

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



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

TRABAJO FIN DE GRADO

**Diseño y prototipado mediante impresión 3D de antenas
para comunicaciones por satélite**

Estudiante: Juan Antonio González Guerrero

Tutor: Lucas Polo López

Ponente: Jorge Alfonso Ruiz Cruz

Julio 2018

Diseño y prototipado mediante impresión 3D de antenas para comunicaciones por satélite

Estudiante: Juan Antonio González Guerrero

Tutor: Lucas Polo López



**Grupo de Radiofrecuencia, Antenas, Circuitos y Sistemas.
Dpto. de Tecnologías Electrónicas de Comunicaciones.
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Julio 2018**



Resumen

Este Trabajo Fin de Grado consiste en la comparación de diferentes antenas de bocina circulares. Se trabaja en condiciones de espacio libre y en frecuencias en banda K, concretamente entre 17 GHz y 20 GHz.

Primero se introducirán una serie de conceptos básicos usados a lo largo de este TFG, tales como, teoría de guías de onda, teoría de antenas, diagrama de radiación, coeficiente de reflexión, ganancia...

Posteriormente se desarrolla un programa que grafique el campo de los diferentes modos que se propagan en la guía de onda circular, así como otra versión que realice la suma ponderada de los mismos, mostrando en la memoria algunos ejemplos.

A continuación, se diseñan una antena de bocina monomodo y una antena de bocina multimodo siguiendo el ejemplo de la antena de bocina Potter. Esta última se diseña para que propague el modo Híbrido HE_{11} , previamente graficado en el programa Matlab.

Se comparan los diferentes resultados de las dos antenas diseñadas, ambas de la misma longitud total, en cuanto a reflexión y a radiación, observando que las dos tienen diferentes aspectos positivos.

Para construir la antena se ve la necesidad de diseñar un transformador al no disponer de una transición de guía circular a coaxial. Por lo que con el mismo programa se diseña un transformador de guía de onda circular a guía de onda rectangular, concretamente la WR51.

Se añade a ambas antenas de bocina el transformador y el *flange* WR51 y se comparan las simulaciones.

Por problemas técnicos ajenos a este TFG solo se construye la antena de bocina monomodo y se mide en la cámara anecoica, comparando las medidas con las simulaciones. Los resultados varían respecto a las simulaciones teóricas debido a las pérdidas de los materiales, ya que no son ideales.

Abstract

This Bachelor Thesis consists in the comparison of different horn antennas, for its latter use in the feeding of a reflector. This designs work in K-band between 17 GHz and 20 GHz and in free-space conditions.

First a series of basic concepts are introduced to understand the TFG, such as waveguide theory, antenna theory, radiation diagram, reflection coefficient, gain ...

Later a program is developed that graphs the different modes that are propagated in the circular waveguide, as well as another version that combines them assigning a percentage to each one, showing in them memory some examples.

Next, a single-mode horn antenna and a multimode horn antenna are developed following the example of the Potter horn antenna. The multimode horn antenna is designed to propagate Hybrid HE_{11} mode, previously plotted in our Matlab program.

The different results of the two designed antennas are compared in terms of reflection and radiation, observing that you have different positive aspects in each one, it's important to say that both antennas have the same total length.

To build the antenna we have the necessity of designing a transformer because it does not have a circular connector. Therefore, with the same program, a circular waveguide to rectangular waveguide transformer is designed, specifically the WR51.

The transformer and the flange WR51 are added to both horn antennas and the simulations are compared.

For different problems only the single-mode horn antenna is built and measured in the anechoic chamber, comparing the measurements with the simulations. The results vary with respect to the theoretical simulations due to the losses of the materials since they are not ideal.

Palabras clave

Guía de onda, reflexión, parámetros S, impedancia de entrada, adaptación, diagrama de radiación, lóbulo principal, lóbulos secundarios, SLL, antena, permitividad eléctrica, permeabilidad magnética, antena de bocina circular, monomodo, multimodo, decibelio

Keywords

Waveguide, reflexion, S Param, input impedance, adaptation, radiation diagram, main lobe, secondary lobes, SLL, antenna, electric permittivity, magnetic permeability, circular horn antenna, monomode, multimode, decibel.

Agradecimientos

Después de 5 años estudiando, cientos de cafés y miles de horas invertidas me dispongo a escribir unas líneas de un trabajo que al principio veía muy difícil llegar a hacer.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor Lucas Polo por darme la oportunidad de realizar este trabajo, por su paciencia y por su ayuda. También a Jorge Ruiz Cruz por sus consejos al iniciar este proyecto. La experiencia ha sido muy positiva, y muy recomendable, a los que quieren realizar un TFG de RFCAS os animo a hacerlo. Nadie dice que os vaya a resultar fácil, pero al final, merece la pena.

Tampoco me olvido de toda la gente que he conocido en esta etapa, que me han acompañado durante este recorrido y hemos consolidado una amistad que empezó en las fiestas de medicina. En especial a J. Alfonso Méndez López por su compañía durante todo este tiempo, como compañero de prácticas, de proyecto y de juegos, pero no me olvido de los demás: Daniel Sanz, Jorge Campos, