSIONES PRELIMINARES LONGITUD DIPOLOS .....	- 26 -
TABLA 0-5: DIMENSIONES PRELIMINARES ANCHO DIPOLOS .....	- 26 -
TABLA 0-6: DIMENSIONES DIPOLOS FINALES .....	- 31 -
TABLA 0-7: BANDAS GNSS .....	- 32 -
TABLA 0-8: CONSTANTES DE LOS MATERIALES .....	- 32 -

# 1 Introducción

---

## 1.1 Motivación

Esta memoria de TFG consiste en el diseño de una antena de banda ancha para estaciones de navegación por satélite, así como del estudio de sus parámetros y optimización para su operación en las señales recibidas en la banda de 1.15 – 1.65 GHz. Por medio del diseño de un elemento radiante capaz de tener un ancho de banda de dichas señales, mejorar la relación axial y obtener una estabilidad de centro de fase.

En la actualidad, las ofertas tecnológicas de antenas para sistemas de navegación con chokes se basan en una geometría 2D y fundamentalmente están diseñadas para cubrir dos bandas de frecuencia (L1 Y L2) de GPS. Para este TFG utilizaremos una estructura de chokes en 3D innovadora que mejora las prestaciones frente a efectos de multi-trayecto, bajos ángulos de llegada, estabilidad de centro de fase, etc.

Uno de los problemas más significativos es el efecto que las señales multi-trayecto tienen sobre las señales deseadas causando interferencias. Por otro lado, existe la necesidad de cubrir las bandas de frecuencias propuestas en la actualización de los sistemas actuales como GPS y GLONASS [2], el despliegue de los sistemas de mejoramiento o aumento tales como el WASS de EEUU, el EGNOS de Europa, o el MFSAS de Japón y Australia [3], y sistemas emergentes como el Galileo de Europa, el COMPASS de china, el IRNSS de India y el QZSS de Japón.

Este TFG se centra en mejorar el rendimiento de la antena de choke en aspectos como el aumento de su ancho de banda y la estabilidad de fase obtenida con la estructura 3D de chokes a utilizar, y para ello se realizará el análisis de impacto de la geometría 3D con un estudio paramétrico posterior al diseño inicial de la antena, bien en tecnología micro-strip o en hilo, con el objetivo de mejorar el rendimiento de la antena de choke. La antena propuesta para sistemas de navegación por satélite utiliza la polarización circular, puesto que en las aplicaciones de recepción de señal de sistemas de navegación presenta numerosas ventajas frente a la polarización lineal [4]. La polarización circular consigue una mayor ganancia de la señal de los satélites de la constelación del sistema de navegación frente a efectos como el Faraday que sufren las mismas y más evidentes en ciertas bandas de frecuencia. Las estaciones terrestres deben utilizar un sistema radiante que permita recibir cualquier polarización con la mínima atenuación, y la polarización circular permite mayor calidad de recepción para este tipo de señales. Además, presenta mayor robustez frente a los fenómenos atmosféricos como la atenuación de las cargas eléctricas de la atmósfera, que atenúan la señal y producen cambios en su polarización, y la atenuación por lluvia.

El diseño tridimensional permite que las señales recibidas con un ángulo de inclinación muy bajo mantengan mejor su integridad frente al multi-trayecto mejorando su robustez frente al ruido y las interferencias con respecto a las antenas con chokes estándar. Además, el nuevo diseño de la antena se realiza para poder cubrir todo el ancho de banda que hay entre dichas frecuencias, aumentando así el ancho de banda de frecuencia de GPS.

## 1.2 Objetivos

La realización de este proyecto se ha planteado con el objetivo de obtener un sistema de navegación por satélite de antena de banda ancha. por medio del diseño e implementación de un nuevo elemento radiante que cubra todas las bandas de los sistemas GNSS actuales y futuros. Para ello es necesario el cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

- Diseño inicial del modelo de antena para lograr una adaptación en toda la banda de frecuencias de los sistemas de posicionamiento por satélite comprendida entre 1.15 y 1.65 GHz que incluye las señales L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5 Y E6,
- Optimización de ancho de banda y ancho de haz del diagrama de radiación mediante la parametrización de los modelos seleccionados para mejorar la adaptación de la antena en todo el ancho de banda objetivo,
- Disminución del rizado en el frente de fase del diagrama de radiación para mejorar la precisión de la ubicación del sistema de navegación,
- Implementación del diseño obtenido en la estructura de chokes 3D como elemento radiante de la antena para sistemas de navegación por satélite,
- Análisis de viabilidad de implementación de un elemento radiante para cubrir las frecuencias de banda S de la señal C.

### **1.3 Organización de la memoria**

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- En el capítulo 1, trata sobre la explicación de la realización de un nuevo diseño o mejora con respecto a los diseños de antenas 2D, junto con la explicación de los objetivos finales que se requieren con el diseño final.
- Con respecto al capítulo 2, el cual se llama estado del arte, comprende los siguientes puntos, en primer lugar, trata sobre el alcance de la tecnología presente y futura para este sector, anotando las diferentes aplicaciones que se están llevando y las posibles aplicaciones futuras en un corto periodo de tiempo. Posteriormente se trata el marco teórico, el cual es el lugar donde se tratan los antecedentes a esta tecnología y diseño de la antena en el cual se trata los diferentes conceptos de chokes, con las respectivas ventajas para finalmente escribir los diferentes puntos necesarios para la realización del diseño.
- En el capítulo 3, en este capítulo se procede a explicar los principales conceptos básicos de diseño de antenas, ya que es importante conocerlos para el entendimiento del proyecto. Planteado en el apartado correspondiente a parámetros importantes para el análisis de diseño, por otra parte, en el apartado de requisitos del sistema y especificaciones de diseño nos encontramos con la explicación de dos tablas explicativas de los criterios a cumplir en cada parte del diseño final y sus obtenciones para comparar los datos obtenidos con los requisitos.
- En el capítulo 4, se trata de plasmar todos los puntos seguidos para el diseño de dicha antena. Dichos puntos consisten en el estudio y búsqueda de elementos que cumplan con las especificaciones, elección de dos elementos con las mejores características necesarias para cumplir con las especificaciones y finalmente se procede a la elección del elemento radiante con mejores características con su posterior implementación.
- En el capítulo 5, se basa en el estudio de cada una de las conclusiones obtenidas en el proceso de diseño de dicha antena. Finalmente se indican cada una de las líneas futuras para la posible mejora de dichos sistemas.

## 2 Estado del arte

---

Este segundo capítulo del TFG se encuentra dividido en dos partes fundamentales, ya que para explicar el punto de partida es necesaria la explicación en primer lugar del alcance de la tecnología, apartado 2.1 y posteriormente, del diseño de esta en el apartado 2.2.4.3. La primera parte basada en el alcance de la tecnología se procede a explicar cada uno de los sistemas que hay en la actualidad y algunas de las aplicaciones en las que se está utilizando junto con sus líneas futuras de utilización y explicación de los conceptos básicos. Estos conceptos básicos son pertenecientes a la asignatura del grado llamada Antenas y Compatibilidad electromagnética, necesarios para el seguimiento del diseño de la antena final. Por último, el apartado 2.2.4.3, se encarga de la explicación de herramientas y posibles puntos de diseño junto con la exposición de la antena a diseñar.

### 2.1 Alcance de la tecnología.

Para comenzar con la escritura de este TFG, se tiene que pasar a explicar en primer lugar los sistemas de GNSS, para posteriormente comenzar a introducir sus aplicaciones y conceptos importantes para la correcta explicación.

Se entiende por GNSS (Global Navigation Satellite System) todas las técnicas de posicionamiento por satélite. Como su acrónimo indica son sistemas globales de posicionamiento, entre lo que se entiende a sistemas pasivos de navegación basado en satélites emisores de radiofrecuencia, que proporcionan una referencia espacio-temporal con cobertura global independientemente de las características atmosféricas y orográficas. [1]

#### 2.1.1 Aplicaciones.

En primer lugar, se va a tratar cada uno de los sistemas utilizados en el mundo para obtener el posicionamiento de cualquier objeto en el mundo, entre los cuales nos podemos encontrar con: los sistemas GNSS (GPS, GLONASS), sistemas de aumento (EGNOS, WASS), los sistemas de navegación por satélite emergentes (Galileo, COMPASS, QZSS).

- **Sistemas GNSS (GPS, GLONASS):** Son sistemas de posicionamiento global compuestos por sistemas pasivos de navegación basado en satélites emisores de radiofrecuencias, que se encargan de proporcionar un marco de referencia espacio-temporal con cobertura global. Estos sistemas se encuentran compuestos por tres segmentos, aplicados a cada uno de los posibles usos de dichas antenas: el segmento Espacial, segmento de control y segmento de usuario. Dentro de estos sistemas se pueden observar el sistema GPS (EEUU), sistema GLONASS(Rusia). [2]
  - Sistema **GPS**: perteneciente a EEUU, con 29 satélites, a una distancia de 20.000 Km, en órbitas cuasi circulares. GPS está basado en la emisión de varias frecuencias, pero sobre todo en el rango de frecuencias correspondiente a la banda L, frecuencias en las cuales el retardo ionosférico es menor que en otras bandas y con menor cantidad de interferencias. La explicación de la composición de sus satélites y características se encuentra detallada en el Anexo A.A. [1]
  - Sistema **GLONASS**: perteneciente a Rusia, con un total de 24 satélites, a una distancia equivalente a 25.500 Km, en órbitas elípticas muy excéntricas. [1]

- **Sistemas de aumento (EGNOS, WASS):** Son sistemas de aumento basado en satélites. Tanto Egnos, como WASS son sistemas de tecnología espacial encargados de proporcionar una señal de navegación a los sistemas de transporte más conocidos, como aeronaves, trenes, barcos, etc. Dichos sistemas de aumento se basan en los sistemas GNSS nombrados anteriormente, en los que se obtiene dichas señales a través de los satélites. [3]

Dentro de los sistemas de aumento tenemos dos sistemas de gran importancia los cuales son los llamados EGNOS y WASS:

- **Sistema EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service):** Sistema europeo de navegación por satélite dedicado a la seguridad, el control y sostenibilidad del transporte aéreo. También está enfocado para la navegación aérea y marítima, cosa que no se tiene con los sistemas de Estados Unidos WASS y MSAS en Japón, los cuales solo sirven para la vigilancia de la aeronavegación. Este sistema de posicionamiento mejora la precisión de las mediciones de unos cinco metros a menos de dos metros. El funcionamiento completo está comentado en el anexo A.A. [3]
- **Sistema WAAS (Wide Area Augmentation System):** Sistema de aumento basado en Satélites desarrollados por los Estados Unidos, a través de la colaboración de la FAA (Federal Aviation Administration) y el departamento de transporte DOT (Department of Transportation). Este sistema al igual que el sistema europeo explicado en el punto anterior se realiza con motivo de la complementación de los sistemas de satélites GPS con estaciones terrestres que permiten corregir la precisión y la confianza en las coordenadas de posición adquiridas en las medidas realizadas. La explicación de dicho sistema se encuentra en el anexo A.A. [4]
- **Sistemas de navegación por satélite emergentes (Galileo, COMPASS, QZSS):** Dentro de los últimos sistemas que se van a proceder a explicar en este apartado, nos encontramos con los sistemas más nuevos o sistemas que se encuentran en investigación y desarrollo:
  - ❖ **Sistema Galileo:** Sistema europeo de geolocalización y posicionamiento, el cual se ha creado para ser una alternativa del sistema GPS de los Estados Unidos, ya que existe una gran dependencia de dicho sistema y por las serias dudas creadas con motivo de la precisión y efectividad de estos sistemas. Este sistema se encuentra con una materia de geolocalización y precisión que puede llegar hasta los 70 centímetros. El desarrollo del sistema se encuentra explicado en el anexo A.A. [4] [1]
  - ❖ **Sistema COMPASS:** El sistema de navegación por satélite es un proyecto que se lleva a cabo desde la República Popular China y que tiene como objetivo al igual que Galileo el proporcionar al ciudadano chino un sistema independiente al creado de forma inicial, GPS, su tecnología nació bajo el nombre de Beidou. El plan del gobierno chino es el desarrollo de un sistema global de 35 satélites, en los cuales se encontrarían cinco satélites de órbita terrestre geosíncrona<sup>2</sup> (GEO) y

---

<sup>2</sup> Órbita geocéntrica que tiene el mismo periodo orbital que el periodo de rotación de la tierra.

treinta de órbita terrestre media (MEO), estos ofrecerán una cobertura completa de todo el globo. [5]

- ❖ **Sistema QZSS:** Sistema de geo posicionamiento con los mismos objetivos que los sistemas expuestos anteriormente, desarrollado por el gobierno Japonés, siendo este el más preciso hasta la fecha. Significado de su acrónimo es Quazi-Zenith Satellite System, reduciendo el error de GPS a unos pocos centímetros. Dichos satélites orbitan sobre Japón y compuestos por satélites que no son geoestacionarios, es decir, no se encuentran en la misma posición sobre la superficie de la tierra. Cubre Japón y gran parte de Nueva Zelanda y Australia. Es un sistema en desarrollo ya que el último de sus satélites va a ser puesto en órbita en este año 2017. [6] [7]

Todos los sistemas descritos en los párrafos anteriores son capaces de proporcionarnos las siguientes aplicaciones a nivel de usuario:

- ✓ Entre los más intuitivos encontramos sistemas de ayuda de navegación y orientación en dispositivos de mano para senderismo, o para trazado de rutas.
- ✓ Dispositivos de navegación, control y seguridad de flotas integrados en los automóviles, camiones, barcos, trenes, etc.
- ✓ Sincronización de estaciones de comunicaciones y telemetría, y de sistemas de seguridad.
- ✓ Sistemas de localización para emergencias y guiado de vehículos no tripulados.
- ✓ Seguimiento de los dispositivos usados en la fauna.
- ✓ Automatización de sistemas para agricultura de gran escala y precisión. [4]

## **2.2 Marco teórico.**

En la actualidad se está viviendo una situación emergente de dichos sistemas de navegación por satélite como se ha mencionado en el apartado 2.1.1. Debido a la multitud de aplicaciones que se están desarrollando día a día. Ya que todos los utensilios electrónicos contienen sistemas de posicionamiento, desde móviles, ordenadores, transporte, e incluso drones o juguetes, como para otras situaciones diferentes y cotidianas como puede ser el manejo de maquinaria agrícola o incluso la utilización de aplicaciones, comúnmente llamadas GPS, capaces de trazarnos rutas más rápidas o con menor tráfico dependiendo de tu posicionamiento actual, con un margen de error de 3 a 5 m de distancia para el sistema GPS de los Estados Unidos, de Galileo de la Unión Europea o de incluso cualquier otro sistema, como se ha visto en el apartado anterior.

Las líneas futuras de aplicaciones se encuentran más en el sector del transporte en el cual se está investigando la utilización de trenes o coches, los cuales no necesiten conductor, para poder llegar al destino final.

Los diseños actuales de las antenas correspondientes a la obtención o emisión de señales para los sistemas expuestos anteriormente tienen un diseño de chokes en 2D. Estos tipos de diseños están fundamentalmente destinados a las bandas de frecuencias comprendidas en las bandas L1 Y L2 de GNSS. Por tanto, en la investigación y desarrollo de este TFG se trata la mejora de las prestaciones de las antenas por medio de la realización de esta con un elemento

llamado choke en 3D para intentar eliminar el efecto de multi-trayecto<sup>3</sup>, eliminación de señales con bajos ángulos, o desestabilización de fase, retardos considerables de las señales, que llegaría al elemento radiante del diseño.

Finalmente se busca un diseño con polarización circular ya que esta polarización proporciona mejores prestaciones a las proporcionadas por sistemas con polarización lineal, ya que habría pérdidas de eficiencia debido a que la antena emisora y receptora no tendrían misma polarización y esta caería a un 50 % para la polarización lineal y para la circular a izquierdas tendría una menor eficiencia.

Por tanto, este diseño se realiza como una mejora de lo conseguido anteriormente en el TFG presentado en 2016 por Adrián Pérez Quintana, el cual necesita una mejora de ancho de banda para las frecuencias correspondientes a las bandas L requeridas por los sistemas de navegación por satélite, y una estabilidad de fase con mejores prestaciones. Esta mejora se va a realizar mediante la implementación de un parche que mejore estas características, es decir, parche óptimo para la mejora del sistema global de chokes creado por Adrián.

Para poder entender cada uno de los pasos siguientes durante este TFG, es necesaria la explicación de ciertos conceptos básicos para el desarrollo de antenas.

Para ello se va a detallar cada uno de estos conceptos en las siguientes subsecciones.

### 2.2.1 Concepto de antena.

Dispositivo capaz de radiar y recibir ondas electromagnéticas, que además adapta la salida del transmisor o la entrada del receptor al medio. [8]

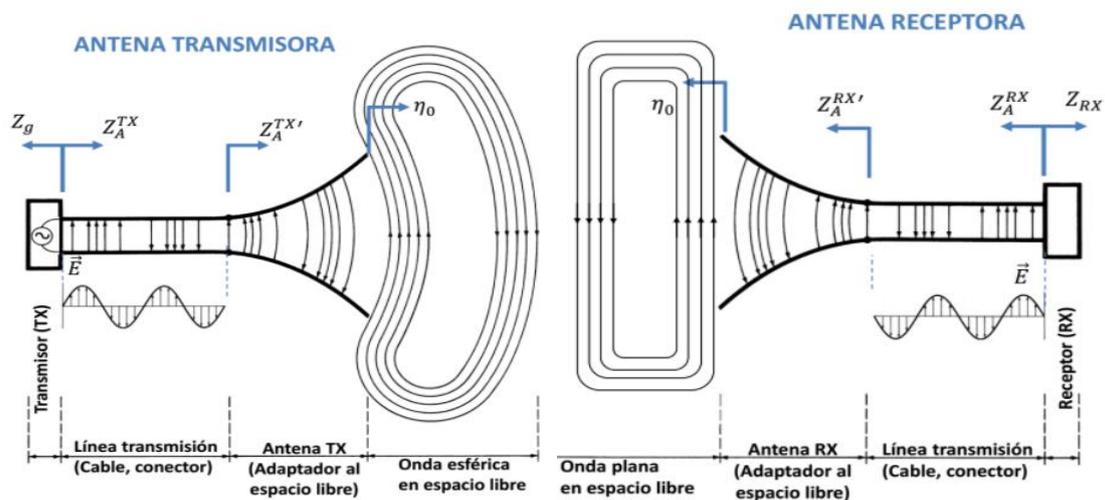


Figura 2-1: Antena transmisora y Antena Receptora [9]

### 2.2.2 Bandas de frecuencias y longitud de onda.

La siguiente tabla nos proporciona cada una de las divisiones de frecuencias que se tienen para la implementación de cada sistema, los cuales sirven para diferentes aplicaciones.

<sup>3</sup> Multi-Trayecto: Efecto que se crea por la colisión de las señales con diferentes obstáculos de nuestro alrededor, como puede ser un edificio.

Las frecuencias requeridas para este diseño son las correspondientes a la banda L las cuales tienen un rango de frecuencias de 1-2 GHz con una longitud de onda<sup>4</sup> de 30-15 cm. [8]

**Tabla 2-1: Frecuencias**

<b>BANDA</b>	<b>FRECUENCIA</b>	<b>LONGITUD ONDA</b>
<b>L</b>	1-2 GHz	30 – 15 cm
<b>S</b>	2-4 GHz	15 – 7.5 cm
<b>C</b>	4-8 GHz	7.5 – 3.75 cm
<b>X</b>	8-12.4 GHz	3.75 – 2.42 cm
<b>Ku</b>	12.4-18 GHz	2.42 – 1.66 cm
<b>K</b>	18-26.5 GHz	1.66 – 1.11 cm
<b>Ka</b>	26.5-40 GHz	11.1 – 7.5 mm
<b>mm</b>	40-300 GHz	7.5 – 1 mm

Donde la longitud de onda se obtiene de la siguiente manera:

$$\lambda = C_0/f \text{ siendo:}$$

- ✓  $C_0$  la velocidad de la luz.
- ✓  $f$  la frecuencia de corte del sistema.

Una vez vistas las frecuencias necesarias para el diseño y la longitud de onda correspondiente a este sistema se procede a la explicación de conceptos como la impedancia de entrada, adaptación, diagrama de radiación, etc.

Entre los cuales se pueden dividir en dos apartados, uno el correspondiente a los parámetros circuitales y el segundo apartado correspondiente a los Parámetros direccionales.

### **2.2.3 Parámetros circuitales.**

Los parámetros circuitales necesarios para el entendimiento de esta memoria son: Impedancia de entrada, coeficiente de reflexión, Adaptación de impedancias y potencia, los cuales han sido explicados en el anexo 0.

### **2.2.4 Parámetros direccionales.**

Una vez expuestos estos pequeños conceptos se procede a explicar los parámetros direccionales los cuales comprenden cada uno de los diagramas por los cuales se puede analizar el comportamiento del sistema estos parámetros son: ganancia directiva, diagrama de radiación, densidad de potencia de radiación, intensidad de radiación, ganancia de potencia, polarización, centro de fase.

Todos estos conceptos mencionados van a ser explicados en lugares diferentes, por un lado, los conceptos que son imprescindibles para este diseño, explicados a continuación y los conceptos que no son tan imprescindibles explicados en el anexo 0.

---

<sup>4</sup> Longitud de onda: Longitud de onda: distancia real que recorre una perturbación (onda) en un determinado intervalo de tiempo.

### 2.2.4.1 Polarización.

Y finalmente se procede a la explicación de uno de los conceptos más importantes para diseño de antenas. La polarización del campo radiado por la antena en la dirección de máxima radiación es la figura que forma este en función del tiempo, para una dirección fija, el extremo del vector de campo radiado y el sentido de giro de este. Se puede tener polarización lineal, esta se encuentra en una línea recta, polarización circular, como su nombre indica forma un círculo, el cual puede ser a derechas o a izquierdas dependiendo del sentido de giro y finalmente polarización elíptica a derechas o izquierdas formando una elipse.

A la hora de la transmisión y recepción del campo este concepto es muy importante ya que las polarizaciones a derechas e izquierdas no son compatibles, es decir, si cada una está en una polarización no se va a conseguir recepción de campo. Si se tienen dudas por tanto es mejor tener una polarización lineal, ya que te garantizas la recepción de la mitad de la señal. [8] [10]

### 2.2.4.2 Centro de fase.

Centro de fase de una antena GNSS es considerado el punto en el que se recoge/transmite, dependiendo si dicha antena es transmisora o receptora, la señal.

En nuestro caso al ser la parte del sistema receptor, se puede decir que es el punto en el cual se recoge la señal transmitida por el satélite. Siendo, por tanto, este punto el considerado como origen de radiación, y con ello se convierte en el punto de referencia para todas las medidas.

Para una antena ideal dicho centro de fase se encuentra en el centro de una superficie esférica con igual fase alrededor de toda la antena. Siendo esta superficie definida por la frecuencia, el azimuth e incluso la elevación correspondiente a la antena bajo estudio. [8] [12]

A parte de estos conceptos de diseño es necesaria la explicación de los parámetros de análisis, como los parámetros S y VSWR, los cuales están explicados en el anexo 0.

### 2.2.4.3 Parámetros S

Los circuitos se consideran como un bloque de N puertas, con N salidas, entre las que a la entrada se introduce una potencia de entrada  $a_i$  y en la salida una potencia de salida  $b_i$ . Donde cada onda tiene asociada una impedancia de entrada y de salida  $Z_{0i}$ , como se puede ver en la Figura 2-2.

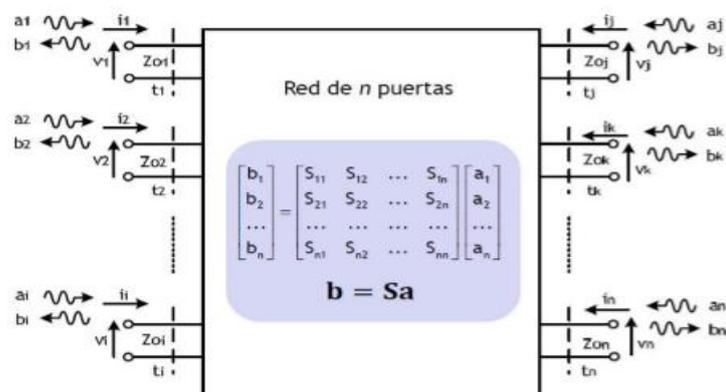


Figura 2-2: Parámetros S

La ecuación de ondas de potencia viene definida por:

$$a_i = \frac{v_i + Z_{0i}^* \cdot i_i}{\sqrt{8 \cdot \text{Re}[Z_{0i}]}} \quad (1)$$

$$b_i = \frac{v_i - Z_{0i}^* \cdot i_i}{\sqrt{8 \cdot \text{Re}[Z_{0i}]}} \quad (2)$$

Los parámetros S son los encargados de relacionar las ondas de potencia de entrada con las de salida de la red. Siendo estos parámetros:

$$S_{ii} = \frac{b_i}{a_i} \Big|_{a_k = 0, k \neq i} \quad S_{ji} = \frac{b_j}{a_i} \Big|_{a_k = 0, k \neq i} \quad (3)$$

#### 2.2.4.4 Parámetro VSWR

Con estos parámetros podemos concluir entre dos tipos de pérdidas las de retorno y las de inserción. Siendo  $S_{ii}$  pérdidas de retorno y  $S_{ji}$  pérdidas de inserción.

Y por último parámetros VSWR (voltaje Standing Wave Ratio) se definen a partir de las pérdidas de retorno:

$$VSWR = \frac{1 + 10^{\text{Pérdidas\_retorno}}}{1 - 10^{\text{Pérdidas\_retorno}}} \quad (1)$$

## 2.3 Diseño

En este segundo apartado correspondiente al capítulo dos de este proyecto se va a tratar cada una de las técnicas de diseño, es decir, los pasos que se realizan y herramientas que se utilizan para el desarrollo de los diseños. Los diseños que se han realizado hasta la actualidad y las mejoras que se requieren para este proyecto, finalmente se procederá a indicar cada uno de los puntos u objetivos que se buscan en el diseño por medio de la propuesta de diseño. [8]

### 2.3.1 Técnicas de diseño.

Las técnicas de diseño utilizadas para este tipo de proyectos son las siguientes:

- **Modelo de línea de transmisión:** se estudia el comportamiento del parche al de una línea microstrip modificada. Esto nos permite el cálculo de la impedancia de entrada de dicho elemento diseñado. [9]
- **Modelo de cavidad resonante:** se aplica para la obtención de los modos resonantes existentes en el parche y el diagrama de radiación. Esta forma de diseño es la más utilizada. Con esto se puede obtener el comportamiento de la antena con respecto a la transmisión o emisión, debido a que se puede visualizar el tipo de radiación, el ancho de haz, etc, características explicadas anteriormente para el cumplimiento de los requisitos. [12]

### 2.3.2 Diseños actuales.

Los diseños actuales de los sistemas de navegación por satélite se encuentran en la actualidad en continuo desarrollo en diferentes puntos del diseño, uno de los avances más significativos de la actualidad como ya indica el TFG, realizado por Adrián Pérez Quintana, es el diseño de las antenas con Chokes 3D. Este elemento ha sido explicado en el anexo A.B, ya que dicha geometría proporciona grandes avances en concreto en la eliminación o atenuación de los efectos por multi-trayecto. [11]

Los sistemas comerciales principales son Thales, Leica, NovAtel y Trimble, sistemas explicados en el anexo A.D.

Pero antes de la explicación de las antenas con estructura de chokes 3D y sus beneficios es necesaria la introducción de los elementos radiantes posibles para el diseño de la antena futura.

#### 2.3.2.1 Tipos de Antenas.

Para los sistemas de GNSS hay ciertas estructuras candidatas con una mejor respuesta para poder tratar dichos requisitos entre los que se encuentran las antenas microstrip, antenas leaky wave, veraPhase, parche circular apilado con sonda coaxial, y parche circular con alimentación por acoplo a continuación. Posteriormente se adjuntan más posibles elementos para sistemas GNSS en el anexo A.D.

##### 2.3.2.1.1 Antenas microstrip.

Las antenas microstrip o comúnmente denominadas antenas de parche son las más comunes para la construcción de subconjuntos que forman antenas de tipo GNSS para las diferentes utilidades civiles o militares. Esto es así porque este tipo de antenas tienen facilidad de construcción, bajo coste, facilidad para obtener polarización RHCP<sup>5</sup>, y facilidad de adaptarse a la superficie necesaria.

Compuestas por un conductor metálico con una forma específica encima de un dieléctrico mayor en tamaño que el metal.

Los principales usos que tienen estas antenas son en aviación, estas cualidades también lo hacen importante para el uso de la implementación de arrays utilizados para los sistemas GPS, o por ejemplo también para su utilización en las antenas de los teléfonos móviles por su facilidad de miniaturización. [11]



**Figura 2-3: Antena de parche [9]**

---

<sup>5</sup> RHCP: polarización circular a derechas

### 2.3.2.1.2 Antenas Leaky-wave.

Son antenas con una estructura característica, la cual consiste en la inserción de ranuras en dicha estructura. Estas ranuras entran en juego por medio de la alimentación de la estructura guiada con diversos modos de onda de desplazamiento, los cuales son los encargados de controlar el desplazamiento del campo en dichas aberturas.

El funcionamiento de este tipo de antenas consiste en la propagación por medio de las pérdidas de radiación, ya que lo que se busca es el modo de fugas.

Las antenas de leaky-wave son un tipo de antenas de onda progresiva. Consisten en una guía de ondas con apertura por la que se puede propagar un modo de fugas, modo leaky.

Dicho comportamiento se puede controlar por medio del ángulo de apuntamiento en frecuencia, con alta directividad controlada, pudiendo usarse un gran ancho de banda con menos pérdidas que las líneas de transmisión convencionales.

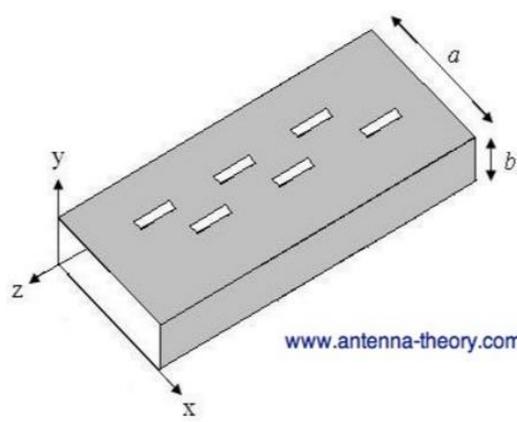


Figura 2-4: Antena Leaky-wave [39]

### 2.3.2.1.3 Antena VeraPhase.

Son las antenas con mayor rendimiento, esta tecnología proporciona:

- Relaciones axiales bajas en las frecuencias de GNSS.
- Variaciones de centro de fase más estables y más estrictas +/- 1 mm
- Ganancia alta en las frecuencias GNSS

Consisten en la introducción de dipolos alimentados en cuadratura y sintonizados a la frecuencia L2, con un elemento radiante acoplado diseñado para resonar en L1. Elementos situados en una guía de onda circular. [17]

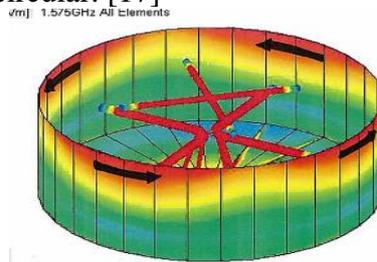


Figura 2-5: Antena veraPhase

#### 2.3.2.1.4 Parche circular apilado con sonda coaxial

Este elemento consiste en la implementación de un parche circular, microstrip, apilado con un plano de masa compuesto por aluminio. Este elemento tiene su resonancia en la frecuencia de corte del ancho de banda requerido. [2]

Este elemento es el usado para la implementación de este TFG con ciertas modificaciones añadidas para la mejora de ciertos requisitos indicados anteriormente.

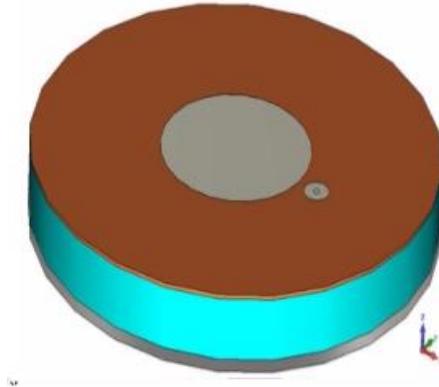


Figura 2-6: Parche circular alimentado por sonda coaxial [18]

#### 2.3.2.1.5 Parche circular con alimentación por acoplo

Este elemento está diseñado por un elemento circular con brazos dispuestos por todo el elemento circular alimentados por medio de acoplo, es decir, se encargan de reconducir las corrientes creadas por la alimentación. Con esto se consigue una polarización circular buena y un ancho de banda grande. [18]



Figura 2-7: Parche circular con alimentación por acoplo [18]

#### 2.3.2.1.6 Geometría 3D para antenas.

Las antenas diseñadas para los sistemas de navegación por satélite se encuentran diseñadas con el fin de mejorar la recepción de señales con un ángulo de inclinación bajo y el deseo de conseguir la eliminación del efecto multi-trayecto. La geometría de chokes 3D consiste en la elaboración de un elemento, el cual tiene diferentes niveles de anillo.



**Figura 2-8: Antena de chokes [26]**

Como bien se ha explicado en el anexo A.B, las antenas de chokes tienen un fin de tener un centro de fase estable. Esto conlleva que cuanto más estable es el centro de fase mayor precisión tenemos en la predicción de la posición requerida. Ya que la inestabilidad del centro de fase provoca un error de fase en función de la dirección de la señal y varía según su azimut<sup>6</sup> y elevación debido a que esta no es una señal homogénea. Esto puede provocar error de posicionamiento de milímetros o incluso centímetros.

A parte de que con la geometría de chokes se consigue mejorar este problema de centro de fase también consigue mejorar la simetría de la señal en amplitud, en fase y el retardo de grupo.

### **2.3.2.2 Ventajas de este diseño.**

Las principales ventajas que se obtienen de la geometría de chokes 3D son:

- Alta precisión en las medidas de GPS.
- Las señales se encuentran con mayor robustez y disponibilidad para el usuario.
- Estos diseños robustos ofrecen mayor rendimiento ante situaciones más extremas, es decir, entornos más complicados.
- Las antenas con chokes 3D proporcionan mejor rendimiento con respecto a señales con un bajo ángulo de penetración con respecto al horizonte.
- Y finalmente mejoran la estabilidad de fase de dicha antena.

Después de la explicación de todas estas antenas y de los elementos de chokes, se puede ver como nuestro elemento radiante de la antena se podría componer de alguna de ellas.

Para la realización de este TFG se ha buscado en primer lugar el estudio de cada uno de dichos elementos para finalmente elegir. A la hora de elegir se han escogido los dos elementos con mejor ancho de banda para ser implementados, estos elementos se explicarán en apartados posteriores. Por otra parte, una vez realizado dicho elemento se ha procedido a elegir el que mejores prestaciones tiene en cada uno de los parámetros necesarios para GNSS. Finalmente se implementa la antena final.

---

<sup>6</sup> Azimut: ángulo de orientación sobre la superficie de una esfera real o virtual.

### 2.3.3 Propuesta de diseño.

Dentro de este apartado como se ha indicado anteriormente, se van a exponer los puntos que se quieren tomar como principales en el diseño de la antena con chokes para GNSS, la cual es una mejora de las antenas con chokes en 2D. El cambio de chokes 3D a 2D se realiza para tener una ganancia más robusta ya que en los chokes 2D de bajo nivel de inclinación tienen menor ganancia y, por tanto, aplican una calidad de señal menor. [11]

Después de esta explicación se puede visualizar él porque del diseño de esta antena. La cual tiene que tener las siguientes especificaciones:

- Se busca el **diseño** de una antena que comprenda todas las frecuencias correspondientes a la obtención del posicionamiento por medio de la navegación por satélite, en las cuales se **comprenden las frecuencias entre 1.15 y 1.65 GHz**. Con una frecuencia de corte de 1.4 GHz. Banda correspondiente a las señales L1, L3, L5, E1, E2, E3, E4, E5 Y E6.
- Posteriormente se busca un resultado **óptimo del ancho de banda y ancho de haz** para conseguir una respuesta en frecuencia (Diagrama de radiación), que concuerde con lo requerido para el buen funcionamiento del sistema de navegación por satélite, por medio de la parametrización de los elementos elegidos en el diseño.
- Como se ha visto en los últimos puntos de este TFG se diseña una antena 3D con diferentes objetivos; uno de ellos se corresponde con el **mejoramiento o búsqueda de estabilidad del centro de fase**, eliminando el rizado del frente de fase, esto conlleva una obtención de la ubicación del sistema de navegación con una mayor precisión.
- Y finalmente después de la obtención óptima de los diferentes diagramas, se pasa al estudio de una de las líneas futuras, la cual comprendería la **investigación de introducir un elemento radiante** que aumente el rango de frecuencias comprendido en el ancho de banda del diseño. Esto provocaría la introducción en dicho ancho de **banda de las frecuencias S de la señal C**.

Una vez vistos los puntos importantes de diseño de este TFG, se va a proceder a explicar los requisitos de una manera más minuciosa, es decir, se va a indicar exactamente los requerimientos necesarios en cada uno de los parámetros básicos explicados conceptualmente en los apartados anteriores.

## 3 Caso de estudio

El capítulo 3, es el lugar donde se tratan los parámetros más importantes necesarios para el entendimiento de la realización del diseño requerido y su correcto entendimiento. Otro de los apartados consiste en el planteamiento de las especificaciones del diseño requerido.

### 3.1 Parámetros importantes para el análisis de diseño.

En el apartado número 2 de este TFG se han tratado cada uno de los conceptos importantes para el estudio de dicho diseño. En este apartado se va a proceder a la explicación exacta de lo buscado para el diseño en los diferentes conceptos explicados anteriormente, para posteriormente pasar a la realización de dicho diseño de antena GNSS.

#### 3.1.1 Parámetros S11

En lo correspondiente a los parámetros S11 del diseño requerido se busca que dicha respuesta este atenuada en -10dB para la banda de frecuencias, en la cual se quiera transmitir o recibir, en el caso de este diseño se busca una atenuación por debajo de -10dB para las frecuencias comprendidas entre 1.15 y 1.65 GHz con frecuencia de resonancia en 1.4 GHz.

#### 3.1.2 Parámetro VSWR.

Este parámetro como ya se ha indicado contiene el estudio de las pérdidas de retorno. Para este diseño se pide un VSWR de 1.5:1, siendo las pérdidas de retorno el módulo de los parámetros Sii. [11]

#### 3.1.3 Diagrama de radiación.

El diagrama de radiación indica la forma de radiar en las coordenadas espaciales, es decir, nos informa la forma que tienen los lóbulos de transmisión o recepción, ancho de haz, etc. En este caso se busca un diagrama de radiación en el plano E correspondiente con la componente copolar como phi, y con componente contrapolar siendo theta. [8]

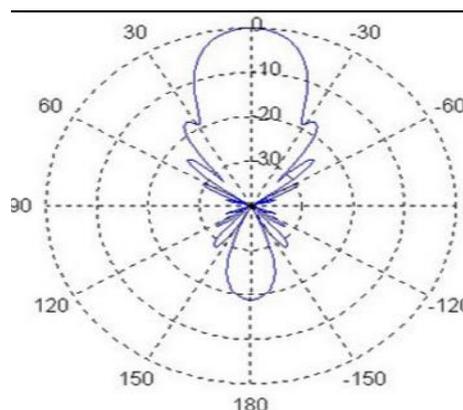
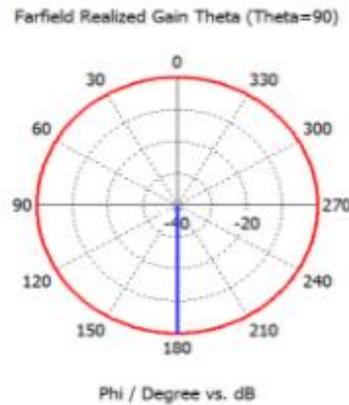


Figura 3-1: Componente copolar diagrama directivo [39]

Campo H, o radiación omnidireccional con componente copolar theta y contrapolar igual a phi.



**Figura 3-2: Componente copolar respuesta omnidireccional [41]**

Ambas respuestas se encuentran de forma ideal y ambas van a tener ligeras diferencias con respecto a las gráficas explicadas en los diseños realizados posteriormente.

### 3.1.4 Polarización.

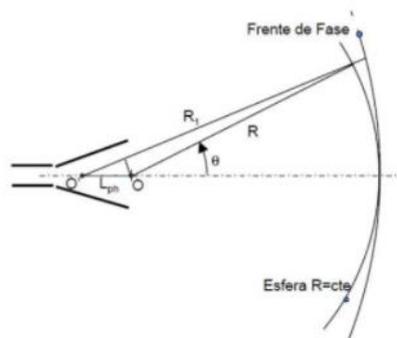
Con respecto a la polarización final de dicho diseño se busca que sea RHCP, es decir, polarización circular a derechas, ya que la transmisión de satélites GNSS se hace con dicha polarización y así será posible obtener un factor de polarización mayor.

Debido al problema de polarizaciones diferentes, provocando diferentes factores de polarización, fpp, decayendo de una manera muy drástica y, por tanto, provoca pérdidas de señal muy altas. [8]

Si ambas antenas tienen una polarización RHCP se conseguirá un fpp igual a 1 y con ello, en la fórmula de friss necesaria para el cálculo de un enlace de comunicación haría que dichas pérdidas se despreciaran.

### 3.1.5 Centro de fase.

El centro de fase como se ha explicado anteriormente corresponde con el punto donde se recoge/transmite la señal. En este diseño se busca un centro de fase estable. Igual al mostrado a continuación, para una antena de bocina.



**Figura 3-3: Centro de fase [9]**

### 3.2 Requisitos del sistema y Especificaciones de diseño.

A continuación, se muestra una tabla con los principales requisitos a cumplir en el parche o elemento radiante a diseñar para mejorar las especificaciones del sistema GPS final.

**Tabla 3-1: Requisitos**

Parámetros	Unidades	Valores
<b>Tipo de polarización</b>	-	RHCP
<b>Frecuencia central</b>	GHz	1.4
<b>Ancho de banda</b>	GHz	1.15 – 1.65
<b>Bandas comprendidas</b>	-	L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5 Y E6
<b>VSWR</b>	-	1.5:1
<b>Impedancia conectores</b>	$\Omega$	50
<b>Estabilidad de centro de fase</b>	mm	< 2
<b>Dimensiones</b>	mm	170 x 80

Como se muestra en esta tabla anterior dicho diseño busca obtener un diseño que comprenda un ancho de banda de las frecuencias comprendidas entre 1.15 – 1.65 GHz. Ancho de banda en el que se encuentran situadas las bandas L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5 Y E6. Cada banda tiene un ancho de banda y unas frecuencias portadoras diferentes, las cuales se encuentran en el anexo A.G.

Tras indicar cada una de las características buscadas se muestra la siguiente Tabla 3-2 con las especificaciones de la estructura.

**Tabla 3-2: Especificaciones**

Parámetros	Unidades	Valores
<b>Tipo de polarización</b>	-	RHCP
<b>Frecuencia central</b>	GHz	1.39
<b>Ancho de banda</b>	GHz	1.07 – 1.71
<b>Bandas comprendidas</b>	-	L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5 Y E6
<b>VSWR</b>	-	1.5:1
<b>Impedancia conectores</b>	$\Omega$	50
<b>Estabilidad de centro de fase</b>	mm	< 2 para $f < 1.4$ GHz
<b>Dimensiones</b>	mm	170 x 75



## 4 Diseño de antena

---

Para el corrector diseño del elemento radiante es necesaria la utilización de ciertas herramientas, las cuales nos facilitan dicho trabajo. En este TFG han sido utilizada herramientas de diseño como Linecal y CST y herramientas de cálculo como Matlab, Mathcad y Excel, mencionadas y explicadas en el anexo A.G y anexo A.H respectivamente.

Tras la explicación de cada uno de los conceptos y de las diferentes herramientas utilizadas se procede al diseño de la antena final. Por tanto, en este punto se procede a la investigación de los diferentes elementos encontrados, para su posterior elección y diseño de uno de ellos.

Una vez elegido el elemento radiante definitivo se pasa a la elaboración de modificaciones para obtener el elemento radiante final capaz de cumplir con los requisitos indicados en el apartado 3.2. Los pasos a seguir finalmente son: Revisión de los elementos radiantes candidatos, Selección de diseño, Descripción de los componentes de la antena seleccionada, Descripción de la implementación de diseño inicial en CST, Diseño de componentes bajo estudio y finalmente se observa la estructura de chokes 3D.

### 4.1 Revisión de los elementos radiantes candidatos

En primer lugar, para la elección del diseño final, se ha procedido a la realización de un estudio exhaustivo de los posibles elementos radiantes. Para que después del estudio de los anchos de banda, se proceda a elegir los diseños finales de elementos radiantes que van a ser diseñados.

Una vez diseñados dichos elementos, se ha procedido a la elección del elemento que muestra mejores características de radiación, polarización, centro de fase, etc. Para ser integrado en la antena final. El primer estudio ha sido:

1. **Parche rectangular:** elemento con características buenas para el diseño final. Pero tiene una eficiencia de ancho de banda menor al requerido, como se puede observar en la tabla con todos los anchos de banda y, por tanto, no cumple con todas las especificaciones necesarias. [13]

Como se ha podido ver en este elemento los parches de circuito impreso pueden ser uno de los mejores aliados para la resolución de dicho diseño.

2. **Parche de antena rectangular con ranuras:** diseño que puede ser realizado por medio del método microstrip. Como se puede ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, este elemento si tiene un ancho de banda en los parámetros S relativamente bueno, por tanto, es un buen candidato a tener en cuenta, aunque al tener polarización lineal hay que visualizar si hay otros que puedan tener RHCP con mayor facilidad. Porque se busca una relación entre bajo coste de construcción y buenas prestaciones. [14]
3. **Dipolo con parches parásitos:** Diseño creado desde un dipolo impreso sobre sustrato, al cual, se le añade dipolos parásitos para la mejora del ancho de banda mostrado por el diseño final. Este diseño plantea una idea, la cual va a ser utilizada en el diseño final. Ya que usa elementos parásitos para la mejora de la polarización y el ancho de banda, esto será muy útil para el diseño final. El diseño, de una manera individual, es descartado debido a su polarización lineal, la cual habría que modificar para obtener una polarización RHCP. Su ancho de banda es del 36.36%, el cual cumpliría con el requerido para el diseño final. [15]

4. **Parche circular alimentado por sonda coaxial:** Las características que muestra este diseño, cumple con las características requeridas por el sistema final a implementar, ya que es un parche sobre microstrip capaz de proporcionar un ancho de banda suficiente para el diseño y una polarización circular, totalmente necesaria para ello. Como se verá en el apartado de diseño este será el parche utilizado con la introducción de ciertas modificaciones, que son capaces de mejorar el ancho de banda del diseño, proporcionar un centro de fases estable y la radiación requerida desde el principio. El ancho de banda proporcionado por este parche es del 36.25%. La polarización se conseguirá por medio de la introducción de cuatro sondas coaxiales de alimentación. [16]
5. **Antena impresa con dobleces:** Otro de los diseños encontrados es el correspondiente a la antena impresa con dobleces, la cual tiene uno de los anchos de banda más grandes de todos los diseños encontrados con un 50%. Pero debido a su dificultad de implementación y de obtener una polarización circular hace que esta sea descartada, ya que existen otras opciones mejores. [17]
6. **Fed planar:** diseño de antena de parche microstrip basado en un parche con forma de gota de agua alimentado por medio de una línea microstrip. Este diseño tiene el mejor ancho de banda, de todos los parches seleccionados en el estudio previo, con un 120%. Pero debido a su dificultad de diseño y la falta de polarización circular hace que sea otro de los diseños descartados, siendo utilizados diseños con menor dificultad. [18]
7. **Multibanda:** el siguiente diseño con mayor ancho de banda es el correspondiente a un diseño microstrip multibanda, basado en monopolos conformados a lo largo de un plano de masa con diferentes espesores y longitudes, en este diseño pasa exactamente lo mismo que el anterior, en los cuales se consigue un gran porcentaje de ancho de banda, pero tienen que ser modificados para tener la polarización requerida para las características finales del diseño. [19]
8. **Doble dipolo:** El dipolo doble consiste en dos dipolos planos diseñados sobre parche microstrip, alimentadas por medio de una línea microstrip, obteniendo un ancho de banda, siendo el ancho de un dipolo simple que tiene sobre el 10%, del 84%. El problema principal que se tiene en este diseño es como el de la mayoría, la polarización necesaria frente a la existente en dicho diseño. En este caso es una polarización lineal. [20]
9. **Bow-tie:** diseño bow-tie, es una forma característica de dipolo impreso sobre microstrip conectado a una alimentación por medio de línea microstrip, en este caso el parche puede ser alimentado fácilmente para polarización lineal o circular. Realizándose por medio de una alimentación mediante balun, desfasando una de las líneas 90 grados con respecto a la otra y alimentando así cada uno de los brazos del dipolo, lo que conlleva una obtención de polarización circular. Teniendo un ancho de banda de 51,85%. [21]
10. **Monopolo sinusoidal:** El último diseño es junto con el diseño de dipolos con parásitos, por los cuales se obtiene la idea del diseño de los elementos parásitos finales colocados en el parche final, consiguiendo mejora de la adaptación del ancho de banda. El cual tiene un ancho de banda de 44.44%. [22]

Por tanto, como se ha explicado en este último parche estudiado, el diseño final va a tener parásitos sinusoidales para modificar el comportamiento de la corriente del parche y con ellos conseguir una mejor respuesta de ancho de banda final.

**Tabla 4-1: Elementos Candidatos**

Nombre	F1(GHz)	F2(GHz)	Fc(GHz)	%BW		
<b>Objetivo</b>	1.15	1.65	1.4	35.7142		
<b>Parche rectangular</b>	4.5	4.6	4.55	2.19780		
<b>Rectangular con ranuras</b>	1.8	5.8	3.8	105.264		
<b>Circular ranuras</b>	1.5	1.8	1.65	18.1818		
<b>Antena para GPS</b>	2.581	2.660	2.62	3.01469		
<b>Dipolo con parásitos</b>	1.8	2.6	2.2	36.3636		
<b>P circular alimentado sonda coaxial</b>	1.703	2.457	2.08	36.25		
<b>P2P antena</b>	2.4	2.5	2.45	4.08163	@	$S_{11} \geq -10\text{dBi}$
<b>Impresa con dobleces</b>	3	5	4	50		
<b>Fed Planar</b>	3	12	7.5	120		
<b>Doble banda PIFA</b>	4.8	63	5.55	27.027		
<b>Multibanda</b>	1	3.5	2.25	111.111		
<b>Trapezoidal</b>	1.64	2.08	1.86	23.6559		
<b>Doble Dipolo</b>	5.8	14.2	10	84		
<b>Bow tie</b>	57	11.9	9.45	51.85185		
<b>Monopolo sinusoidal</b>	2.1	3.3	2.7	44.444		

## 4.2 Selección de diseño

Como ya se ha indicado anteriormente, el primer paso realizado ha consistido en el estudio de parches con ancho de banda suficientes para cumplir con las especificaciones finales. Posteriormente se ven las posibilidades de dichos parches con respecto a la polarización del elemento, ya que todos los elementos seleccionados tienen polarizaciones diferentes a la requerida, RHCP. Tras esta observación cabe concluir con que van a ser necesarias ciertas modificaciones para obtener la polarización característica de los sistemas de navegación por satélite.

La elección de parches para el diseño final se ha basado en los requisitos y prestaciones, frente a coste en la creación de la estructura final.

Una vez explicado las condiciones necesarias para la elección, se procede a explicar el diseño del elemento final.

- El diseño final seleccionado se basa en la elección del parche circular explicado en el apartado 4, elemento 4.

Parche circular alimentado por sonda coaxial. Este parche implica un ancho de banda del 36.25%, eficiencia adjunta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se puede observar que cumple con el requisito necesario para el

elemento final, el cual sería el 35.71%. El siguiente requisito a observar es la polarización del elemento. El elemento estudiado en el apartado anterior es un parche circular alimentado con una sonda coaxial, el cual proporciona una polarización lineal.

Este problema puede ser resuelto de una forma sencilla, la cual consiste en la modificación de la forma de alimentación. Introduciendo 3 sondas coaxiales más. Tras tener cuatro alimentaciones se consigue una polarización RHCP. Por tanto, con esta alimentación se puede cumplir con las especificaciones más importantes.

- El otro elemento seleccionado es el parche de monopolo sinusoidal, el cual según la tabla presta una eficiencia en ancho de banda de 44.44%. Este elemento sería una buena elección ya que cumple con la limitación de 35.71% necesario para el elemento a realizar y se podría obtener una polarización circular a derechas fácilmente, mediante el balun mencionado en apartados anteriores. Este elemento se selecciona para estudiar los monopolos con geometrías específicas que luego puedan ser integrados en el diseño de la antena final.

Tras este pequeño estudio realizado, se puede concluir que estos dos diseños son la mejor elección de implementación final. Por tanto, se procede a diseñar la estructura en CST, para observar el comportamiento real de los parches y posterior estudio final con elección del elemento radiante a construir.

### ***4.3 Descripción de los componentes de la antena seleccionada***

En este apartado de la última parte de la memoria, se pasa a la explicación del elemento final por partes, donde se encuentra el elemento radiante final diseñado, se menciona también la forma de alimentación de este, con la posterior descripción de los pasos seguidos para la implementación final.

Otro de los puntos importantes de esta última parte es el uso de cada uno de los materiales. Los materiales utilizados para este proyecto están indicados en el anexo A.L, donde aparte de indicar los materiales utilizados también se adjuntan los valores de la tangente de delta,  $\epsilon_r$ , junto con los espesores utilizados para cada uno de los elementos. Materiales.

#### **4.3.1 Elemento radiante**

Según se ha ido indicando en los apartados precedentes a este, los pasos a seguir han sido en primer lugar el estudio de elementos capaces de cumplir con las especificaciones, y posterior elección de ellos para su diseño.

Los elementos elegidos por sus características de ancho de banda y polarización son el elemento circular alimentado por sonda coaxial, 4, y el correspondiente al monopolo sinusoidal, 10, ya que ambos cuentan con un ancho de banda superior a 35.71%, y porque aunque tengan una polarización lineal, las modificaciones para conseguir una polarización circular son relativamente sencillas de realizar.

Tras realizar ambos diseños y posterior ejecución se ha observado que el parche circular cumple mejor con las especificaciones, y por consiguiente se procede a la elección del elemento circular como elemento radiante final.

Utilizando las características del monopolo sinusoidal en la última parte del diseño final del elemento radiante.

A continuación, se va a proceder a la explicación por partes del elemento radiante final:

- **Parche activo:** En primer lugar, se procede al diseño de un parche circular simple constituido por un plano de masa, seguido de un material, Foam, encargado de separar la parte del plano de masa con la parte del sustrato y el conductor constituyente al parche encargado de radiar, parche activo.
- **Parche apilado:** la segunda parte consiste en la elaboración de un parche apilado para mejorar la respuesta en los parámetros de salida S11, compuesto por un parche escalado con respecto al creado en la primera parte, junto con otra placa de sustrato. Implementadas como se indica en el apartado 4.4.
- **Dipolos:** la tercera parte del diseño consiste en introducir elementos parásitos en forma de dipolos, para variar e introducir picos de resonancia en la respuesta de los parámetros S11, con la modificación de las corrientes que se crean en el parche apilado. La idea de estos dipolos curvos parásitos se basa en el parche observado, monopolo sinusoidal, del subapartado 10, índice 4.

Ya que como se explico tiene un ancho de banda, que cumple con las expectativas principales del diseño final, y la polarización sería circular. Estos dipolos pueden ser implementados en la parte interna de entre ambos parches, y también puede ponerse en la parte superior del sustrato apilado. En la parte interna hay que vigilar la separación entre parche apilado y dipolos y en la parte superior no se tendría este problema.

En primer lugar, dichos elementos están implementados con dipolos  $\lambda/4$ , con un espesor igual al calculado en el modelo de cavidad. En el apartado correspondiente a diseño del sistema, se comentan las formas y los lugares donde se implementa cada uno de los elementos diseñados.

- **Alimentación:** la última parte a comentar del elemento radiante final es la alimentación de dicho elemento. La alimentación consiste en la implementación de 4 sondas coaxiales, por medio de un conector SMA introducido en la parte inferior del plano de masa, con un filamento de alimentación que comprende el tamaño desde el principio del conector SMA hasta la parte superior del coaxial circular encontrado en el sustrato simple principal, como se puede ver en el apartado 4.4. La implementación de esta forma de alimentación se basa en la obtención de la polarización RHCP, necesaria para poder implementar o usar dicha antena en un sistema de tipo GNSS. Ya que si no se obtienen mismas polarizaciones entre los elementos integrantes de un sistema se obtiene una eficiencia casi inexistente, por medio de las pérdidas por polarización. La eficiencia de polarización es del 100% si ambos sistemas comunicantes tienen misma polarización, sino esta eficiencia decae dependiendo de cada una de las dos polarizaciones implementadas.

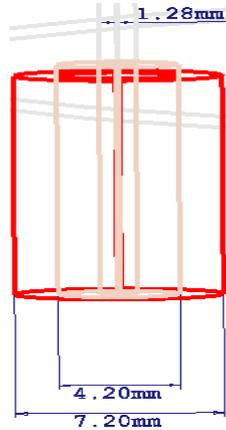
Debido a lo explicado anteriormente se hace tanto hincapié en el cumplimiento del ancho de banda y de la polarización del elemento, ya que con fallos en uno de estos dos conceptos se podría perder la comunicación entre dos elementos.

Esta alimentación está compuesta por filamentos dispuestos durante las perforaciones realizadas por los sustratos de foam, FR4 hasta llegar al feed o alimentador.

### 4.3.2 Alimentación del elemento radiante

Como se ha indicado en el apartado 4.3.1, con la explicación del elemento radiante final. Este elemento va a ser alimentado por sondas coaxiales, conectadas con los conectores SMA por una parte y por otra, creando una perforación de los sustratos hasta la parte superior

donde se encuentra situado el parche a alimentar con polarización RCHP, la dirección de las Z positivas. Los elementos de sonda coaxial están compuestos por un conector SMA como el mostrado en la Figura 4-1, posteriormente se hace una perforación en el plano de masa y en ambos sustratos como se va a ver en la implementación explicado en el siguiente apartado 4.4.



**Figura 4-1: Conector SMA**

#### ***4.4 Descripción de la implementación de diseño inicial en CST***

En los siguientes dos apartados se procede a la explicación de la realización de dicha estructura final a estudiar y a construir. Esta explicación se basa en dos partes, la primera consiste implementación en CST del elemento radiante, anexo A.I, el cual se puede separar en tres pasos de diseño diferentes, comprendidos en un parche simple, anexo A.I subapartado 1.1, posteriormente en un parche apilado, anexo A.I subapartado 1.2, y finalmente en un parche apilado con elementos parásitos, anexo A.I subapartado, capaces de mejorar las especificaciones finales de un sistema de GNSS.

Para la explicación completa se ha dividido el diseño en tres partes importantes para una mejor explicación y estudio de dicho elemento, estas partes son: elemento radiante, elemento de alimentación y por último cada uno de los elementos bajo estudio del sistema, estos son los elementos diseñados por partes para su posterior implementación conjunta.

Otro de los puntos a explicar en este apartado es la implementación de la alimentación, anexo A.I apartado 2, la cual está compuesta por coaxiales de alimentación y alimentadores que siguen el principio de acoplo para dicha alimentación.

Al final de este apartado también va a ser comentado el diseño realizado en el TFG de Adrián, ya que este consiste en mejorar el sistema completo haciendo un parche con buenas prestaciones. Se comentará la parte del sistema a utilizar para el diseño final, es decir, la estructura con chokes 3D, anexo A.M.

#### ***4.5 Diseño de componentes bajo estudio***

Para la correcta explicación de este TFG es necesaria la explicación del componente creado en el TFG antecesor. Este componente es una estructura de chokes 3D, encargado de optimizar la respuesta de salida de los parámetros S11 y radiación de un elemento radiante, el cual es diseñado en este TFG.

Tras explicar cómo se ha implementado cada uno de los componentes del elemento radiante se procede a explicar el diseño de cada uno de ellos, es decir, el porqué de esta implementación final. Dicha explicación se encuentra situada en el anexo A.J.

#### **4.5.1 Parche activo simple.**

En primer lugar, se explica la implementación del parche activo simple, el cual se calcula sus dimensiones con las fórmulas adjuntas en el anexo A.J apartado 1.11,. Tras esto se busca la altura optima entre plano de masa y parche activo como se puede ver en la Figura 0-19, junto con la mejora obtenida con el radio optimo del plano de masa, Figura 0-20. Finalmente se procede al cálculo del factor de escala necesario para tener un ancho de banda relativamente optimo, Figura 0-21, a continuación, se adjunta una tabla en la cual se quedan conformadas las dimensiones finales parametrizadas anteriormente, Tabla 0-2.

#### **4.5.2 Parche apilado.**

Una vez implementado el elemento parche activo simple se procede a la implementación de un parche apilado, el cual mejora un poco el ancho de banda como se puede observar en la Figura 0-22. Tras introducir el parche apilado también se hace una parametrización del factor de escala optimo obteniendo un valor de 0.85, Figura 0-23, junto con la parametrización de la altura entre parche activo simple y parche apilado, Figura 0-24. Tras estas implementaciones se obtienen las siguientes dimensiones expuestas en la Tabla 0-3.

#### **4.5.3 Parche con dipolos parásitos.**

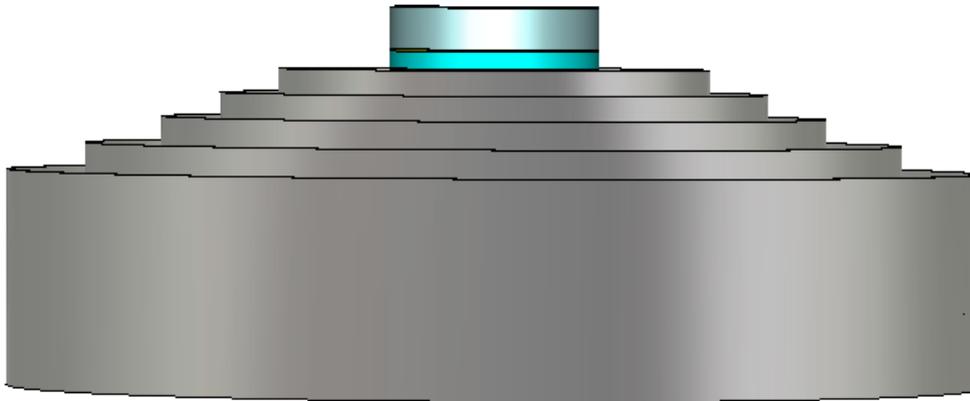
Finalmente se procede a la implementación de los dipolos parásitos, que funcionan como un polarizador capaz de mejorar las especificaciones. En primer lugar, se calculan las dimensiones de los dipolos con la teoría de monopolos para una longitud e  $\lambda/4$ , como se explica en el anexo A.J apartado 5.3.1, se obtienen los siguientes valores Tabla 0-4 y Tabla 0-5, dispuestos de una manera concéntrica de la misma forma que se indica en la Figura 0-25. Una vez simulado e implementado todo el elemento radiante con dipolos y parche apilado se pasa a observar las diferentes modificaciones que pueden ser realizadas para un correcto comportamiento y reducción de implementación de elementos que pueden ser no necesarios. En primer lugar, se pasa al estudio de los elementos de dipolos para ver que aportación realizan al diseño, como se puede observar estos hacen un aumento de ancho de banda sobre la estructura. Arrojando una sospecha, en la cual se estudia el comportamiento de dichos elementos sin parche apilado y con parche apilado, obteniendo una diferencia de anchos de banda pequeña entre el elemento con parche apilado y sin él, por tanto, se decide a una implementación final sin el ya mencionado parche apilado, Figura 0-26, ya que se cumple con los requisitos. Finalmente en la última fase del anexo, se procede a la conformación final de los dipolos, obteniéndose dipolos con dos anchos diferentes, teniendo uno más grueso y otros dos más finos, dispuestos con diferentes longitudes entorno al eje de coordenadas, Figura 0-27, obteniendo una respuesta final Figura 0-28, que se puede observar que cumple con las especificaciones indicadas para el ancho de banda.

En el siguiente apartado, 5, se hace un estudio de las diferentes especificaciones para comprobar su correcto cumplimiento.

### **4.6 Estructura con chokes 3D.**

Una vez explicada la implementación del elemento radiante se procede a la explicación del último elemento constituyente de este sistema. Dicho elemento es una estructura con corrugaciones de chokes 3D, implementadas y explicadas en el TFG de Adrián.

Dicho elemento consiste en implementar corrugaciones 3D por la parte exterior, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para controlar las ondas incidentes de bajo nivel provocadas por multi-camino, como se ha explicado en el anexo A.C.



**Figura 4-2: Elemento final con la estructura de chokes 3D**

La explicación de las medidas de cada choke 3D se encuentran explicadas en el anexo A.M.

## 5 Análisis de resultados

Este último apartado de la memoria es el correspondiente a mostrar los resultados obtenidos con los respectivos comentarios acerca de ellos. En primer lugar, se va a comentar los resultados obtenidos en CST, 0. Dentro de los resultados obtenidos en CST se obtienen dos estructuras diferentes, la primera correspondiente a la estructura del elemento radiante y la segunda estructura corresponde con la estructura del elemento radiante junto con la compuesta por los chokes 3D. La forma de construcción está comentada en el anexo A.M.

### 5.1 Resultados CST

El primer paso a realizar después de la implementación de la estructura es el análisis de cada uno de sus resultados, es decir, observar el comportamiento de sus parámetros S11 y de la radiación para poder visualizar si se cumple con las especificaciones.

#### 5.1.1 Elemento radiante.

Tras haber comentado cada una de las modificaciones para obtener una respuesta que cumpla con las especificaciones indicadas en el comienzo de esta memoria, 3.2, se ha obtenido el siguiente diseño final, Figura 5-1.

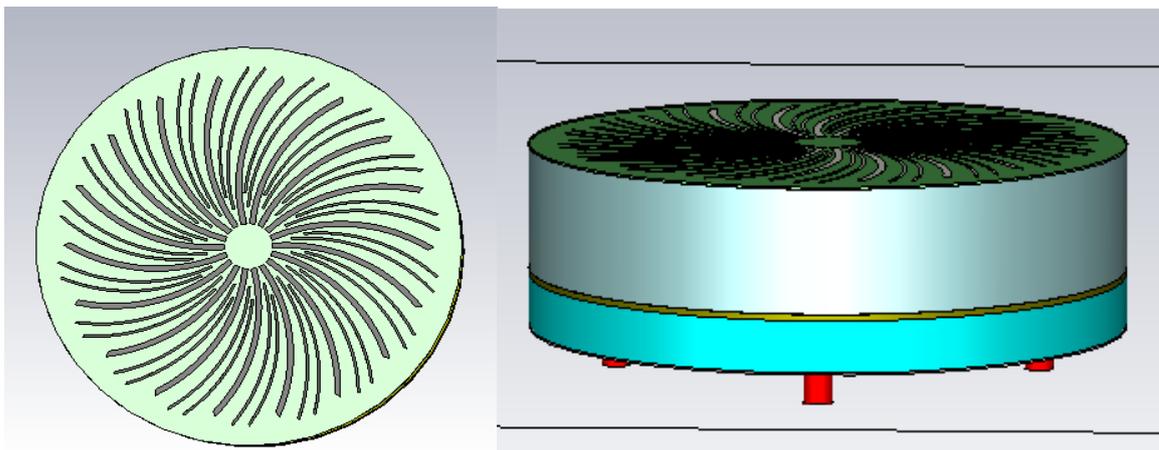
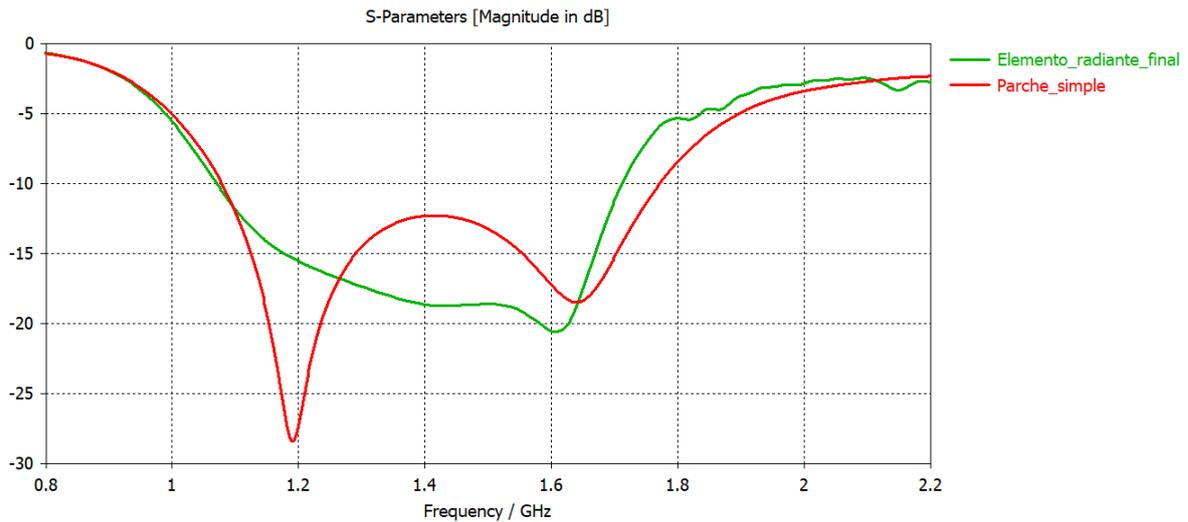


Figura 5-1: Elemento final, vista superior y perfil

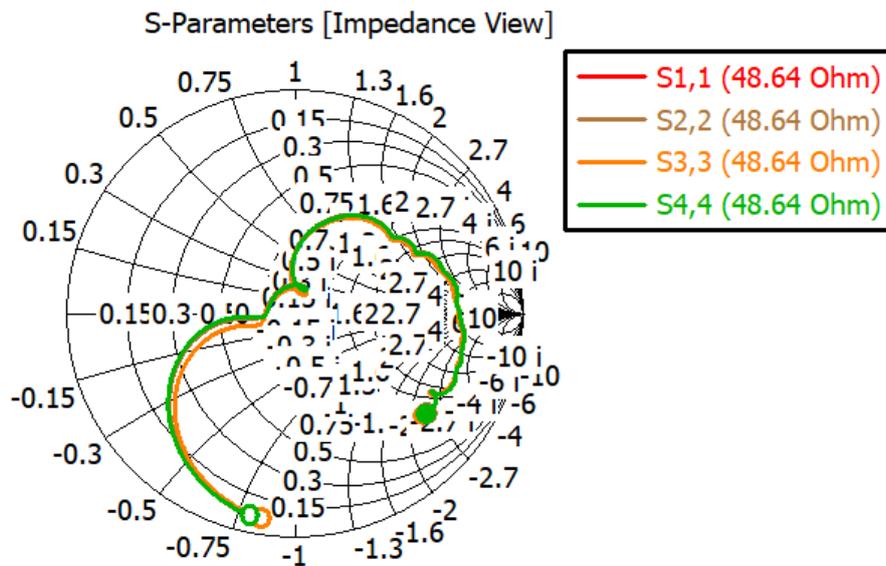
El primer paso va a ser visualizar que se cumple con la adaptación en el ancho de banda de 1.15 – 1.65 GHz, con una adaptación menor a -10 dBi, para toda la banda. Como se puede observar en los markers de la Figura 5-2, se observa que para todas las frecuencias de la banda se obtiene una adaptación mejor que -10dBi, para todos los puertos de la estructura.

También se inserta la respuesta en el ancho de banda del elemento inicial para observar la mejora obtenida tras el diseño. Como se puede observar en la Figura 5-2, se condensa la adaptación de la frecuencia correspondiente a la frecuencia de 1.2 GHz para mejorar la respuesta conjunta del ancho de banda, ya que se consigue en toda la banda de 1.15 – 1.65 GHz por debajo de -15 dBi.



**Figura 5-2: Parámetros S parche inicial y parche final.**

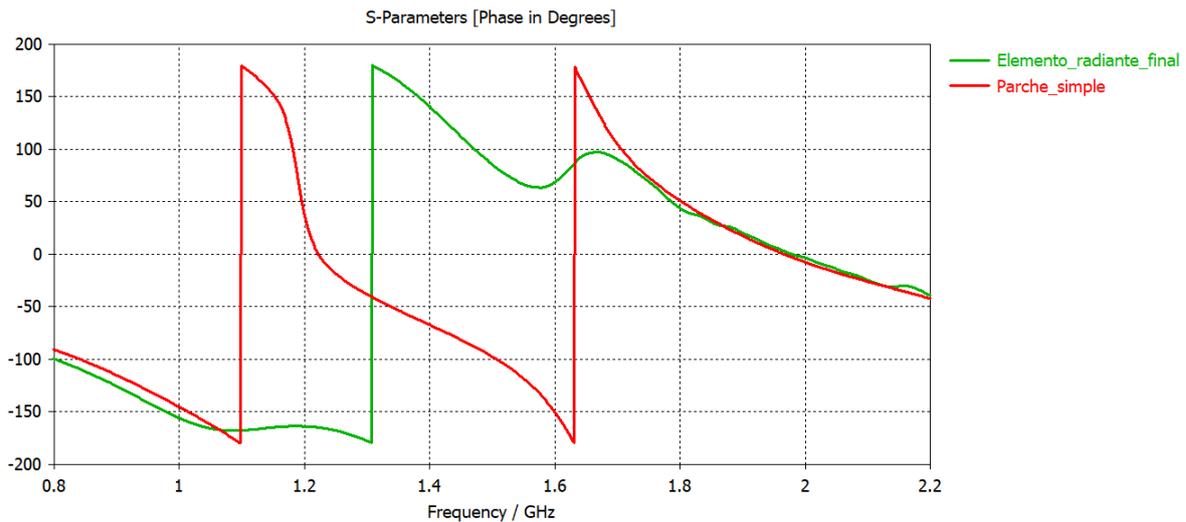
La siguiente visualización que se va a realizar es la carta de Smith correspondiente a cada puerto, donde se observa que la curva está normalizada para una impedancia de  $48.64 \Omega$ . Para la obtención de una mejor adaptación es necesario que la curva de la carta de Smith situé el lazo, que se puede observar, en el centro de coordenadas de dicha carta obteniendo así una impedancia totalmente real, Figura 5-3.



**Figura 5-3: Carta de smith**

El siguiente parámetro para estudio y análisis consiste en la fase de la estructura la cual va a ser polarizada con un desfase de  $90^\circ$  en cada puerto para obtener una polarización de tipo circular a derechas.

En la Figura 5-4, se observan las fases correspondientes al elemento diseñado en primera instancia y la fase correspondiente al elemento final después del diseño realizado.



**Figura 5-4: Fase de parche activo simple y parche con dipolos apilados**

En segundo lugar, se procede a observar la radiación de la estructura, mostrándose la radiación para cada una de las frecuencias portadoras de cada señal GNSS.

Para observar la radiación de una estructura se tienen que introducir el corte del plano principal de la estructura, el cual es la componente E.

Para la componente E con  $\phi = 90^\circ$  y  $\theta$  variando.

A continuación, se introduce la radiación del parche activo simple, Figura 5-5, y la correspondiente al parche final con dipolos apilados, Figura 5-6, para cada una de las señales correspondientes al ancho de banda entre 1.15 – 1.65 GHz.

Como se puede observar tiene mejor respuesta el elemento final, ya que se elimina el efecto de abombamiento de la parte superior, siendo casi una circunferencia constante y por la parte superior y por la parte inferior controla mejor la radiación para las frecuencias más cercanas a 1.15 GHz.

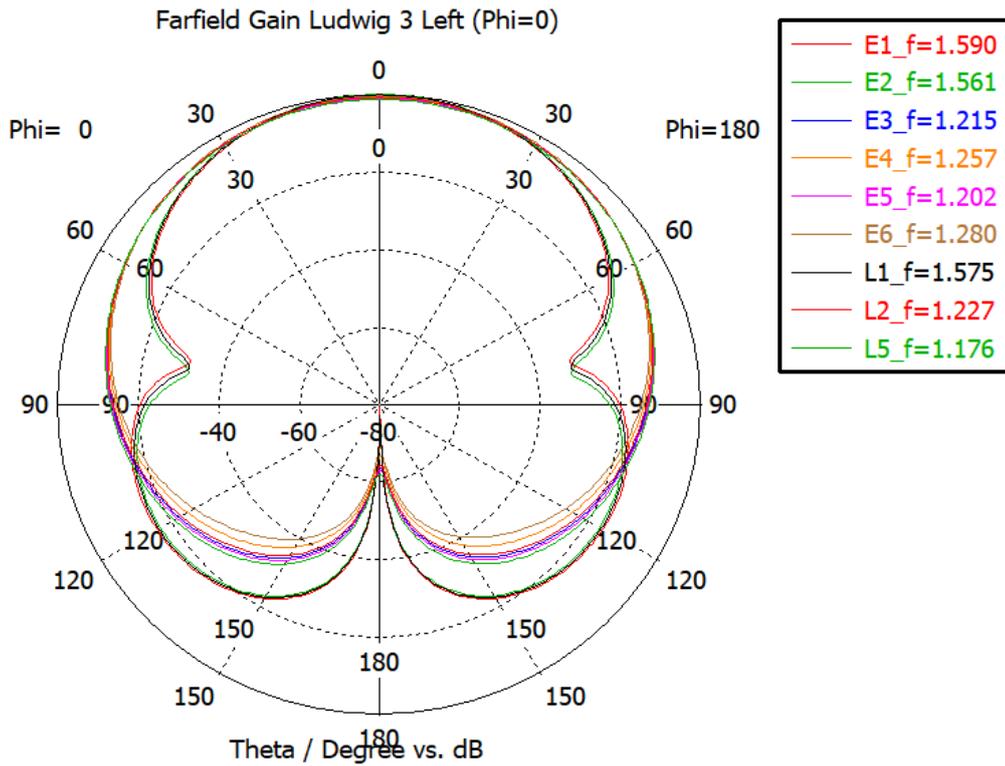


Figura 5-5: Componente Copolar E para cada señal comprendida en la banda de 1.15 – 1.65 GHz, para el parche activo simple.

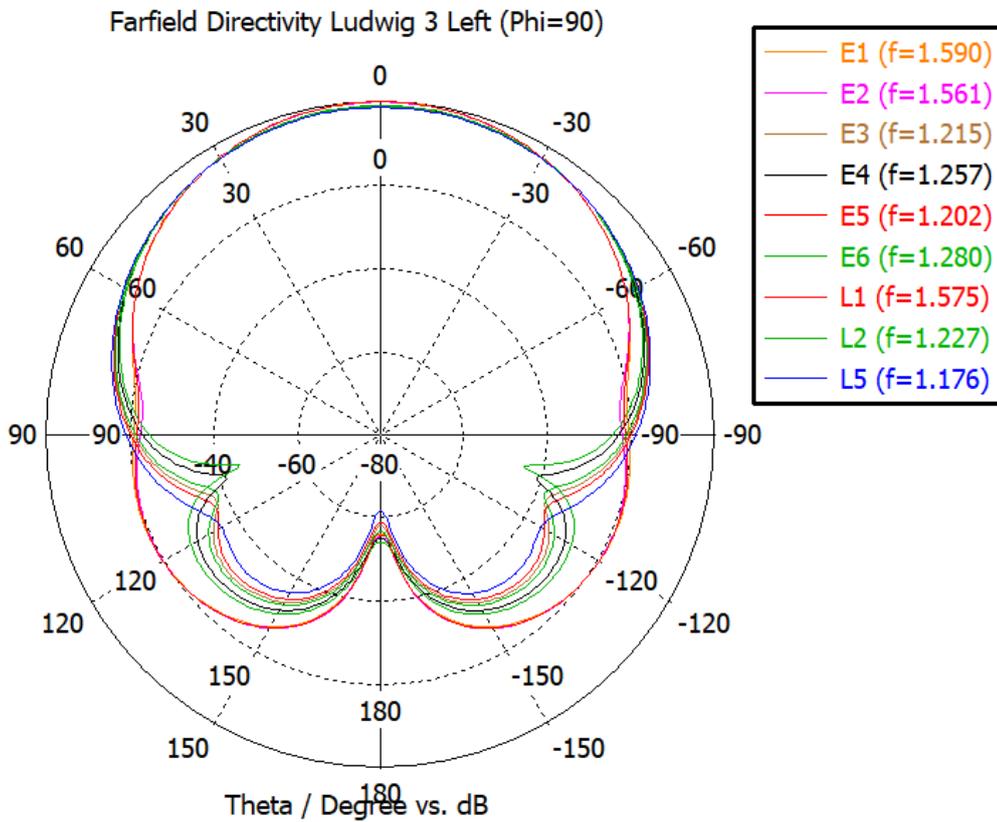
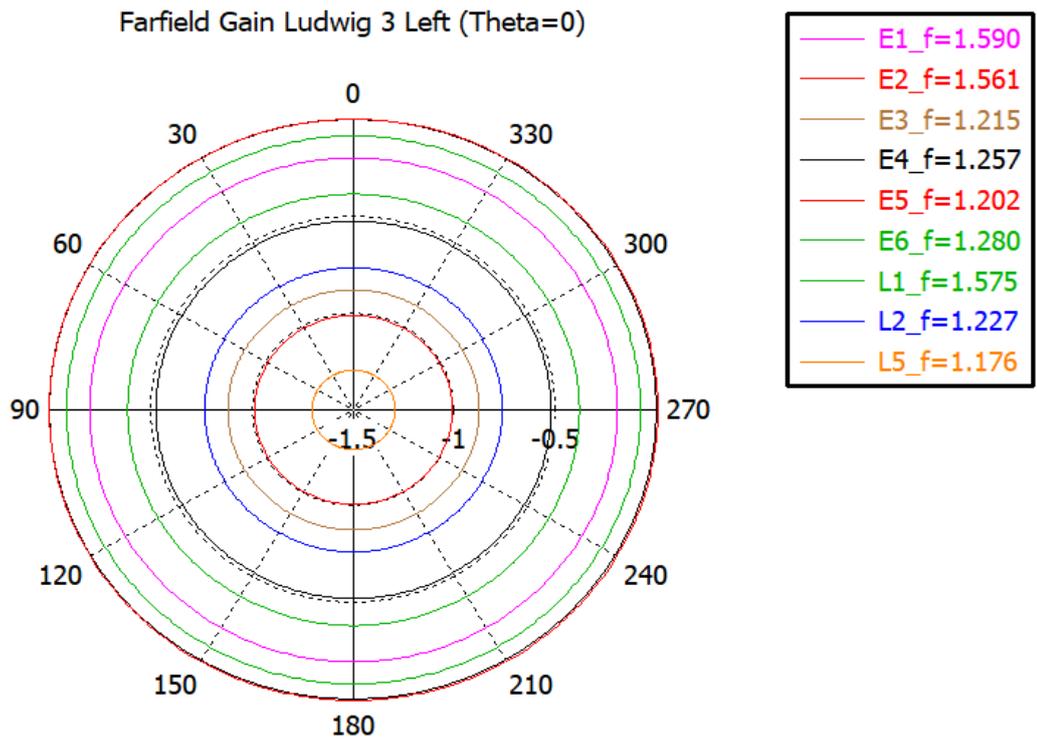


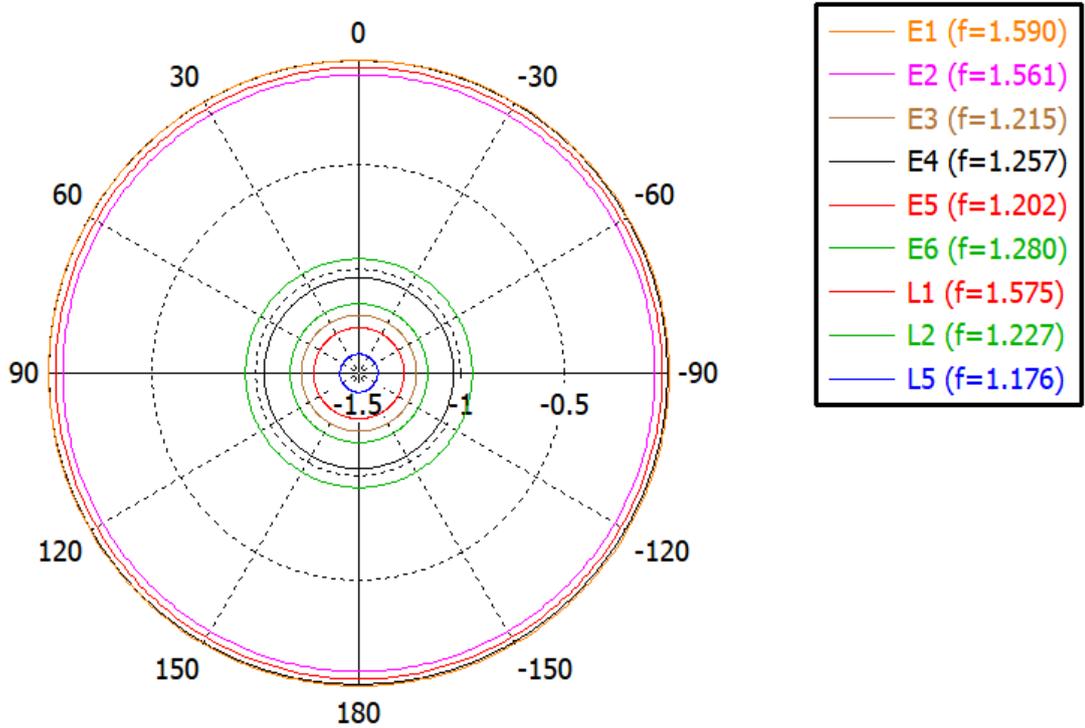
Figura 5-6: Componente Copolar E para cada señal comprendida da en la banda de 1.15 - 1.65 GHz, para el elemento radiante final.



Phi / Degree vs. dB

Figura 5-7: Copolar H parche activo simple

Farfield Directivity Ludwig 3 Left (Theta=0)



Phi / Degree vs. dB

Figura 5-8: Copolar H elemento radiante final

El siguiente paso a observar es el centro de fase ya que en las especificaciones se pide que sea menor a 2 mm.

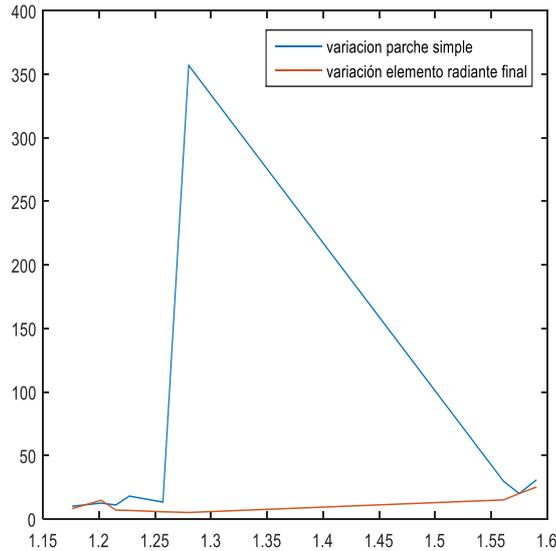
Para el correcto estudio del elemento radiante final es necesaria su comparación con el elemento con parche activo simple. Por tanto, con las siguientes figuras se puede visualizar las diferencias entre ambos elementos y con ello la explicación de la implementación de dichas modificaciones en el elemento final.

**Tabla 5-1: Centro de fase y variación del centro de fase, parche simple**

<b>Señal GNSS</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L5</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>E5</b>	<b>E6</b>
<b>Frecuencia GHz</b>	1.575	1.227	1.176	1.590	1.561	1.215	1.257	1.202	1.280
<b>Centro fase en Z +/- 30°</b>	318.6°	80.27°	156.13°	4.85°	338.12°	97.91°	36.73°	117.18°	3.90°
<b>Centro fase en Z +/- 60°</b>	311.32°	77.84°	154°	6.03°	331.27°	95.56°	34.08°	114.91°	1.054°
<b>Centro fase en Z +/- 90°</b>	150.25°	77.183°	153.55°	12.68°	171.35°	94.98°	33.14°	114.38°	359.79°
<b>Variación frente fase +/-</b>	20°	18°	10°	30.51°	29.71°	11°	13.28°	12.5°	357°

**Tabla 5-2: Centro de fase y variación del centro de fase elemento radiante final**

<b>Señal GNSS</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L5</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>E5</b>	<b>E6</b>
<b>Frecuencia GHz</b>	1.575	1.227	1.176	1.590	1.561	1.215	1.257	1.202	1.280
<b>Centro fase en Z +/- 30°</b>	331.56°	127.37°	202.91°	308.37°	355.07°	145.02°	83.39°	164.25°	49.83
<b>Centro fase en Z +/- 60°</b>	316.24°	128.95°	204.8°	291.07°	339.53°	146.69°	84.71°	166.01°	50.91°
<b>Centro fase en Z +/- 90°</b>	223.81°	134.09°	210.29°	202.01°	244.14°	151.97°	89.03°	171.44°	54.26°
<b>Variación frente fase +/-</b>	20°	6.72°	8.12°	25°	15°	6.95°	5.64°	14.75°	5.1°



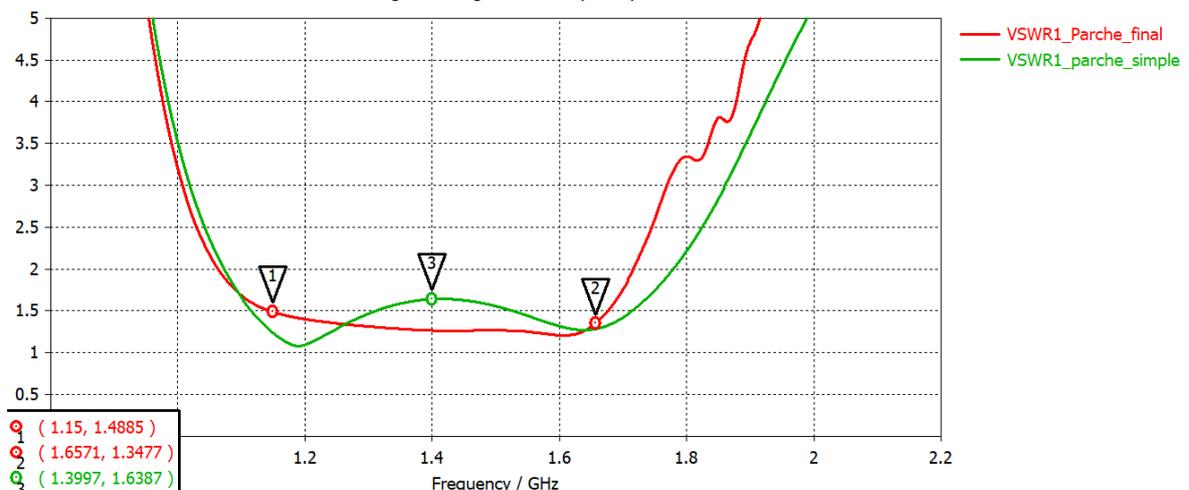
**Figura 5-9: Variación del centro de fase entre los parches simple y el elemento radiante final**

Como se puede observar en la Figura 5-9, se muestra que el elemento radiante final tiene una variación en el centro de fase menor, ya que como se ve en la Tabla 5-2, tiene valores de variación menores que en la Tabla 5-1, que tiene un pico para la señal E6, como se ve en la imagen anterior. Obteniendo mejor centro de fase para el elemento radiante final diseñado.

A continuación, se introduce la Figura 5-10, donde se observa el comportamiento del VSWR, donde para el parche inicial tiene mejor respuesta en ciertos lugares, pero a la frecuencia de 1.4 GHz se observa que el valor obtenido es 1.63 el cual está fuera de los límites indicados en los requisitos principales de la antena, valor que debe ser  $\leq 1.5$ . Para el parche final se observa que para toda la banda de frecuencias comprendida entre 1.15 – 1.65 GHz cumple con el requisito mencionado.

El valor de 1.5:1 de VSWR corresponde con una potencia de 14 dBi por debajo del valor original, es decir, se ha perdido un 4% de dicha potencia.

Para los sistemas comerciales indicados en el anexo A.D, el valor correspondiente da VSWR para las antenas de Thales y Novatel tiene un valor igual a 1.5:1, por tanto, con este elemento radiante se mejora dicha especificación ya que es menor en toda su banda.



**Figura 5-10: VSWR del elemento inicial, parche activo simple, y el elemento radiante final**

Tras analizar cada una de las partes de la antena se procede a adjuntar una tabla donde se adjuntan los valores de radiación que faltan para su completo estudio.

**Tabla 5-3: Características de radiación del elemento radiante**

Señal GNSS	L1	L2	L5	E1	E2	E3	E4	E5	E6
<b>Ganancia dBi</b>	9.23	7.52	7.39	9.25	9.21	7.49	7.64	7.45	7.74
<b>SLL dBi</b>	-19.6	-28.9	-32.7	-19.5	-19.7	-29.7	-27	-30.7	-25.7
<b>Ancho a 3dBi</b>	59.8°	71.9°	74.7°	59.5°	60.1°	72.5°	70.4°	73.2°	69.3°
<b>Eficiencia</b>	92.3 %	75%	73.9 %	92.5 %	92.7 %	74.9 %	76.4 %	74.5 %	77.4 %
<b>Directivida d dBi</b>	9.42	8.28	8.04	9.45	9.38	8.27	8.41	8.17	8.5

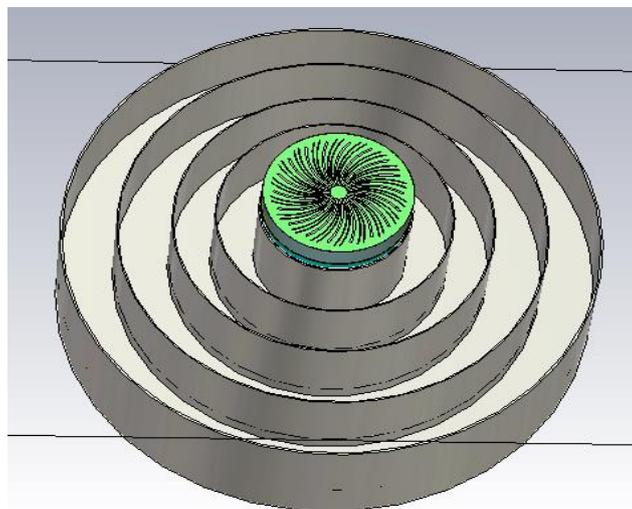
### 5.1.2 Elemento radiante más estructura con chokes 3D.

La última parte a implementar en el sistema es la introducción de la estructura con chokes 3D, implementada por Adrián, para observar la respuesta final del sistema GNSS, diseñado para cubrir las bandas comprendidas entre las frecuencias de 1.15 – 1.65 GHz.

A continuación, se introducen los resultados de la simulación, la cual no es la adecuada ya que debido a la falta de recursos computacionales no es posible mallar correctamente, mostrando así los resultados en la presentación correspondiente a este TFG.

Observando las respuestas finales del sistema se puede observar cómo se cumple con las especificaciones finales requeridas para este TFG.

Dicha estructura con chokes hace que la adaptación del elemento estudiado anteriormente tenga una respuesta con mejores características a las del apartado anterior. Al igual que el caso anterior se estudian cada uno de los parámetros importantes de la estructura final, Figura 5-11.



**Figura 5-11: Vista isométrica del elemento radiante con chokes 3D**

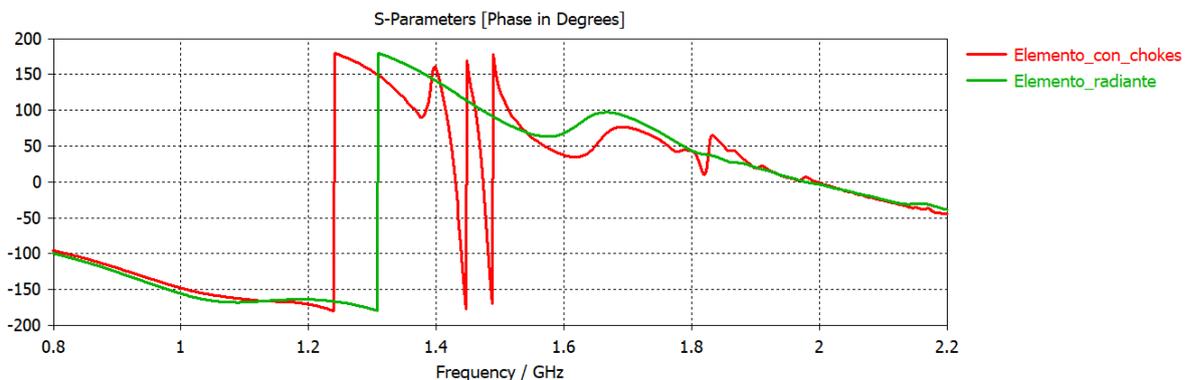
El primer estudio se hace sobre los parámetros S del elemento, los cuales están adaptados para toda la banda de 1.15 – 1.65 GHz, al igual que la estructura sin chokes 3D. Pero se obtiene una mejora en la adaptación como se puede observar en la Figura 5-12.



**Figura 5-12: Parámetros S, estructura con chokes 3D**

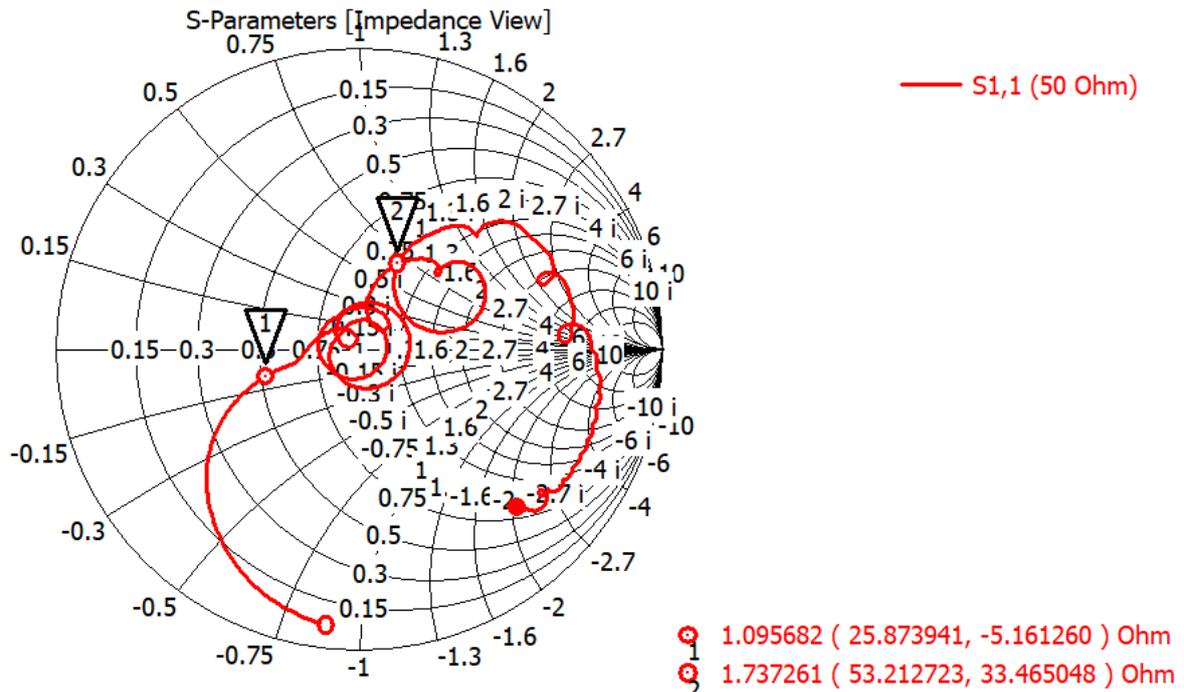
Dicha mejora de adaptación se debe al comportamiento de la estructura de chokes 3D, que como se ha comentado anteriormente en este proyecto y en el realizado por Adrián, estos son capaces de tratar las señales generados por multi-trayecto y, por tanto, conseguir un mejor comportamiento de la estructura.

En la Figura 5-13, se observan las fases correspondientes al elemento diseñado en primera instancia y la fase correspondiente al elemento final con chokes 3D.



**Figura 5-13: Fases de elemento radiante y elemento radiante más chokes 3D**

Tras las fases, se observan la carta de Smith de esta nueva estructura, donde se observa un mayor rizado al obtenido en la carta de Smith perteneciente al elemento radiante.



**Figura 5-14: Carta de Smith estructura con Chokes 3D**

El siguiente paso a observar consiste en la radiación de la estructura. Se va a mostrar la radiación para cada una de las frecuencias portadoras de cada señal GNSS.

Para observar la radiación se tienen que buscar las siguientes componentes: la componente E con  $\varphi = 90^\circ$  y  $\theta$  variando y  $\theta = 0^\circ$  y  $\varphi$  variando.

Como cabe esperar por lo mencionado durante toda la escritura de la memoria se obtiene una mejor radiación una vez introducida la estructura de chokes 3D, aunque en las figuras observadas, Figura 5-15 y Figura 5-16, se observa una mejora para frecuencias más cercanas a 1.15 GHz. Esta mejora debería ser más sustancial en el momento en el que se introduzca mayor mallado a la simulación, ya que esta simulación realizada tendrá mayor precisión.

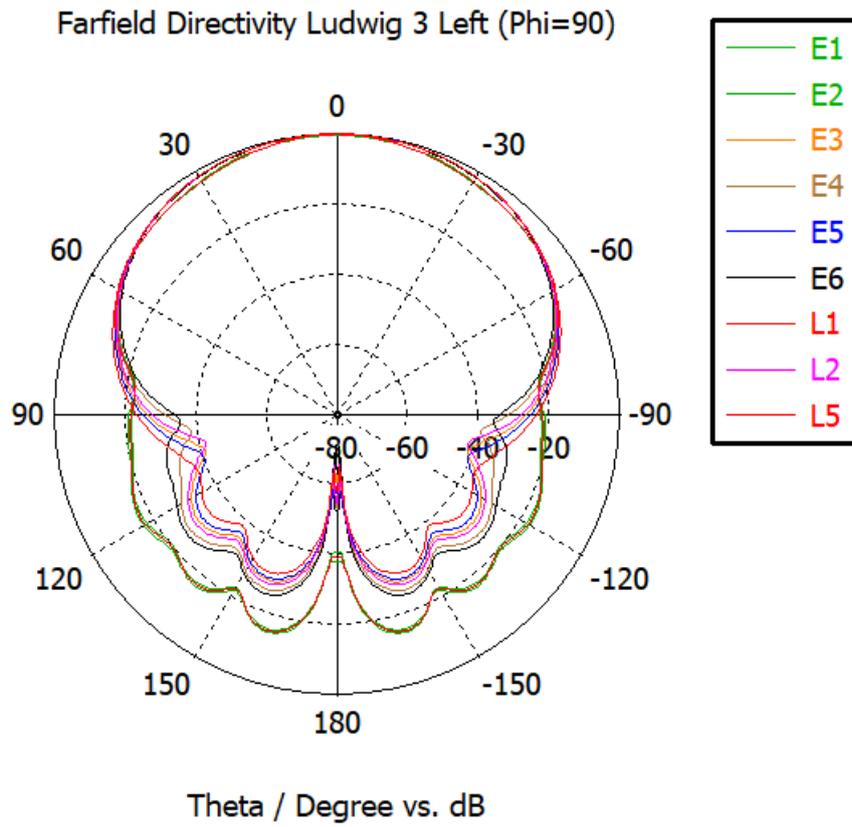


Figura 5-15: Radiación Copolar Campo E para cada Señal de las bandas GNSS

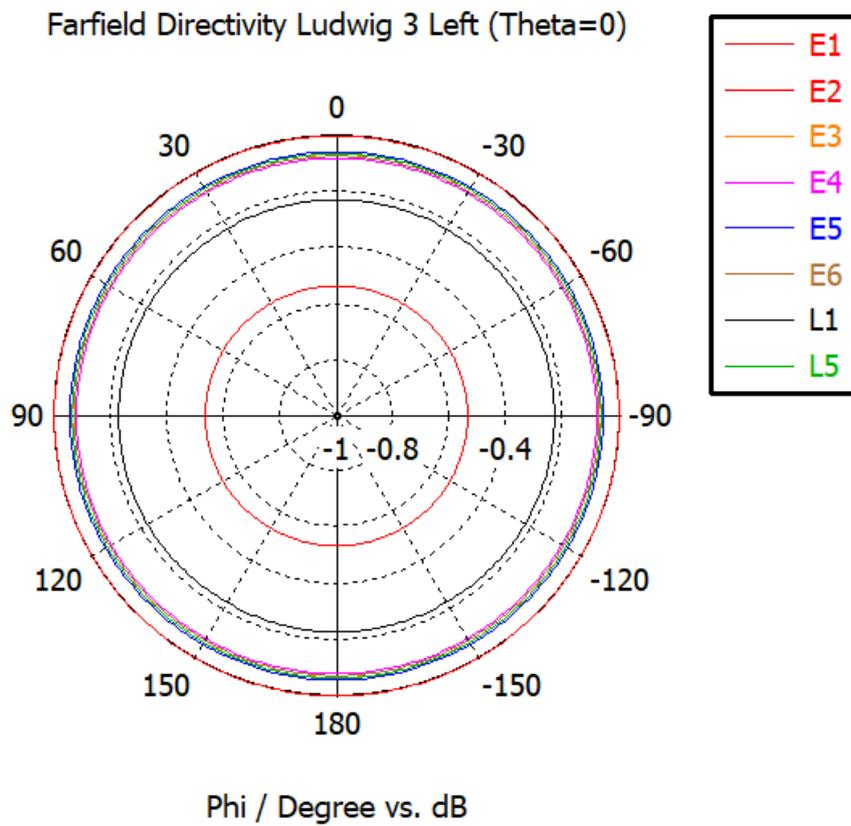


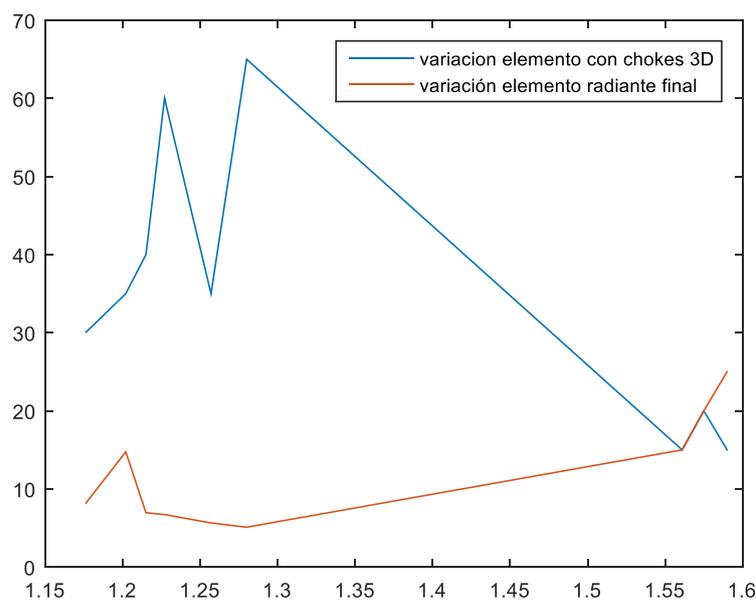
Figura 5-16: Radiación Copolar Campo H para cada Señal de las bandas GNSS

El siguiente paso a observar es el centro de fase ya que en las especificaciones se pide que sea menor a 2 mm. Los resultados del centro de fase se encuentran en la siguiente tabla, donde se observa que el centro de fase es muy poco estable, y esto se debe a que esta estructura tiene una radiación muy directiva. La comparación puede ser vista con respecto a los datos insertados en el apartado 5.1.1.

Para este parámetro se adjunta la representación del valor variación del elemento de chokes 3D, y el elemento radiante, donde se observa mayor variación para el elemento de chokes para el elemento radiante. Esta variación no es real, ya que la falta de mallado hace que se obtengan datos que no son buenos.

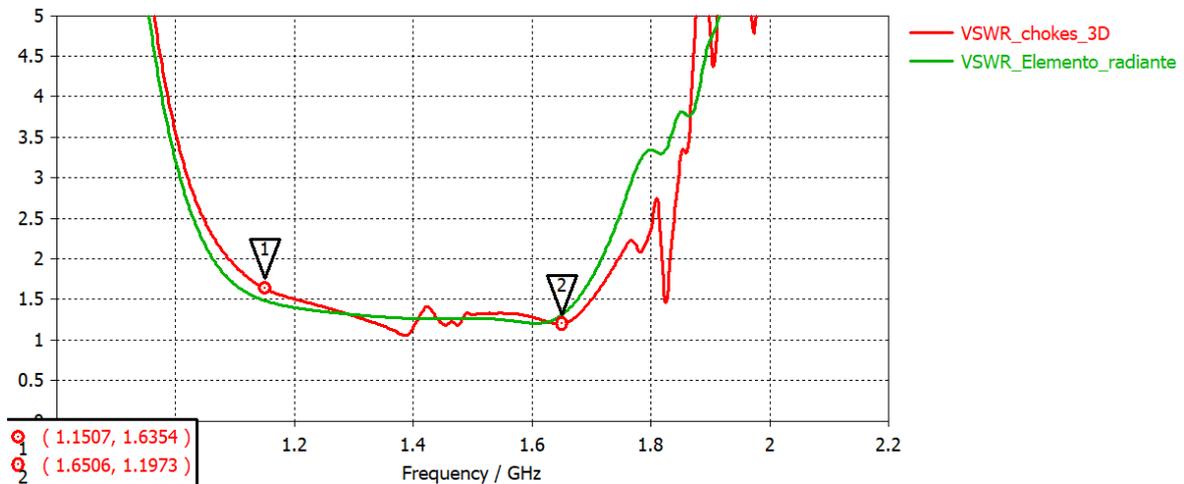
**Tabla 5-4: Centro de fase y radiación estructura con chokes 3D**

Señal GNSS	L1	L2	L5	E1	E2	E3	E4	E5	E6
<b>Frecuencia GHz</b>	1.575	1.227	1.176	1.590	1.561	1.215	1.257	1.202	1.280
<b>Centro fase en Z +/- 30°</b>	148.75°	245.45°	323.37°	127.18°	168.75°	268.41°	209.13°	286.69°	176.61°
<b>Centro fase en Z +/- 60°</b>	75.88°	207.25°	278.77°	49.9°	100.45°	224.14°	165.68°	242.15°	134.19°
<b>Centro fase en Z +/- 90°</b>	115.5°	135.05°	201.08°	93.78°	134.84°	150.08°	105.04°	165.34°	101.4°
<b>Variación frente fase +/-</b>	20°	60°	30°	15°	15°	40°	35°	35°	65°



**Figura 5-17: Variación del centro de fase**

El siguiente paso a realizar consiste en el parámetro VSWR, el cual como se puede observar tiene un ligero empeoramiento en la frecuencia de 1.15 GHz debido al mallado, y una mejora para frecuencias mayores. Al introducir el mallado más alto se observará una mejora en dicho parámetro para todas las frecuencias. Y por tanto, se obtiene una mejora notable con respecto a los sistemas comerciales nombrados en el apartado 5.1.1, los cuales el fabricante indica que tienen un valor de VSWR de 1.5:1.



**Figura 5-18: VSWR Elemento radiante y Elemento con estructura de chokes 3D**

Tras analizar cada una de las partes de la antena se procede a adjuntar una tabla donde se adjuntan los valores de radiación que faltan para su completo estudio.

**Tabla 5-5: Características de radiación de la estructura con chokes 3**

Señal GNSS	L1	L2	L5	E1	E2	E3	E4	E5	E6
<b>Ganancia dBi</b>	7.93	7.93	7.95	7.61	8.17	7.95	7.96	7.95	8.02
<b>SLL dBi</b>	-15.4	-28.1	-31.2	-14.6	-16	-28.9	-26.4	-29.7	-25.2
<b>Ancho a 3dBi</b>	58	76.5	77.2	63.6	52.6	76.6	75.8	76.8	74.8
<b>Eficiencia</b>	79.3%	79.35%	79.5%	76.1%	81.7%	79.5%	79.6%	79.5%	80.2%
<b>Directividad dBi</b>	8.14	8.29	8.3	7.83	8.36	8.3	8.29	8.31	8.29

## 5.2 Conclusiones

Tras el estudio de las señales de GNSS se observaron ciertos problemas como puede ser el comportamiento de las ondas por multi-trayecto, lo que provoca el estudio de diferentes estructuras como son las estructuras de chokes para controlar este aspecto. Dichas estructuras provocan una mejora sustancial en los sistemas de navegación por satélite, como se puede observar en la simulación final del elemento radiante con chokes 3D.

El primer estudio que se ha seguido en este trabajo ha consistido en la mejora y en la búsqueda de cubrir todas y cada una de las señales existentes en la navegación por satélite, Señales L y Señales E, correspondientes a cada uno de los sistemas de navegación por satélite existentes por el mundo como, GPS Estados Unidos, Galileo Europa, etc. En la actualidad cada uno de los continentes incluso países se han dedicado a diseñar sistemas de navegación por satélite propios para no tener la necesidad de utilización de GPS, lo que provoca una

mayor existencia de señales y por tanto, elementos electrónicos que necesitan comprender cada una de las frecuencias existentes.

Esta motivación lleva a crear estructuras capaces de comprender toda esa banda de frecuencias, como es el caso de propósito de este proyecto, conseguido por medio del elemento radiante diseñado.

Dicho elemento comprende las frecuencias de 1.15 – 1.65 GHz, cubriendo las señales L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5, E6. Tras observar los resultados vertidos por este proyecto se observa una buena radiación, mejora en el ancho de banda, ya que se comprenden todas las señales de navegación por satélite excepto la señal C. Una mejora del centro de fase por medio de los dipolos apilado diseñados, aunque puede mejorar su comportamiento, ya que tiene una buena respuesta de centro de fase para las frecuencias más cercanas a 1.15 GHz, pero para las superiores empiezan a tener una variación de centro de fase mayor a 2 mm.

El centro de fase ha sido mejorado ya que en el proyecto anterior había una variación de entre 1.46 mm hasta 7.63 mm, mejorándose a una variación de 0.3 mm hasta 1.42 mm.

Obteniéndose una polarización circular a derechas. En lo relacionado con las dimensiones han sido bajadas aun baremo entre 170 mm x 75 mm, pero esto podría ser mejorado en un futuro por medio del rediseño del elemento.

### **5.3 Líneas futuras**

Para este TFG se ha realizado una mejora del sistema diseñado en el proyecto precedente para obtener un sistema que cumpla con las especificaciones de los sistemas GNSS seleccionados, que recibe a las bandas L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5 Y E6.

Tras diseñar dicho nuevo elemento, se debe implementar el elemento que recibe las señales L1, L2, L5, E1, E2, E3, E4, E5, E6, junto con el nuevo elemento para la señal en banda S.

Otra de las mejoras a realizar en el futuro está relacionada con el diseño realizar en este trabajo de fin de grado. Las modificaciones deben ser capaces de mejorar las especificaciones de los sistemas de navegación por satélite seleccionados. Como se ha indicado en las conclusiones una de las posibles mejoras a realizar es la estabilidad del centro de fase para las frecuencias superiores de la banda comprendida entre 1.15 – 1.65 GHz. Esta modificación se puede obtener modificando el ancho de los dipolos apilados del elemento radiante o aumentando el número de elementos de alimentación con rotación secuencial.

Por otro lado, se puede estudiar la geometría de los dipolos y su alimentación para optimizar el tamaño del elemento radiante.

Esta optimización se puede hacer por medio del rediseño de la posición de dichos dipolos, ya que, si estos están más rotados, ocuparían menor espacio y por consiguiente se obtendría unas mejores dimensiones. Aunque también será necesario el estudio de diferentes geometrías de los dipolos y antenas cuadri-filares o similares sobre estructuras planas.

# Referencias

---

- [1] A. P. M. A. S. N. Quintana, «Diseño de antenas para estaciones GPS mediante parametrización de las corrugaciones de choke,» Escuela Politecnica Superior, uam, Madrid, 2016.
- [2] G. F. Lanao, «Diseño de una antena impresa circular,» Madrid, 2011/12.
- [3] M. V. P. d. Vargas, *En línea*.
- [4] D. A. G. Álvarez, «Sistema GNSS (Global Navigation Satellite System),» Universidad Autonoma, Madrid, 2008.
- [5] J. A. F. Montaña, «Polarización Circular. Antenas para trabajar satélites en VHF y UHF,» *Unión de radioaficionados Españoles*, Julio 2006.
- [6] A. P. B. J. J. A. F. R. P. Alberto Sanchez, *Sistemas GNSS: Funcionamiento, Posicionamiento y Precisión.*, G. y. C. Laboratorio de Astronomía, Ed., Cádiz.
- [7] M. A. S. Nataera, *Antena para sistemas de navegación por satélite, Antena + Navsys*.
- [8] J. R. Coca, «Egnoss ya sobrevuela España,» *Tendencias 21*, Noviembre 2010. [En línea].
- [9] C. F. V. Pérez, «Sistemas de Posicionamiento y de navegación satelital,» 2003.
- [10] F. Jorquera, «prezi - Compass GNSS,» 25 mayo 2014. [En línea]. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [11] C. Amate, «blogthinkbig.com/japon-geolocalizacion/,» 12 Julio 2014. [En línea]. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [12] kirai, «kirainet - qzss el "GPS" Japonés,» 13 Enero 2016. [En línea]. [Último acceso: Diciembre 2017].
- [13] J. L. M. Campos, *Antenas y Compatibilidad electromagnética*, vol. Conceptos básicos de Antenas, Madrid, 2016/17, p. Tema 2. .
- [14] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and design*, United States of America: Wiley - Interscience, 2005.
- [15] W. k. R. f. K. M. B. Rama rao, *GPS/GNSS ANTENNAS*, Artech House, 2013.
- [16] J. A. R. Cruz, *Apuntes Asignatura de Medios de transmisión*, Madrid: Escuela politécnica Superior, Uam, 2014.
- [17] «www.tallysman.com,» 2016. [En línea].
- [18] M. A. S. Nataera, «NDA,» Madrid .
- [19] «QSL.NET,» 2011. [En línea]. [Último acceso: noviembre 2016].
- [20] «QSL.NET,» 2011. [En línea]. [Último acceso: noviembre 2016].
- [21] «QSL.NET,» 2011. [En línea]. [Último acceso: noviembre 2016].
- [22] «QSL.NET,» 2011. [En línea]. [Último acceso: noviembre 2016].
- [23] «QSL.NET,» 2011. [En línea]. [Último acceso: noviembre 2016].
- [24] «QSL.NET,» 2011. [En línea]. [Último acceso: noviembre 2016].
- [25] «QSL.NET,» 2011. [En línea]. [Último acceso: noviembre 2016].
- [26] «QSL.NET,» 2011. [En línea]. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [27] «QSL.NET,» 2011. [En línea]. [Último acceso: noviembre 2016].
- [28] «El español,» [En línea]. Available: <http://www.elandroidelibre.com/2015/04/que-es-el-glonass-y-para-que-se-utiliza.html>. [Último acceso: Diciembre 2016].

- [29] «Wikipedia,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/GLONASS>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [30] «Garmin,» [En línea]. Available: <http://www8.garmin.com/aboutGPS/waas.html>. [Último acceso: Enero 2017].
- [31] W. Kunysz, «A Three Dimensional Choke Ring,» *NovAtel Inc.*.
- [32] «Choke Ring Antenna,» 2005.
- [33] Justin Walford, «State of The Art , Leading Edge Geodetic,» 2012.
- [34] T. S.A, «Thales,» Germany, 2005.
- [35] Exelis, «Series GPS Antenna,» New York, 2013.
- [36] R. F. M. P. Victor Pinazo, «Práctica 1: Antenas de hilo,» Madrid, 2017.
- [37] «theory antenna,» [En línea]. Available: [www.antenna-theory.com](http://www.antenna-theory.com).
- [38] «antena quadrifilar helix,» [En línea]. Available: buscador google antena quadrifilar helix.
- [39] Á. Araguz, «CFGM Equipos Electrónicos,» [En línea]. Available: buscador google componente copolar.

## **Glosario**

---

API	Application Programming Interface
Órbita Geocéntrica	Mismo periodo orbital que el periodo de rotación de la tierra.
Multi-Trayecto	Efecto que se crea por la colisión de las señales con diferentes obstáculos de nuestro alrededor, como puede ser un edificio.
Longitud de onda	Longitud de onda: distancia real que recorre una perturbación (onda) en un determinado intervalo de tiempo.
Reactancia	parte imaginaria de una impedancia.
Estereoradián	ángulo sólido abarcado por una superficie esférica de valor $r^2$ , situada sobre una esfera de radio $r$ .
RHCP	polarización circular a derechas.
Azimut	ángulo de orientación sobre la superficie de una esfera real o virtual.

## Anexos

---

### **A Sistemas de posicionamiento: GPS, GLONASS, EGNOS, WASS, GALILEO.**

#### ❖ GPS

Como ya se ha podido ver en el apartado correspondiente a los sistemas de navegación por satélite, se encuentran en funcionamiento dos sistemas GNSS. Sistema GNSS son aquellos sistemas Globales de Posicionamiento, es decir, son utilizados para la obtención de posiciones en las cuales se encuentran objetos en cualquier parte de mundo con cualquier meteorología posible.

Dentro de los dos sistemas GNSS primero se va a explicar el correspondiente a GPS, sistema creado por los EEUU, entorno a los años 70 por una necesidad militar del departamento de defensa del momento. Este sistema comenzó a tener una plena operatividad en el año 1995. Este sistema es el primero del mundo en relación con esta metodología de obtención de posiciones. GPS se posiciona como el único sistema capaz de la obtención de posiciones, los demás países se encargan de elaborar sistemas de control y recepción de las señales para poder ser utilizadas.

GPS se basa en proporcionar cobertura con 4 a 8 satélites por encima del horizonte, de forma que garantice una cobertura global en cualquier parte del planeta.

➤ **La constelación** se encuentra desplegada en 6 planos orbitales casi circulares y con una inclinación de 55° respecto al plano ecuatorial. Con una excentricidad<sup>7</sup> de 0.02 y su semieje mayor mide 26.700 Km, es decir, se encuentran a una altitud de unos 20.200 Km.

- Antena receptora de GNSS: La compone una cobertura hemisférica<sup>8</sup> omnidireccional.
- Receptor: Es del tipo heterodino<sup>9</sup>, basado en la mezcla de frecuencias que permite pasar de la frecuencia recibida en la antena a una baja frecuencia para ser manejada por la electrónica del receptor.

➤ **La señal GPS:** consta de dos portadoras en la banda L:

- La portadora L1 en la frecuencia 1575,4 Mhz.
- La portadora L2 en la frecuencia 1227,6 Mhz.

Cada portadora se obtiene como un múltiplo de la frecuencia fundamental  $f_0=10,23$  Mhz.

#### ❖ GLONASS

Al igual que GPS, GLONASS es un sistema de navegación por satélite de posicionamiento global. Este sistema fue desarrollado por la Unión Soviética.

El significado de las siglas rusas es Sistema de Navegación Global por Satélite, por tanto, este sistema es un homólogo al GPS de los EEUU. Se encuentra compuesto por un conjunto de 31 satélites en órbita, de los cuales se encuentra operativos un total de 24, colocados en torno a 19.000 Km de altitud. Dicho sistema comenzó a ser funcional en el año 1996 pero hasta el año 2007 no fue posible tener los suficientes satélites como para ser usado dicho

---

<sup>7</sup> Excentricidad: Grado de desviación.

<sup>8</sup> Hemisférica: Que tiene forma de semiesfera.

<sup>9</sup> Heterodino: Generar frecuencias desde la mezcla de una o más señales de un dispositivo no lineal.

sistema. [23] Estos satélites se encuentran posicionados en tres planos orbitales con ocho satélites cada uno siguiendo una órbita inclinada de 64, 8° con un radio de 25.510 Km. [24] Por tanto, por cada uno de los puntos expuestos en la explicación del sistema GLONASS, se puede intuir que este sistema, al ser igual que el sistema GPS, es un sistema de apoyo.

#### ❖ EGNOS

Sistema de navegación por satélite basado en el desarrollo de las prestaciones que ofrece los sistemas de posicionamiento geoestacionario (GPS), mejorando a este sistema, GPS, de los cinco metros de precisión a dos o tres metros proporcionados por EGNOS. El sistema EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) se transmite por tres satélites geoestacionarios: dos de los cuales son Inmarsat-3, uno situado en la parte oriental del Atlántico, y el otro sobre el Océano Índico, y el satélite de la ESA llamado Artemisa por encima de África. Estos satélites anteriormente mencionados no tienen generadores de señal a bordo. [3]

#### ❖ WAAS

Sistema de navegación por satélite basado en el desarrollo de las prestaciones que ofrece el sistema de navegación por satélite GPS, estos sistemas implementados en la zona terrestre sirven para el mejoramiento de la precisión de las medidas realizadas, como pueden ser los errores de calendario, errores orbitales (errores del satélite en la estimación de su propia posición), influencia atmosférica, etc.

Mientras que el sistema satelital de GPS posee una precisión de 10 metros al 95%, mediante WAAS se mejora a una precisión de 5 metros al 95% de los casos.

Este sistema a diferencia del sistema europeo se encuentra limitado a un área el cual solo incluye los Estados Unidos, al no existir estaciones terrestres requeridas por el sistema fuera de este país. Este sistema consta de 59 estaciones de vigilancia, llamadas estaciones de referencia de área amplia o WRS (Wide-area Reference Stations), dos estaciones maestras o WMS (Wide-area Master Stations), seis antenas para la retransmisión de datos GES (Ground Earth Stations) y tres satélites geoestacionarios. [25]

#### ❖ GALILEO

El sistema de geoposicionamiento europeo se llama Galileo, este sistema se comenzó a crear en el año 2003 con el objetivo de obtener una independencia con respecto al sistema creado por los Estados Unidos llamado GPS y porque crea una precisión que puede llegar hasta los 70 centímetros. Este sistema de geoposicionamiento está constituido por unos 30 satélites, destinados a uso civil. Cada uno de los satélites que componen dicho sistema está ubicado a una distancia de 23.222 kilómetros con respecto al siguiente. [4]

## **B NDA**

Para el correcto entendimiento de las antenas GNSS es necesario la revisión de sus características y funcionamiento.

### **I. Principales consideraciones y especificaciones del sistema.**

Una antena es una parte importante del sistema receptor de GNSS. Esta se encarga de recibir y traducir las señales GNSS de una onda plana en una señal de RF que contiene la amplitud y la información de fase de la señal GNSS, junto con la ganancia de patrón y la contribución de fase de la antena.

En las antenas GNSS el principal problema es la revisión del problema multi-trayecto, debido a los obstáculos, ya que este provoca errores de fase y amplitud. Errores que hacen obtener una estimación de posición errónea. Este problema puede ser controlado mediante la minimización de la relación axial de la antena. Otro de los problemas sería la incidencia de ondas procedentes de diferentes satélites con diferentes ángulos de azimut. Controlado también con una minimización de relación axial. [29]

### **II. Estabilidad y estimación de la posición de la antena**

Los sistemas GNSS se basan en antenas GPS para la obtención de la ubicación o posición de una manera precisa. La técnica de obtención de posición se basa en la comunicación con satélites para la obtención de dicha posición, el mínimo de satélites necesarios son 3, para una precisión limitada, siendo mejor para 4 o más satélites. El sistema GPS como ya se ha mencionado en el anexo A, contiene 24 satélites en órbita con la tierra, y normalmente desde un punto son visibles 12 de ellos, para un lugar libre de obstáculos. Para una situación real se asume un 40 % de obstrucción, provocando una incidencia de la onda de muy bajo nivel una vez que llega al receptor GNSS. los diferentes obstáculos hacen que estas señales tengan pérdidas de calidad de estas, pero otro de los problemas importantes, que hacen que la precisión este limitado por la estabilidad del centro de fase, como ya se ha explicado la recepción de la antena no es homogénea. Esto sería controlado por medio del control de cambio de frecuencia, es decir, aparición de nuevos modos, errores de fabricación deriva de la temperatura. [29]

### **III. Consideraciones de la superficie del plano o de la impedancia**

El plano de masa es muy importante para las antenas GPS, ya que con este se obtienen tres efectos diferentes en las antenas de parche. Estos efectos son la ganancia isotrópica, respuesta de la frecuencia y la susceptibilidad al efecto de multi-trayecto. Para la ganancia si el tamaño del plano de masa aumenta esta se incrementa. Otro de los problemas que se han observado con el diseño es que, si dicho plano de masa aumenta mucho, comienzan a propagarse nuevos modos, que deterioran la respuesta de los parámetros S. Por otra parte, la relación que obtiene el plano de masa con la polarización es que a medida que el plano de masa se expande las señales polarizadas circularmente a izquierdas aumenta la atenuación de esta, por tanto, se obtiene un efecto beneficioso ya que las antenas GPS tienen una polarización circular a derechas como ya se ha indicado. Si dicho plano de masa es pequeño la atenuación es limitada y por tanto se hace más susceptible al error del efecto multi-trayecto.

Para estos problemas introducidos por los efectos externos se obtiene una solución controlando el plano de masa como ya se ha indicado. Los últimos diseños estudiados es la introducción de una antena de choke. Este consiste en introducir un elemento radiante y su alrededor introducir ciertos anillos conductivos y concéntricos, diseño que es capaz de

controlar el efecto multi-trayecto y las señales de baja elevación. Efecto explicado en el anexo C. [29]

#### IV. **Banda de frecuencia, polarización y relación axial**

Para el correcto estudio del ancho de frecuencia, polarización y relación axial hay que estudiar las diferentes conformaciones de los elementos radiantes.

Entre los elementos radiantes que se pueden utilizar para sistemas GNSS se encuentran: las antenas Leakey wave, siendo su mayor ventaja la estabilidad del centro de fase y un amplio ancho de banda, baja relación axial y alta atenuación de polarización circular a izquierdas.

Para asegurar una relación axial y pureza de polarización óptimas se implementan con un acoplador híbrido. [29]



**Figura 0-1: Antena con Acoplador Híbrido**

## C Chokes.

En este anexo se procede a la explicación de los elementos de Chokes, ya que son necesarios para el entendimiento de las nuevas antenas diseñadas para la navegación por satélite.

Ya que uno de los beneficios más importantes de estos diseños es la eliminación o atenuación del multi-trayecto, junto con otros beneficios expuestos en este TFG.

La definición de una antena con chokes, es una estructura compuesta por una serie de ranuras o corrugaciones axiales [11]

Las antenas con chokes para GPS, son antenas construidas con una estructura implementada por ranuras o corrugaciones axiales, como se ha indicado en la definición de los chokes expuestos anteriormente, con la finalidad de la mejora de las especificaciones de una señal GPS procedentes de los satélites.

El principio fundamental de este tipo de estructuras es el tratamiento de ondas de tipo directo e indirecto que llegan a la antena:

- ✓ **Ondas directas:** estas ondas son las correspondientes a la parte de señal deseada, por tanto, con estos chokes se intenta no modificar este tipo de ondas, ya que una variación de estas puede provocar grandes errores finales.
- ✓ **Ondas indeseadas o indirectas:** estas ondas son las que necesariamente tienen que ser tratadas por los chokes de dichas antenas. Intentando eliminar las partes de las ondas generadas por el efecto multi-trayecto.

Las señales recibidas en la antena no llegan separadas, sino que es una señal compuesta por las ondas directas y las reflejadas.

Dichos chokes tienen las siguientes modificaciones en ambas ondas, por un lado, la parte de la onda directa es modificada en su ganancia únicamente cuando el ángulo de incidencia en la antena es muy bajo con respecto al plano del suelo. Por otro lado, el efecto que se produce en las señales indirectas es mucho mayor, ya que es lo que se busca con dicho diseño.

- **Señal indeseada:** dentro de esta señal electromagnética nos podemos encontrar con dos componentes primordiales, la primera es la que se encuentra transmitida por un plano conductor inferior hasta llegar al centro de la antena y la otra es la que se crea por medio de las corrugaciones de los chokes laterales que se encuentran protegiendo el elemento radiante de dicha antena. Por tanto, el principal objetivo es que la suma de estas dos antenas provoque una eliminación de ellas, para ello es necesario que ambas ondas electromagnéticas tengan la misma amplitud y un desfase igual a  $180^\circ$ . Estas dos características se modifican por medio de, en el caso de la amplitud depende de las características del elemento radiantes, el número de chokes y el ancho de estos, por otra parte, la fase depende de la profundidad de los chokes.

Los estudios seguidos por Jet Propulsion laboratory determinan que la longitud de la profundidad de los chokes tiene que ser ligeramente mayor que  $\lambda/4$ , para proporcionar una alta impedancia de onda, para evitar la creación de nuevas corrientes que proporcionen nuevas ondas indeseadas [11] [26]

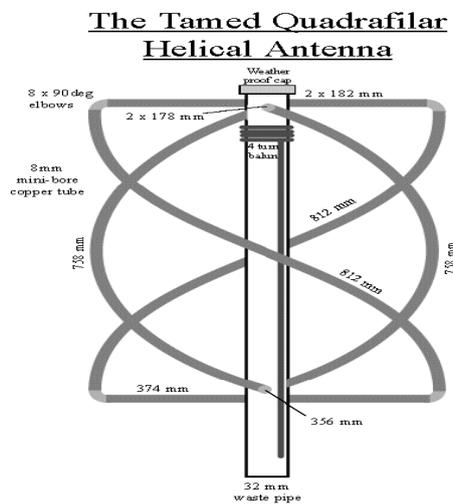
## **D Elementos candidatos para GNSS**

En los Sistemas GNSS se encuentran ciertos elementos candidatos para cumplir con los requisitos necesarios, entre los que se encuentran los ya mencionados en el apartado 2.3.2, y los mencionados a continuación.

### **(1) Antena quadrifilar helicoidal.**

La antena helicoidal quadrifilar o también llamada “voluta” se utiliza para numerosas aplicaciones GNSS, sobre todo para receptores móviles como pueden ser los móviles o portátiles. Esta antena o elemento radiante para el caso de este proyecto consiste en una matriz de cuatro elementos resonantes de forma helicoidal enrollados entre sí. Dichos elementos forman un ángulo deseado y una cuadratura para poder producir la polarización RHCP. En lo relacionado con la alimentación de dicho elemento radiante se puede realizar tanto en la partes superior o inferior, teniendo esta segunda en circuito abierto o cerrado para buscar los diferentes diagramas de radiación necesarios para las diferentes aplicaciones.

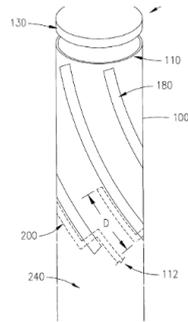
A continuación, se muestra una imagen de este tipo de antenas. [11]



**Figura 0-2: Antena quadrifilar helicoidal [39]**

### **(2) Antena ranurada hexafilar.**

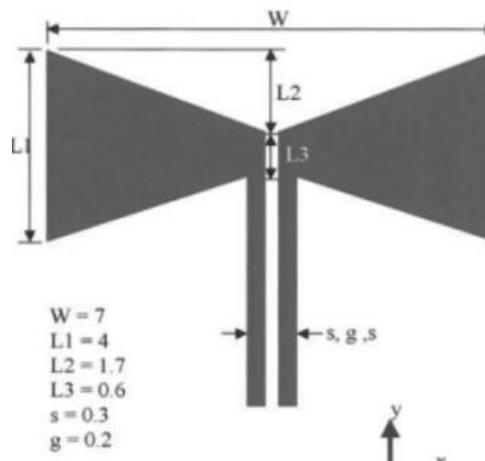
Estas antenas son una modificación de la anteriormente expuesta ya que consisten en antenas helicoidales ranuradas. La modificación con respecto a la antena anterior consiste en que está compuesta por un único cilindro resonante, el cual contiene unas secciones (ranuras) encargadas de funcionar como los cuatro elementos resonantes del ejemplo anterior, pero en este caso son 6 ranuras con un cuarto de longitud de onda. Estos ejemplos de antenas son antenas impresas en microstrip. Manteniendo su relación angular para obtener una polarización RHCP, con buena resistencia a las señales multitrayecto. [11]



**Figura 0-3: Antena ranurada hexafilar. [13]**

**(3) Antenas planas e inclinadas de torniquete.**

Las antenas inclinadas de torniquete son una versión plana de las antenas bicoidales, las cuales tienen un gran ancho de banda. En este tipo de antenas al estar compuesta por dos dipolos se puede conseguir fácilmente la polarización circular RHCP debido a la implementación de la alimentación para ambos dipolos por medio de la misma amplitud con distinta fase, un dipolo se alimentaría con fase  $0^\circ$  y el último se debería alimentar con una fase de  $90^\circ$ . Este tipo de alimentación se hace normalmente con un balun, el cual podría ser implementado por medio de ADS, obteniendo un desfase de una de las líneas de  $90^\circ$  con respecto a la otra línea, ya que daría una alimentación de ambos dipolos suficiente para obtener polarización circular, RHCP.



**Figura 0-4: Antenas planas e inclinadas de torniquete [18]**

## E Sistemas Comerciales.

Para observar las especificaciones requeridas en este TFG es necesario el estudio o exposición de los sistemas comerciales existentes en la actualidad, y con ello se observan las características necesarias para cada uno de los sistemas existentes.

Con esta conclusión se adjunta una tabla con los diferentes modelos comerciales existentes, GPS Thales [27] , Leica [28] , NovAtel [29], Trimble [11] y Exelis [30].

**Tabla 0-1: Sistemas Comerciales**

	Thales	Leica	NovAtel	Trimble	Exelis
<b>Bandas de frecuencias</b>	GPS: L1, L2	GPS: L1, L2, L5 Glonass: L1 – E1, L2 – B2 Galileo: L1, L5, E5, E6 Compass: L1, E1, L2, L2, L5 Y E6 QZSS: L1, L2, L5 Y E6. SBAAS: L1 Omni Star and CDGPS: L1, E1.	GPS: L1, L2, L2c, L5 Glonass: L1, L2, L3 Galileo: E1, E5a, E5b, E6, AltBoc BeiDou: B1, B2, B3 L-Band	GPS: L1, L2, L5 GLONASS: G1, G2, G3 Galileo: E1, E2, E5ab, E6 COMPASS	GPS: L1, L2
<b>Polarización</b>	RHCP	Según elemento radiante	RHCP	RHCP	RHCP
<b>Temperatura Operación</b>	-55°C a 65°C	-55°C a 85°C	-55°C a 85°C	-55°C a 85°C	-
<b>Temperatura almacenamiento</b>	-55°C a 75°C	-55°C a 90°C	-55°C a 90°C	-55°C a 85°C	-
<b>Protección de Humedad</b>	100%	100%	100 %	100 %	100 %
<b>Ganancia Antena Zenith</b>	5 dBiC	Según el elemento	5 dBi	5 dBi	5 dBi
<b>Conector</b>	Tipo N (50 Ω)	Tipo N (50 Ω)	Tipo N (50 Ω)	Tipo N (50 Ω)	Tipo N(50 Ω)
<b>Dimensiones</b>	127.9 altura	Φ 380 x 200 altura	Φ 380 mm x 200 mm altura	Φ 380 x 140 altura	-
<b>Peso</b>	4.7 kg	8.1 kg	7.6 kg	4.3 kg	0.23 kg
<b>Estabilidad de centro de fase</b>	-	< 1mm	< 2 mm	< 2 mm	
<b>VSWR</b>	1.5:1	Según el elemento	1.5:1	2:1	1.5:1



Y por otra parte tenemos la potencia disipada la cual es la diferencia de potencia entre la salida del generador o entrada a la antena y la salida de esta.

$$P_{dis} = P_{entregada} - P_{ent} \quad (6)$$

Por tanto, con estas dos potencias podemos obtener la energía que transmitiría nuestra antena, aunque esta también depende del ángulo de salida y de recepción de la señal, ya que depende del lóbulo que se perciba o se envía en dichas coordenadas para poder saber que energía final se obtiene. [8] [9]

## II. Parámetros direccionales.

A continuación, se va a proceder a la explicación de ciertos conceptos importantes para el entendimiento.

### a. Ganancia direcciva o directividad.

Concepto de relación entre la intensidad de radiación de la antena en cada dirección del espacio, y la de una antena isotrópica que radiase la misma potencia total, la única diferencia es que dicha intensidad se encuentra en puntos diferentes del espacio.

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{iso}} = 4 \times \pi \frac{U(\theta, \phi)}{Prad} = 4 \times \pi \frac{r^2 \langle \vec{S}(r, \theta, \phi) \rangle}{Prad} \quad (7)$$

Por tanto, la directividad  $D_0$  consiste en la ganancia direcciva en la dirección de máxima radiación. [8]

### b. Patrón de radiación o diagrama de radiación.

Un patrón de radiación, o también llamado diagrama de radiación, de una antena se define como “una función matemática o representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena como una función de coordenadas espaciales. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación se determina en el farfield, el cual es representado en dicho apartado de CST de este TFG. En este patrón se pueden extraer las siguientes propiedades: densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación, intensidad de campo, directividad o polarización”. [10]

Los diagramas de radiación se representan según unas coordenadas, ya que como se ha explicado anteriormente la energía o potencia percibida por la antena receptora depende del ángulo que tengan una con respecto a otra y el plano E o H en el que se encuentre dicha energía, para hallar la dirección de máxima radiación. A continuación, se muestran los cortes del diagrama tridimensional que se debería obtener con respecto a las coordenadas esféricas  $\theta$  y  $\phi$ .

$$u = \text{sen}\theta \cdot \text{cos}\phi$$

$$v = \text{sen}\theta \cdot \text{sen}\phi$$

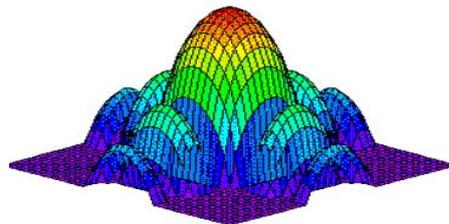
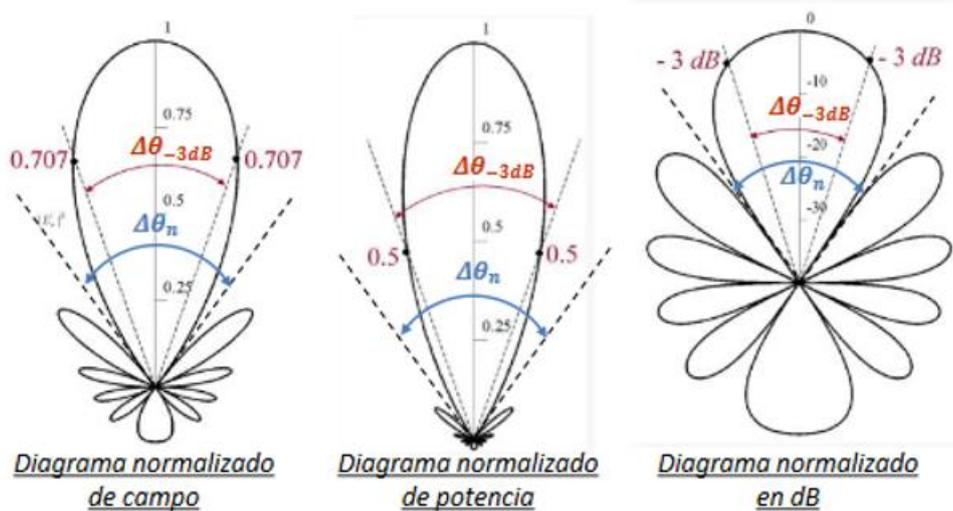


Figura 0-6: Diagrama de radiación 3D [9]

Donde se puede observar claramente un primer lóbulo principal, el cual contiene la dirección de máxima radiación, seguido de lóbulos secundarios, diferencia entre ambos SLL, los

cuales tienen una radiación considerablemente más pequeña para finalmente llegar los lóbulos laterales, son los adyacentes a los lóbulos secundarios con menor tamaño y finalmente el lóbulo posterior, situado aproximadamente a 180° respecto del lóbulo principal. Para observar mejor este último lóbulo se muestra el siguiente diagrama normalizado, dichos diagramas pueden representar tanto el campo como la potencia. [8] [10]



**Figura 0-7: Diagrama de radiación normalizado [9]**

**c. Densidad de potencia de radiación.**

Las ondas electromagnéticas se utilizan para transportar información a través de un medio inalámbrico o una estructura de guía, de un punto a otro. Entonces es natural asumir que la potencia y la energía están asociados con los campos electromagnéticos. La cantidad utilizada para describir la potencia asociada a una onda electromagnética es el vector instantáneo de Poynting, del cual se obtiene la siguiente ecuación denominada densidad de potencia. [8] [11]

$$\langle \vec{S}(r, \theta, \phi) \rangle = \frac{1}{2\eta_0} \left[ |E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \right] r \quad (8)$$

**d. Intensidad de radiación.**

Concepto que define la potencia radiada por nuestra antena por unidad de ángulo sólido, es decir por la zona del espacio abarcada por un cono con unidades de estereoradián.<sup>11</sup>

Después de esta definición se puede concluir con que la intensidad de radiación es la capacidad que tiene una antena para radiar energía en una determinada dirección. [8]

$$U(\theta, \phi) = \frac{Prad(en un dS)}{d\Lambda} = \frac{|\langle \vec{S}(r, \theta, \phi) \rangle| dS}{d\Lambda} = r^2 |\langle \vec{S}(r, \theta, \phi) \rangle| \quad (9)$$

**e. Ganancia de potencia.**

Relación en todas las direcciones del espacio, entre la intensidad de radiación de la antena y la de una antena isotrópica que aceptase la misma potencia entregada Pent de dicha antena. [8]

<sup>11</sup> Estereoradián: ángulo sólido abarcado por una superficie esférica de valor  $r^2$ , situada sobre una esfera de radio r.

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{ent}}} = 4\pi \frac{|\langle \vec{S}(r, \theta, \phi) \rangle|}{P_{\text{ent}}} \quad (10)$$

(11)

## G Herramientas de diseño

Dentro de las herramientas utilizadas para el diseño de este TFG, tenemos dos de las más utilizadas para este tipo de tecnologías, siendo estas ADS y CST.

- En primer lugar, se procede a explicar la herramienta de ADS. Esta herramienta ha sido utilizada para usar el módulo de lineal, modulo en el que se puede calcular los anchos y largos de las pistas necesarias con las especificaciones requeridas. La parte del diseño en la que ha sido utilizada es la correspondiente al diseño de la alimentación de parche de monopolo sinusoidal. Diseño que finalmente no ha sido el elegido pero que ha servido para abstraer una idea principal del diseño final, siendo esto los dipolos con curvatura construidos a modo de parásitos.

Lineal es capaz de devolver las dimensiones de una línea de transmisión, por medio de la introducción de las especificaciones del sustrato. Dichas líneas de transmisión son utilizadas para la transformación de una impedancia vista anteriormente por la requerida en la salida del parche.

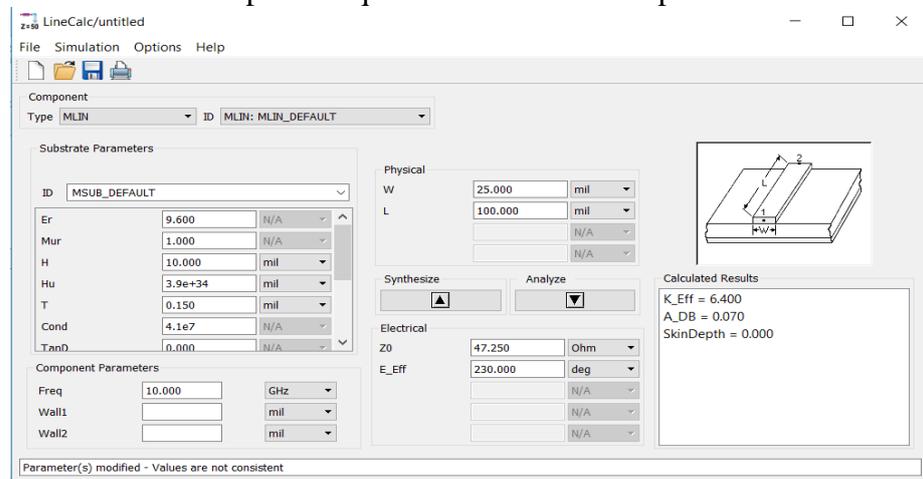


Figura 0-8: Linecal

- En lo relacionado con el programa CST, es el programa utilizado principalmente el diseño e implementación del elemento radiante final. Este diseño de los elementos se hace por medio de las siguientes herramientas:
  - **Modeling**: modulo utilizado para el diseño de la estructura. En este módulo se pueden observar herramientas para crear las diferentes estructuras y transformarlas, es decir, ser rotadas, escaladas o desplazadas en cada uno de los ejes. Este módulo de diseño también permite elementos definidos por puntos creados a partir de otro programa y siendo importados por un documento “.Txt”. A continuación, se muestra dicho modulo donde se pueden encontrar las diferentes herramientas.



Figura 0-9: Modeling CST

- **Simulation**: módulo donde se pueden introducir los picks y puertos en la estructura a simular para posteriormente obtener la respuesta tanto en parámetros S11, como en carta de Smith. En el módulo de simulación también se tiene la opción de introducir monitores, como puede ser el monitor Farfield encargado de mostrar el diagrama de radiación de dicho elemento diseñado.



**Figura 0-10: Simulation CST**

Los módulos explicados anteriormente son los dos más utilizados para el diseño y estudio de los parches, pero en esta herramienta también se puede exportar e importar datos, para ser utilizados en otros lugares, etc.

## H Herramientas de cálculo.

Para los cálculos realizados en este proyecto se usan tres herramientas de cálculo, las cuales son utilizadas para tareas diferentes, como va a ser explicado a continuación.

- La primera herramienta utilizada ha sido **Matlab**, programa el cual se utilizó para la obtención de los puntos constituyentes del coseno que conformaba el monopolo sinusoidal, el cual finalmente no dio los resultados necesarios para poder ser utilizado como parche radiante. Dichos puntos fueron exportados en un documento tipo “.txt”. Pero si ha sido utilizado para el diseño final en el cual, se introducen elementos radiantes curvos, capaces de mejorar las especificaciones finales requeridas.

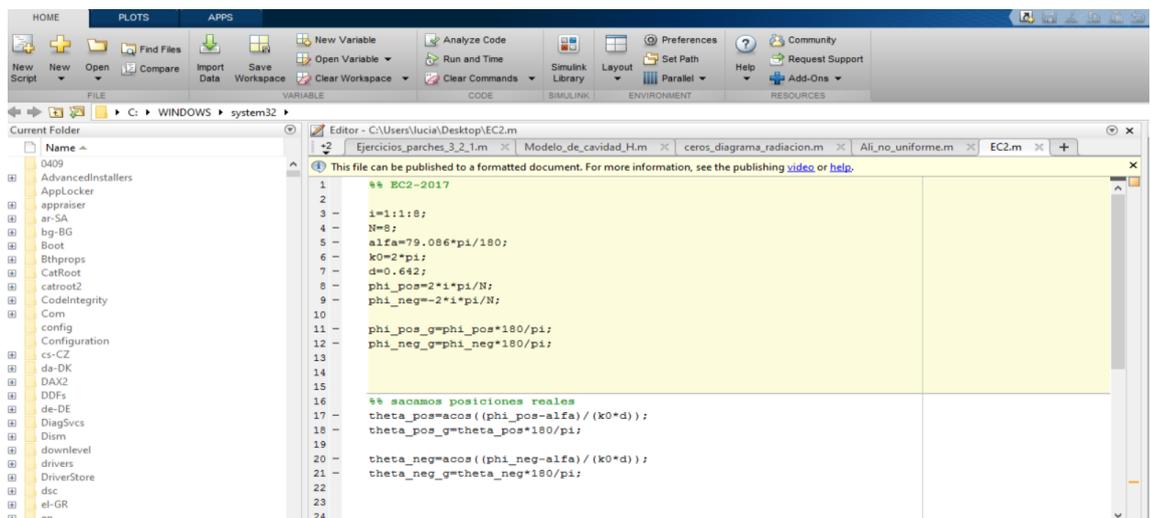


Figura 0-11: Matlab

- La segunda herramienta ha sido la correspondiente a **Mathcad**, herramienta en la cual, por medio de su hoja de cálculo, se pueden introducir las fórmulas necesarias para obtener las dimensiones del parche final. Esta herramienta se ha utilizado para obtener las dimensiones eficientes del parche circular a la frecuencia central del sistema. Y el cálculo de los espesores de los dipolos finales utilizados como parásitos para manejar las corrientes de dicho parche, mediante el cálculo por el modelo de cavidad.

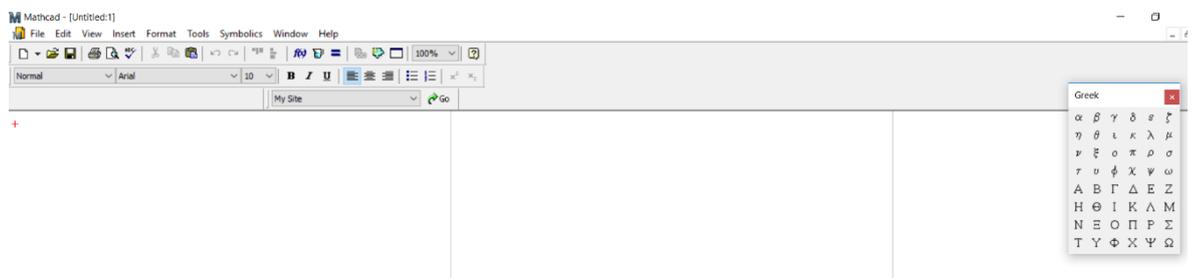
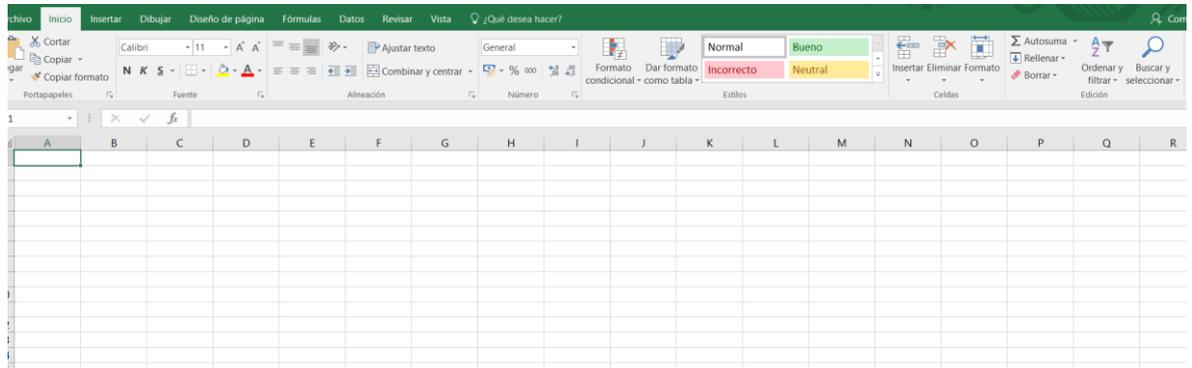


Figura 0-12: Mathcad

- La tercera y última herramienta a explicar es **Excel**, utilizada para el cálculo de los anchos de banda y eficiencias de cada uno de los elementos estudiados previamente a la elección del diseño final.



**Figura 0-13: Excel**

## **I Descripción de la implementación en CST.**

A continuación, se va a proceder a la explicación de cada una de las partes implementadas en dicha antena GPS en el programa de CST, es decir, los pasos seguidos en el programa para su implementación.

### **1 Elemento radiante**

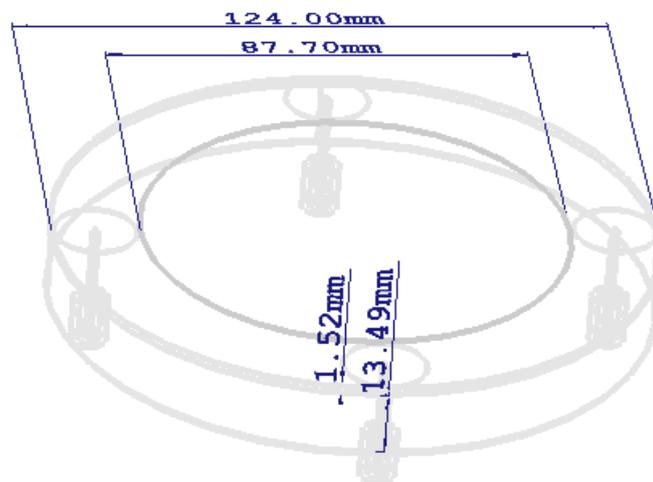
Por tanto, la primera parte de dicha antena es el considerado elemento radiante, compuesto por un parche circular simple, al cual se le ha añadido un parche apilado, y como tercer paso se ha añadido unos elementos parásitos en la parte superior de la última capa de sustrato Taconic FR-35.

#### **1.1 Parche activo**

La primera fase de implementación de dicho elemento radiante consiste en crear una estructura de parche circular simple. Esta estructura consiste en cuatro capas diferentes, entre las que están el plano de masa, sustrato entre plano de masa y parche, Taconic en primer lugar y finalmente sustituido por FR4, y por último el parche simple radiante o parche activo.

Como se ha mencionado en el párrafo anterior el parche simple se compone de cuatro capas diferentes entre las que está en primer lugar el plano de masa, el cual se encarga de eliminar el lóbulo de radiación opuesto al requerido para la comunicación, es decir, que este elemento no radie tanto en las z positivas como en las negativas. Dicho plano de masa consiste en una circunferencia de radio 65 mm con espesor 0.508 mm.

La siguiente capa consiste en un sustrato Foam con  $\epsilon_r$  igual a 1.1 y radio igual al del plano de masa, con un espesor de 14 mm. La siguiente capa a implementar en CST se crea con un sustrato igual a Taconic RF-35 de radio igual al del plano de masa con espesor igual a 1.524 mm y finalmente se puede observar cómo se encuentra la última capa correspondiente al parche simple radiante, con un radio de 35.35 mm, multiplicado con un factor de escala de 1.2404, y espesor 0.035 mm. Dicho parche se encuentra centrado en el centro de coordenadas y por tanto, en el centro de las demás capas, todas ellas centradas con respecto al eje de coordenadas. A continuación, se observa la estructura explicada en estos párrafos en la Figura 0-14 con las medias indicadas, todas las medidas correspondientes al diseño final van a estar adjuntas en el anexo J.



**Figura 0-14: Vista isométrica parche simple.**

Finalmente cabe indicar que el elemento de alimentación, explicado en el apartado 2, se encuentra situado a una distancia determinada del centro de coordenadas siendo esta distancia 53.05 mm, por medio de una perforación que abarca cada una de las capas del elemento radiante hasta la parte superior de la tercera capa constituyente de este elemento.

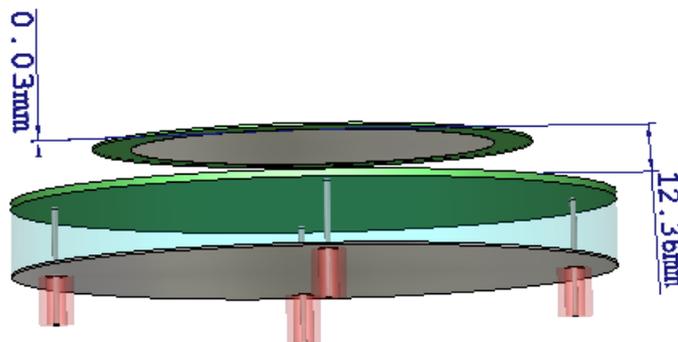
### **1.2 Parche Apilado**

Posteriormente para la mejora del parche simple se ha planteado la opción de mejora de ancho de banda por medio de un parche apilado a una distancia del parche simple radiante.

Esta composición se encuentra compuesta por el parche simple creado en el apartado 11.1, junto con un nuevo parche el cual contiene 3 capas diferentes para CST.

La primera capa, la cual se encarga de separar el parche simple del apilado consiste en una sección de aire, es decir, hay una zona en la que no existen sustratos y, por tanto, no hay que implementar nada nuevo en CST. El siguiente paso, corresponde a la segunda capa de esta sección, en la que se encontraría el nuevo parche. Este parche está transformado a una altura  $H_2$ , altura a la que muestra mejor respuesta para los parámetros  $S_{11}$ , y posteriormente escalado, en este caso con un escalado de 0.85 las dimensiones del parche simple radiante creado anteriormente, con un espesor de 0.035 mm.

La tercera y última parte a realizar consiste en introducir el sustrato de Taconic FR-35 con espesor de 0.508 mm, y con radio igual al del plano de masa. Ambas circunferencias, tanto la de parche apilado como la del sustrato se encuentran situadas en el centro de coordenadas indicado anteriormente para la estructura anterior, como se puede mostrar en la estructura expuesta en la Figura 0-15.



**Figura 0-15: Vista isométrica Parche Apilado**

### **1.3 Parche con parásitos**

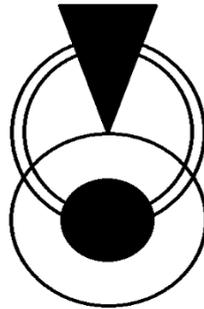
Por último, para la terminación del elemento radiante, se han introducido pequeños dipolos en forma de parásitos con la longitud de  $\lambda/4$  para diferentes frecuencias de corte, entre las que se encuentran 1.15, 1.275, 1.4, 1.525, 1.65 GHz.

Para el caso de los dipolos se han seguido los siguientes pasos. En primer lugar, se ha creado una circunferencia del mismo tamaño que el plano de masa, siendo esta tangente al centro de coordenadas nombrado anteriormente, es decir, el centro de esta nueva circunferencia se encuentra tangente a la parte superior de la estructura. Posteriormente, se ha creado otra circunferencia con las mismas características que esta anterior, pero siendo su radio igual al del plano de masa menos la anchura que se quiere tener para una buena adaptación, siendo este 9.927 mm, calculado por medio de las ecuaciones del modelo de cavidad correspondientes a monopolos de la asignatura de antenas.

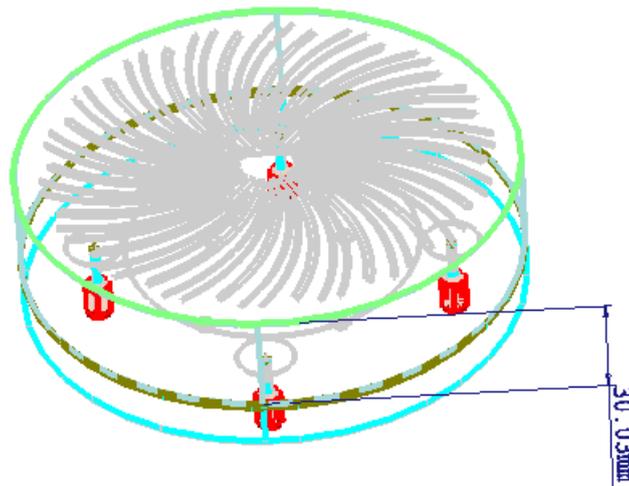
El valor de 9.927 mm es el correspondiente al espesor del dipolo número 1, este mismo proceso se tiene que seguir para cada una de las frecuencias de corte nombradas anteriormente, teniendo cada una de las frecuencias diferentes anchos y largos teóricos. Las medidas correspondientes a cada dipolo se encuentran adjuntas en una tabla situada en el apartado 1.13.

Posteriormente para conseguir estos dipolos, los cuales son dipolos curvos. Construidos por medio de una sección de una circunferencia y un cono. Para poder obtener estas secciones de las circunferencias mencionadas se tienen que crear otras dos estructuras nuevas, las cuales son una circunferencia concéntrica de radio igual al radio del parche más una variable que hace obtener la distancia adecuada con el parche apilado, y la segunda estructura consiste en introducir un cono, tumbado sobre el centro de las circunferencias nombradas anteriormente, para que al variar su radio se obtenga una longitud u otra del dipolo, como se puede ver en el siguiente boceto, Figura 0-16.

En la Figura 0-16 se indica el boceto que se observaría antes de ser sustraído cada una de las dos superficies sombreadas.



**Figura 0-16: Construcción De Dipolos**



**Figura 0-17: Vista isométrica Parche con Dipolos Parásitos**

Tras realizar este proceso para cada una de las frecuencias de corte mencionadas anteriormente, se obtiene una estructura final igual a la mostrada en la Figura 0-17.

Tras la explicación de la implementación de dichos elementos falta comentar las diferentes modificaciones que han sido realizadas antes de obtener el diseño final, Figura 0-17: Vista isométrica Parche con Dipolos Parásitos Figura 0-17. Obtenido tras la realización de ciertas modificaciones y optimización, las cuales van a ser explicadas en 3 fases diferentes en el apartado de diseño, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 1.13, Fase 1: parche con dipolos, Fase 2: parche con dipolos sin parche apilado, Fase 3: Modificación de dipolos.

## 2 Elemento de alimentación

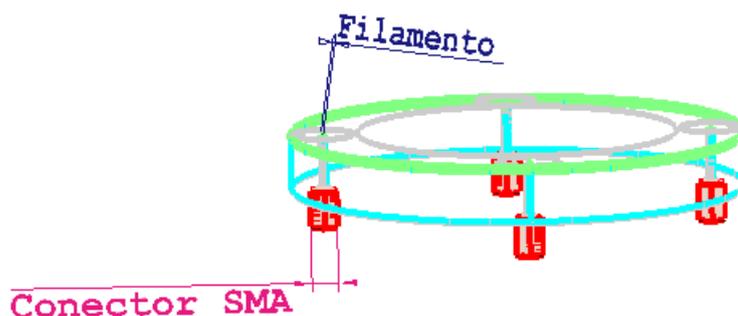
Como ya se ha indicado en el apartado 1, el elemento de alimentación consiste en cuatro filamentos situados desde el conector SMA, hasta la altura donde se encuentra el parche activo. Estos filamentos se encuentran situados en las perforaciones realizadas en cada uno de los tres sustratos comprendidos entre el final del conector SMA y el parche activo.

La última parte de la alimentación consiste en una circunferencia final parecida a la del parche situado encima del sustrato de Taconic RF-35, llamados feed o en castellano alimentadores. Estos feeds tienen un espesor de 0.035 mm, el filamento tiene un radio final de 0.65 mm. Dichos filamentos se han creado en CST, por medio, de la herramienta de cilindros donde se han realizado por lo tanto cuatro cilindros macizos de material PEC.

En primera instancia se crea un único elemento de alimentación, ya que se quería ver el comportamiento de los parámetros S11, para posteriormente obtener la polarización necesaria, dicha polarización es la RHCP, la cual se consigue por medio de la implementación de cuatro elementos como los explicados en el párrafo anterior, rotados en 90 grados, obteniendo así una excitación propia de la polarización RHCP.

Esta alimentación se basa en el principio de acoplamiento, es decir, al alimentar los feed's se consigue provocar corrientes capaces de aportar una alimentación al parche activo y por consiguiente provocar una radiación deseada.

A continuación, se puede observar en la Figura 0-18 las partes que componen las alimentaciones del parche son los conectores SMA, los cuales van a tener que ser taladrados a la estructura final, junto con los filamentos y alimentadores o feeds.



**Figura 0-18: Sección de alimentación del parche**

Una de las partes constituyentes del elemento de alimentación es el correspondiente al conector SMA, el cual se encuentra adjunto en forma de boceto en la Figura 4-1, donde se puede observar que dicho conector tiene un radio interno de 2.1 mm y un radio externo de 3.6 mm, entre los que se encuentra un sustrato de teflón, se encarga del aislamiento del filamento, con posterior revestimiento del radio exterior.

## J Diseño de componentes bajo estudio.

En este anexo J se procede a explicar cada uno de los pasos seguidos para ir mejorando el elemento radiante final, es decir, se comentan las parametrizaciones de las diferentes partes de este para un buen resultado.

### 1. Parche activo.

Para el diseño de la parte de la estructura correspondiente al parche simple, se han seguido los conceptos vistos en la asignatura de antenas sobre antenas impresas, parches, donde tras seguir las siguientes fórmulas expuestas se ha llegado a la conclusión de la dimensión de radio del parche eficiente para la frecuencia de corte de 1.4 GHz, frecuencia central. [8]

$$f_{c,mnp} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{\chi_{mn}}{a_{efec}} \quad (12)$$

$$a_{efec} = a \sqrt{1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[ \ln \left( \frac{\pi a}{a_{efec}} \right) + 1.7726 \right]} \quad (13)$$

Siendo esta dimensión igual a 35.35 mm, valor teórico. Dicha dimensión se ha hallado por medio de las ecuaciones vistas en la teoría de la asignatura de antenas donde se ven los conceptos de antenas impresas, parches, de donde se obtienen las ecuaciones expuestas anteriormente para hallar dicho radio. En primer lugar, se halla el valor del radio eficiente para la frecuencia de 1.4 GHz, asumiendo que el valor de  $X_{mn}$  es el correspondiente al valor del modo fundamental o modo TM<sub>10</sub> para cavidades circulares. Esta fórmula es realizable para parches con  $h < 0.05\lambda_0$ , es decir, parches finos, como su espesor es de 0.035 mm se asume que es fino y, por tanto, que puede usarse dicha fórmula hallando el valor de radio eficiente, posteriormente de forma analítica se procede a hallar el valor del radio por medio de la segunda fórmula expuesta en este apartado obteniendo el valor teórico indicado anteriormente.

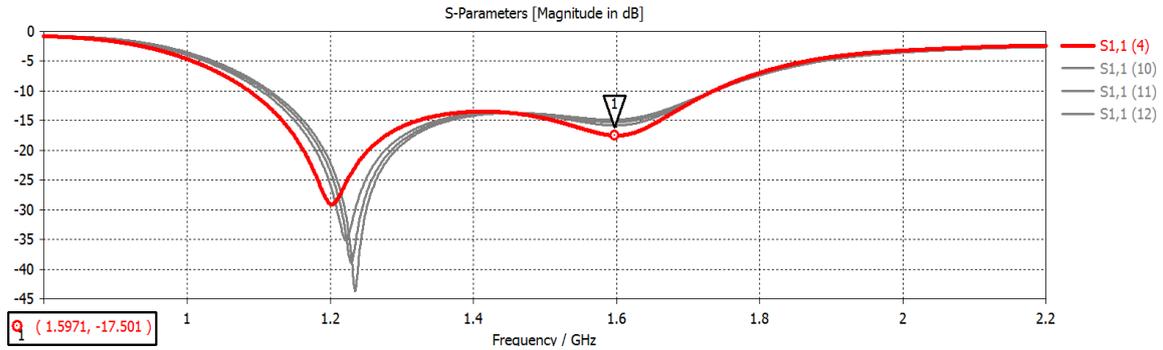
Después de hallar el valor correspondiente al radio del parche a implementar para las especificaciones requeridas, se procede a implementar cada una de las capas expuestas en el apartado 1.

La primera capa, correspondiente al plano de masa se sitúa en la parte baja u opuesta al parche, esta capa compuesta por material PEC de 0.508 mm como se indica en el anexo L. Este se introduce en el diseño para eliminar el efecto de radiación por ambas caras, ya que este parche radiaría tanto por la parte posterior como por la anterior, es decir, en las Z positivas y las Z negativas, por tanto, en los parches comunes se suele introducir esta capa de plano de masa evitando con esto este fenómeno innecesario.

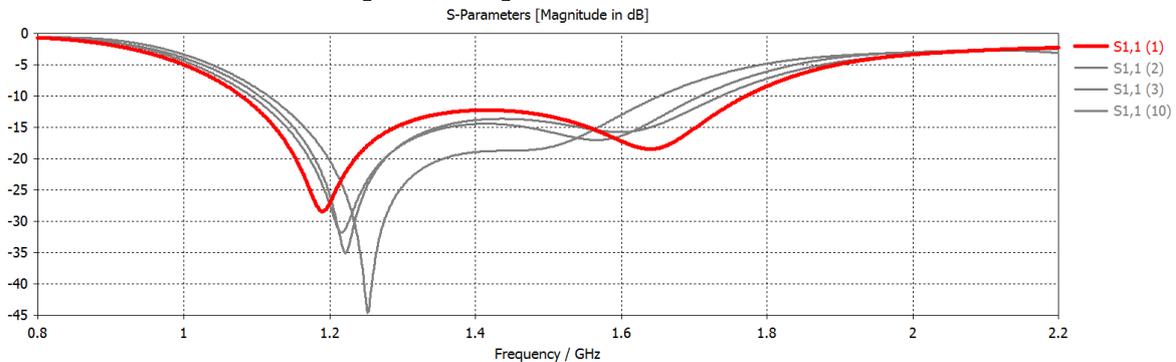
Posteriormente como ya se ha mencionado durante esta memoria se pone el sustrato y parche a una altura  $h_0$ , en la que dicho parche tiene una respuesta para los parámetros S<sub>11</sub> que satisface a las necesidades del sistema final requerido. Dicha altura tiene un valor de 13.15 mm obtenida tras simular en ciertas ocasiones el parche y ver que la mejor solución se encontraba con esta altura, como se puede ver en la Figura 0-19 ,posteriormente se hace lo mismo para el radio de todos estos sustratos, obteniendo un valor de 62 mm, Figura 0-20. Ya que con valores mayores de radio se encuentra que comienzan a propagarse nuevos

modos y por tanto deteriora el comportamiento de los parámetros S11 y el diagrama de radiación, teniendo un achatamiento en el lóbulo principal de este.

Simulaciones realizadas sin la integración de los conectores SMA, estos se añaden en el apartado 1.3.

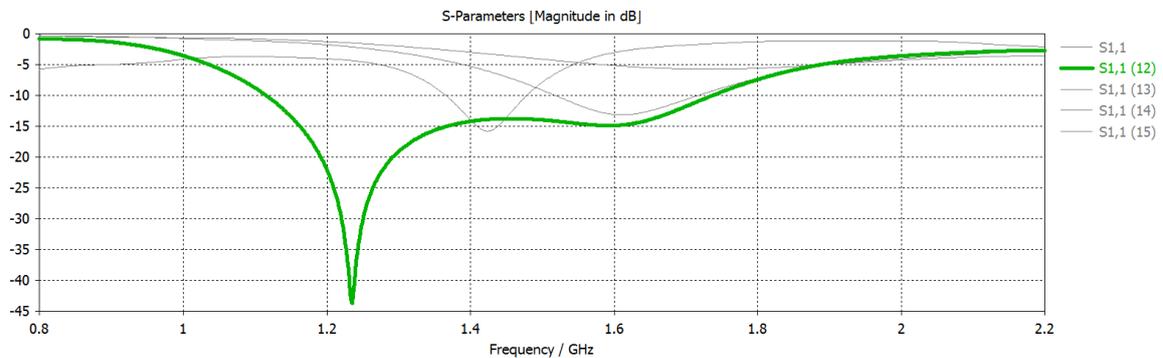


**Figura 0-19: Parametrización parámetros S11 para altura entre plano de masa y parche simple siendo 14 mm**



**Figura 0-20: Parametrización Del Radio de Plano de Masa y Sustratos siendo 62 mm**

El sustrato utilizado para la altura entre plano de masa y sustrato del parche es Foam, sustrato con un  $\epsilon_r$  lo más parecido al aire para evitar deterioros en la repuesta final. Posteriormente para el sustrato implementado en la parte baja del parche se usa Taconic FR-35, ya que es uno de los existentes en el laboratorio para poder ser construido en la siguiente fase de este trabajo. El espesor utilizado para este sustrato de taconic FR-35 es de 1.524 mm ya que es el mayor espesor disponible para este material y el que mejor respuesta nos muestra, debido a que el parche se encuentra situado en la parte superior. Otro de los puntos a simular y obtener en este apartado es el correspondiente al radio del parche activo, ya que el radio teórico no es el mejor para dicha conformación, obteniendo un factor de escala de 1.2404, como se puede ver en la Figura 0-21



**Figura 0-21: Parametrización de Factor de Escala para Parche Activo  $f_{escala} = 1.2404$  mm**

Tras estas explicaciones queda conformado el parche activo inicial con cuatro capas como ya se había mencionado anteriormente, con los materiales indicados, las constantes de cada material se encuentran adjuntas en el anexo L.

**Tabla 0-2: Dimensiones Parche Activo**

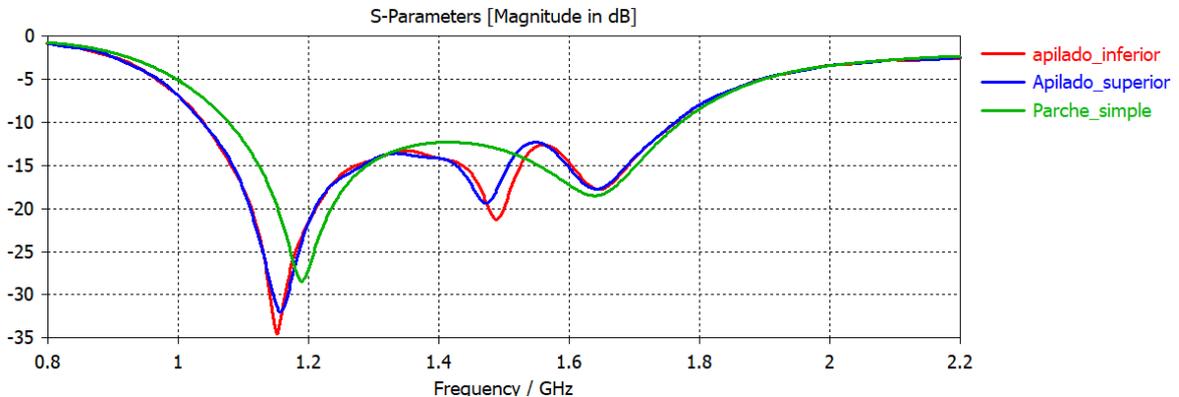
Plano de Masa	Radio	Espesor_masa	Material	R_Foam	Espesor_Foam	Material
	62 mm	0.508 mm	PEC	62 mm	14 mm	Foam
Sustrato	R_sustrato	Espesor_sustrato	Material	R_parche	Espesor_parche	Material
	62 mm	1.524 mm	Taconic RF-35	$35.35 * 1.2404$ mm	0.035 mm	PEC

## 2. Parche apilado

Tras la explicación del diseño del parche simple, en la que se tratan todas las suposiciones a realizar y la forma de hallar las dimensiones dependiendo de sus modos de propagación y de la frecuencia de corte, se pasa a hallar el diseño del parche apilado.

Como se indica en este apartado se procede a introducir un parche apilado para la mejora del ancho de banda que se tiene en el parche simple, obteniendo así una mejor respuesta en parámetros S y con ello en radiación, todo esto se obtiene con los siguientes pasos.

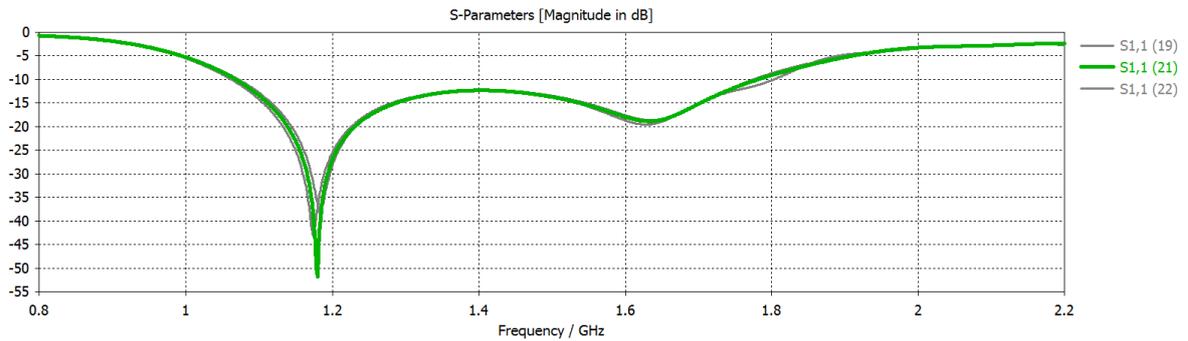
El primer lugar se obtienen dos formas de poder implementar dicho parche apilado, la primera es la correspondiente a poner el parche en la parte inferior, es decir, sin ningún sustrato entre parches y la segunda corresponde con la implementación superior, es decir, poniendo un sustrato entre parches. La elección ha sido poner la conformación inferior, teniendo por tanto el sustrato por la parte superior a este parche apilado, ya que con esto se favorece a no tener dos medios diferentes, provocando una diferencia entre impedancias y, por tanto, una desadaptación que introduce con ello la aparición de una onda incidente y otra reflejada, como se vio en la asignatura correspondiente a métodos de transmisión. [9]



**Figura 0-22: Parametrización de colocación de parche apilado**

En primer lugar, se traslada el parche simple principal y posteriormente se escala a un factor de escala de 0.85 mm con respecto al radio principal, y con ello se obtiene un radio de  $R_{parche} * 0.85$ . Este valor es hallado después de varias iteraciones realizadas, como se

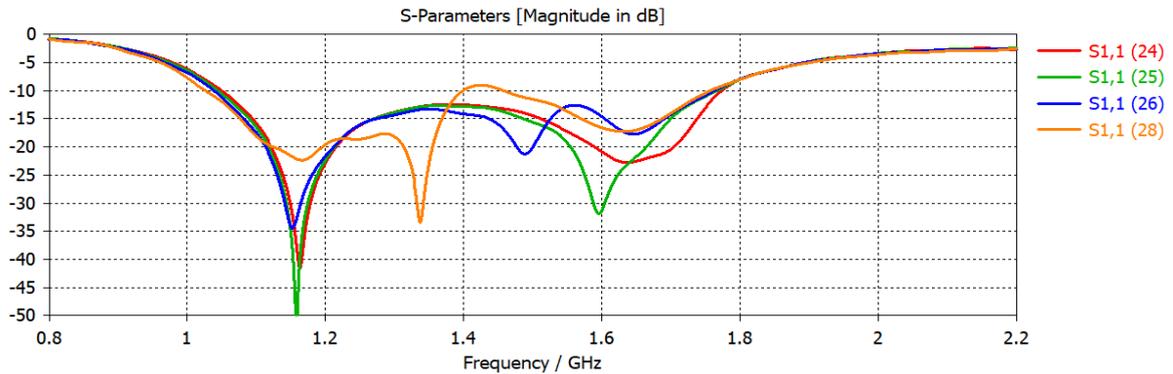
puede ver en la Figura 0-23. El parche apilado está formado por material PEC, con un espesor de 0.035 mm.



**Figura 0-23: Parametrización de Factor de Escala, 0.85, del Parche Apilado**

Dicho parche apilado se encuentra impreso en un sustrato de Taconic FR-35, con un espesor de 0.508 mm, espesor mínimo posible para este material, ya que muestra un mejor comportamiento para esta situación.

Dicho conjunto de parche apilado más sustrato se encuentran a una altura h2 con respecto al parche activo de longitud 10.5 mm, hallado tras diferentes simulaciones, Figura 0-24, donde se obtiene la mejor respuesta final.



**Figura 0-24: Parametrización altura parche apilado**

Obteniendo esta tabla como dimensiones de cada elemento del diseño, perteneciente a la parte del parche apilado:

**Tabla 0-3: Medidas del parche apilado**

Altura del Parche apilado	Radio Parche apilado	Espesor del Parche apilado	Material	Radio del sustrato	Espesor del sustrato	Material
10.5 mm	37.27 mm	0.035 mm	PEC	65 mm	0.508 mm	Taconic RF-35

### 3. Dipolos Parásitos.

El tercer y último paso de la implementación es el correspondiente con los dipolos, los cuales funcionan como elemento apilado, capaz de obtener una mejora en la radiación y en el centro de fase por medio de la canalización de las corrientes creadas por el parche.

Anteriormente se ha indicado la forma de implementación de dichos dipolos, los cuales se pueden introducir tanto en la parte superior como en la inferior del elemento diseñado, esta elección va a estar condicionada sobre todo por la primera elección que se ha realizado con el parche apilado, ya que se ha elegido la respuesta vertida por el parche apilado en la parte inferior del sustrato, por tanto, es una buena opción implementar estos dipolos en la parte superior debido a la optimización de las dimensiones del elemento radiante final.

Dichos dipolos están diseñados con una longitud de  $\lambda/4$  para las frecuencias de 1.15, 1.275, 1.4, 1.525, 1.65 GHz. Estos dipolos son diseñados como monopolos normales, igual a los vistos en la asignatura de antenas, pero en este diseño final se observa que dichos dipolos tienen una pequeña curvatura. Esta nueva idea de implementación se ha obtenido por medio del estudio del monopolo sinusoidal indicado anteriormente.

Para esto se ha utilizado la teoría correspondiente a diseño de antenas impresas, dipolos, hallándose por medio de un modelo de cavidad donde se hallan los valores de ancho y largo necesarios para las diferentes frecuencias.

El primer paso a realizar ha sido hallar las longitudes de cada uno de los dipolos con valor de  $\lambda/4$  para cada una de las frecuencias, obteniendo los siguientes valores de la tabla.

Siendo:

$$\lambda = \frac{c}{f_0} \quad \text{con } f_0 \text{ es la frecuencia de corte.}$$

**Tabla 0-4: Dimensiones preliminares longitud dipolos**

Frecuencias	Longitud
1.15 GHz	65.217 mm
1.275 GHz	58.824 mm
1.4 GHz	53.571 mm
1.525 GHz	49.18 mm
1.65 GHz	45.155 mm

El siguiente paso a calcular es el ancho de cada uno de los dipolos por medio de la fórmula de cavidad de dipolo impreso visto en la parte de teoría de la asignatura de antenas. Donde se obtienen los siguientes anchos para cada uno de los dipolos.

**Tabla 0-5: Dimensiones preliminares ancho dipolos**

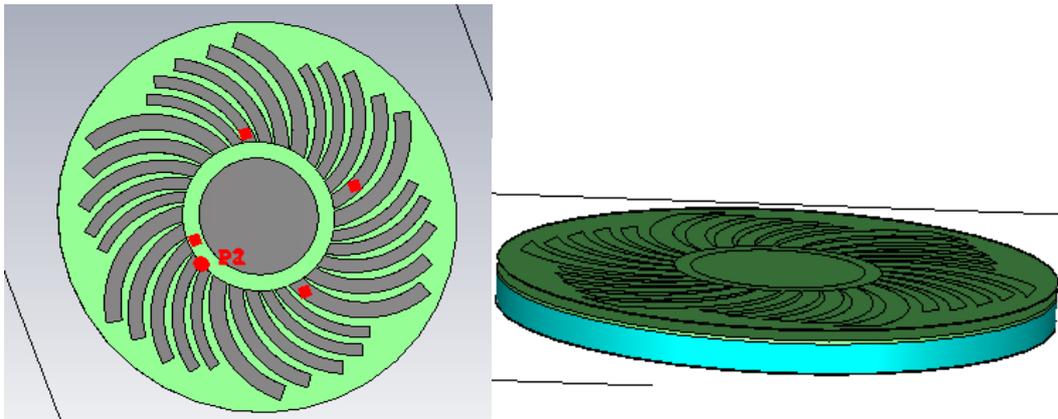
Frecuencias	Ancho
1.15 GHz	9.927 mm
1.275 GHz	8.904 mm
1.4 GHz	8.063 mm
1.525 GHz	7.361 mm
1.65 GHz	6.765 mm

Posteriormente, una vez obtenidos cada uno de los cinco dipolos se procede a duplicarlos en torno a una circunferencia para obtener los mencionados dipolos impresos. Estos dipolos se encuentran centrados en el eje de coordenadas de toda la estructura, en la parte superior del

último sustrato compuesto por Taconic RF-35, con los valores de sus constantes y espesor indicados en la tabla de anexo L

Una vez calculados los valores de longitud y espesor de cada uno de los dipolos, se procede a ser introducidos de una manera centrada por el eje de coordenadas como se ha mencionado anteriormente. Para obtener la mejor respuesta de parámetros S11 y de radiación, se procede a realizar iteraciones para conseguir las mejores longitudes y espesores de cada uno de los dipolos parásitos finales. Tras varias iteraciones, se comienza a observar ciertos comportamientos, los cuales nos llevan a realizar las 3 siguientes fases de modificaciones para la obtención final del elemento radiante.

El primer diseño realizado con todos los elementos es el siguiente, en el cual se van a hacer los diferentes cambios de las tres siguientes fases:



**Figura 0-25: Parche con dipolos**

### ***3.1 Fase 1: Parche con dipolos.***

Una vez obtenido el primer diseño se comienzan a realizar pequeñas modificaciones capaces de hacer que el diseño final cumpla con las especificaciones requeridas de una manera óptima.

Como ya se ha indicado anteriormente la introducción de los dipolos consiste en la mejora de la respuesta final y sobre todo la mejora del centro de fase, ya que los dipolos proporcionan una estabilidad de centro de fase mayor que el parche apilado normal. Provocando un comportamiento beneficioso para el elemento final.

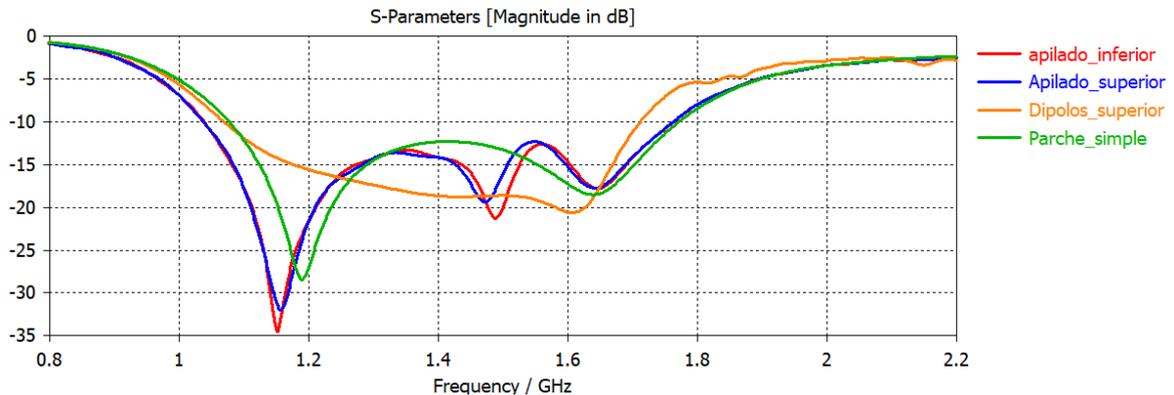
El comportamiento de estos dipolos es bueno para la adaptación de este parche debido al comportamiento de estos frente a las corrientes creadas por el parche activo. Ya que dichos dipolos se alimentan por acoplo por medio de las corrientes creadas, consiguiendo hacer circular dichas corrientes de una forma circular, polarización circular y mejorando con ello la adaptación ya que es un elemento apilado. Los elementos apilados aumentan los anchos de banda en torno a un 10 % el ancho de banda inicial del elemento.

En esta primera fase por tanto se estudia el efecto que crean los dipolos sobre la estructura, observándose lo indicado en los párrafos anteriores.

### ***3.2 Fase 2: Parche con dipolos sin parche apilado.***

Tras observar el comportamiento de dichos dipolos, encargados de la conducción de las corrientes por medio de acoplamiento, se pasa a observar el comportamiento del parche apilado con respecto a dicho dipolos.

En primer lugar, se han observado las adaptaciones obtenidas en el subapartado de parche activo simple, 1, y de parche apilado, 2, del apartado de diseño, donde se observa un aumento del ancho de banda relativamente pequeño, con una mejora en la adaptación. Después de esta observación se pasa a calcular la simulación para el parche con dipolos, y así observar como dichos dipolos tienen un ancho de banda algo menor que el apilado, pero sigue cumpliendo con las especificaciones de ancho de banda, pero mejora la respuesta en la banda entera, Figura 0-26, al saber también que los dipolos mejoran el centro de fase de la estructura se llega a la conclusión de sustituir el parche apilado circular por los dipolos como elemento apilado.



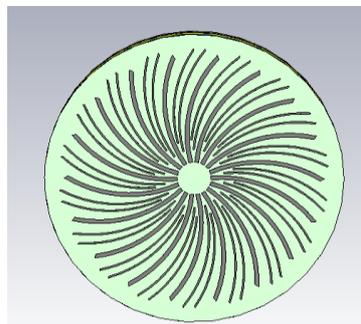
**Figura 0-26: Dipolos Apilados**

Otra de las opciones que pueden implementarse es la de incluir ambos elementos apilados, pero no es buena opción ya que se aumentarían notablemente las dimensiones y no se mejoraría en gran medida la respuesta. Sí que mejoraría el ancho de banda final, pero como ya se cumple con la banda de 1.15 – 1.65 GHz, no sería necesaria esa implementación.

### 3.3 Fase 3: Modificación de dipolos.

La siguiente y última fase de optimización y mejora del parche final consiste en obtener los dipolos con las medidas que devuelvan un resultado bueno para los requisitos indicados.

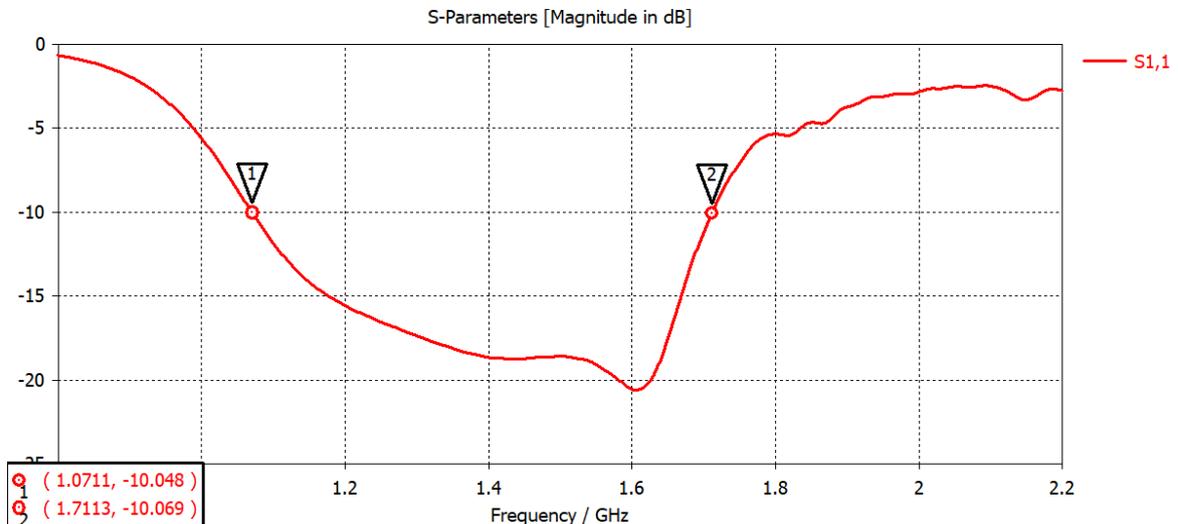
Una vez eliminado el parche circular apilado se pueden modificar los dipolos y con ello mejorar las dimensiones de la antena, también se puede mejorar el acoplo entre dipolos. Por tanto, se obtiene una Figura 0-27 en la que dichos dipolos se encuentran situados de la siguiente manera, con una forma simétrica.



**Figura 0-27: Dipolos Finales**

Como se puede observar en la Figura 0-26, se tenía unos dipolos con diferentes longitudes y anchos para cada uno y en esta última se tienen dipolos con mismo ancho y diferente largo entre los dipolos más finos y el grueso. Estas modificaciones se realizan en primer lugar porque el ancho entre dipolos no revela ninguna mejora sustancial para estas frecuencias, en

el caso de los dipolos gruesos. Después de introducir estos dipolos gruesos se ha pasado a la introducción de otros dipolos más finos y un con diferente longitud para controlar las corrientes existentes entre las partes más separadas de los dipolos gruesos, obteniendo así la respuesta de la Figura 0-28.



**Figura 0-28: Respuesta de los dipolos de Figura 0-27**

La longitud de los dipolos internos tiene que tener un ancho relativamente pequeño, sino provoca el desplazamiento de la respuesta de los parámetros S y con ello se puede provocar que no cumpla con alguno de los extremos de la banda.

En relación con la longitud de dichos dipolos, se observa que los dipolos más finos por la parte superior son más largos que el grueso, pero en su debida medida, si se introduce una diferencia de longitudes grande provocamos también la aparición de picos de resonancia de modos próximos al modo que se encuentra propagándose.

### 5.3.1 Alimentación

Por último, se procede a explicar la forma de diseño de la alimentación correspondiente a dicha estructura final.

La alimentación en un primer lugar se basa en la implementación de una sonda coaxial, la cual se encuentra situada en las perforaciones situadas entre el plano de masa y los feeds creados encima del sustrato del parche simple, Figura 0-18. Dichas perforaciones tienen el mismo radio que los filamentos internos de los conectores SMA con los feeds con un radio de 8.5 mm.

En la parte inferior del plano de masa se encuentra situado el conector SMA con medidas fijas para estas frecuencias, siendo el radio interno de dicho conector 2.1 mm y el externo de 3.6 mm, medidas obtenidas del documento de especificaciones correspondientes al conector SMA TE conectividad 1-1478968-0 de 50  $\Omega$ .

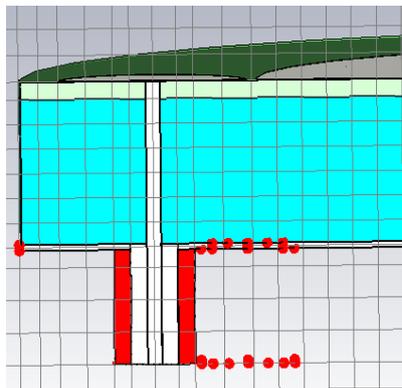
Por tanto, al tener esas dimensiones fijas, se condiciona el valor del filamento mencionado anteriormente, ya que se tiene que conseguir un valor de 50  $\Omega$  en el puerto conectado en el conector SMA. Tras varias simulaciones se obtiene un radio de filamento de 0.64 mm, con el cual se obtiene ese valor de impedancia requerido, Figura 0-29.

Port1_e1 (peak)	
Frequency:	1.5
Phase:	0
Line Imp. [Ohms]:	49.42
Wave Imp. [Ohms]:	259.9
Beta [1/m]:	45.56
Accuracy:	1.96e-12
Mode type:	TEM
Maximum:	8960
Plane at z	-10

**Figura 0-29: Impedancia Conectores**

Para poder realizar la conexión de dicho conector SMA con la estructura es necesaria la perforación del plano de masa con un radio de 2.1 mm correspondiente al radio inferior, radio en el que termina el teflón, encargado del recubrimiento de dicho filamento.

Este tipo de alimentación consiste en una forma de proporcionar tensión al parche activo por medio de acoplamiento. Al igual que pasaría por ejemplo en un condensador.



**Figura 0-30: Conectores**

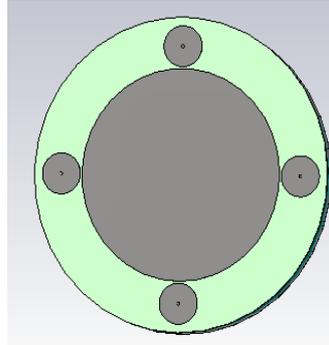
Los conectores SMA tienen tres capas, la primera de radio 3.6 mm está formada por PEC, encargado de realizar el revestimiento del Teflón, posteriormente de radio 2.1 mm se tiene el Teflón con  $\epsilon_r$  igual a 2.1, encargado de realizar el aislamiento de filamento, y finalmente el filamento nombrado en el párrafo anterior, el cual está implementado por PEC.

Por último, dichos filamentos están conectados con los feeds o alimentadores, los cuales se encuentran en una posición específica del centro de coordenadas optimizando el comportamiento de la respuesta de los parámetros, con un espesor de 0.035 mm y con radio de 8.5 mm. Dicha distancia con el centro de coordenadas es de 53.05 mm.

En este capítulo comenzaba comentando que en primer lugar se implementa únicamente una alimentación de sonda coaxial, pero para poder cumplir con la especificación de polarización se procede a crear tres alimentaciones más similares a la explicada. Dichas alimentaciones se encuentran rotadas en 90 grados, obteniendo así una polarización RHCP.

**Tabla 0-6: Dimensiones dipolos finales**

	<b>Ancho</b>	<b>Longitud</b>
<b>Dipolos Grueso</b>	1.9854 mm	57.76 mm
<b>Dipolo fino 1</b>	0.8272 mm	54.72 mm
<b>Dipolo fino 2</b>	0.8272 mm	50.18 mm



**Figura 0-31: Alimentación**

Antes de comenzar a comentar la última estructura por implementar y simular cabe indicar las últimas dos modificaciones realizadas, las cuales consisten en primer lugar en variar la altura final existente entre el plano de masa y el parche debido a que con la altura de 14 mm se sobre pasaban las dimensiones de los conectores que van a ser utilizados en la construcción, por tanto, dicha altura se termina modificando a 13 mm. Por otra parte, la última modificación consiste en intercambiar el sustrato del parche, Taconic FR-35 de 1.524 mm, por fibra de vidrio, Fr4, de 1.58 mm, con  $\epsilon_r = 3.9$  y  $\text{tg}(\delta) = 0.02$ .

### **K Comparativa de las bandas de frecuencia.**

En este apartado se considera necesario la introducción de las bandas de frecuencia comprendidas en cada uno de los sistemas GNSS, esas bandas mencionadas en la tabla comparativa expuesta en el anexo D.

Estas bandas son explicadas para cada uno de los sistemas, ya que para cada uno de ellos se tiene una pequeña modificación de frecuencias comprendidas en cada banda, es decir, la banda L1 por ejemplo para GPS comprende unas frecuencias diferentes que para GLONASS. [11]

**Tabla 0-7: Bandas GNSS**

	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>	<b>GALILEO</b>
<b>Frecuencias (GHz)</b>	L1: 1.563 – 1.587 Fc=1.575 L2: 1.216 – 1.240 L5: 1.164 – 1.188	L1: 1.593 – 1.610 L2: 1.240 – 1.254	E5: 1190 - 1214 E3: 1214 -1216 E4: 1254 -1260 E6: 1260 - 1300 E2: 1559 -1563 E1: 1587 - 1593 C: 5010 - 5030

### **L Materiales.**

En este anexo se adjuntan cada uno de los materiales utilizados con sus valores de tangente de delta,  $\epsilon_r$ , y espesores correspondientes.

**Tabla 0-8: Constantes de los materiales**

<b>Elemento</b>	<b>Plano masa</b>	<b>Altura1</b>	<b>Sustrato Parche</b>	<b>Parche Activo y Feeds</b>	<b>Altura2</b>	<b>Sustrato Apilado</b>	<b>Dipolos</b>
<b>Nombre material</b>	PEC (conductor)	Foam	FR4	PEC (conductor)	Dinvicel H/HP/Ht 80	Taconic FR-35	PEC (conductor)
<b>Tg(s)</b>	0	0.001	0.002	0	0.0005	0.0018	0
<b><math>\epsilon_r</math></b>	1	1.1	3.9	1	1.09	3.5	1
<b>Espesores</b>	0.508 mm	13 mm	1.58 mm	0.0035 mm	30 mm	0.508 mm	0.035 mm

## M Estructura de chokes 3D final

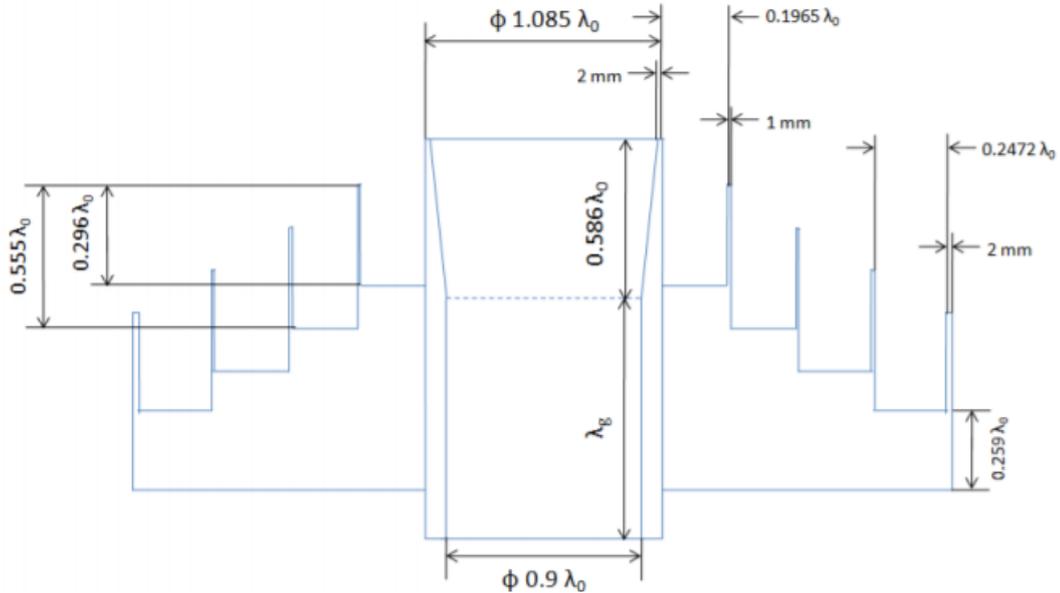


Figura 0-32: Diseño de chokes 3D de Adrián [15]

Como se puede observar en el TFG realizado anteriormente por Adrián se obtienen diferentes estructuras de chokes 3D variando de diferente manera la pendiente de los chokes, pasando por pendientes lineales y sinusoidales. Para este diseño realizado se obtiene una de las estructuras de chokes 3D como la ideal para la implementación siendo esta la estructuras de chokes correspondientes a una pendiente de manera lineal con ángulo  $\theta_1 = 22.63^\circ$  y  $\theta_2 = 19.38^\circ$ , Figura 0-33, con una respuesta igual a la d de la Figura 0-33.

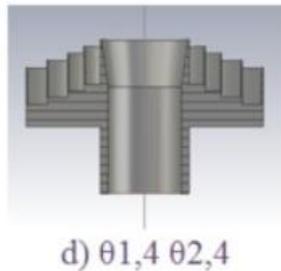


Figura 0-33: Estructura de chokes [12]

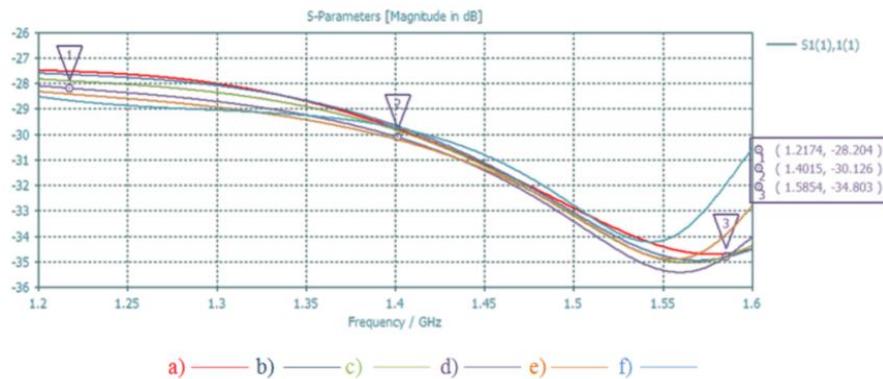


Figura 0-34: Respuesta Chokes [12]

Como se puede ver en el TFG de Adrián, tras varias iteraciones en primer lugar espesor de los chokes, se obtiene que  $W1 = 41.06$  mm y  $W2 = 53.49$  mm es el resultado más óptimo para las frecuencias comprendidas entre 1.21 – 1.58 GHz.

Por tanto, el objetivo de dicho TFG de Adrián, es conseguir una estructura con corrugaciones, chokes 3D, capaces de mejorar la respuesta de un elemento radiante diseñado para las frecuencias comprendidas por lo menos entre 1.1 – 1.58 GHz, como se puede ver en la respuesta de los parámetros S. Ya que con dicha bocina se consigue eliminar ondas incidentes de bajo ángulo de inclinación que pueden distorsionar la información obtenida finalmente por el sistema.

La implementación de este sistema se hace por medio de la estructura dibujada en el boceto **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, con la herramienta de implementación de polígonos de CST, capaz de obtener una estructura desde un boceto con la simetría de revolución a través de una circunferencia.

## ***N Construcción***

El último paso a realizar tras el diseño consiste en la construcción del elemento final diseñado. Esta construcción se realiza por partes, en primer lugar, se sacan cada uno de los documentos DXF, necesarios para la construcción. Estos documentos DXF contienen cada una de las medidas de cada una de las capas.

Al ser una herramienta que solo obtiene documentos DXF de 2D, se necesita 1 por cada una de las capas existentes, e incluso uno por cada grupo de taladros introducidos para la construcción final.

Los taladros que se tienen que introducir son primero los encargados de atornillar la estructura a la estructura de medida. Los siguientes taladros son los correspondientes a la sujeción de los conectores. Estos dos grupos de taladros se encuentran situados en el plano de masa de la estructura.

Posteriormente se tiene que introducir taladros a cada capa para la sujeción entre ellas.

Tras obtener dichos documentos se procede a la impresión de los elementos y ejecución de los taladros, para finalmente ser implementado y medido.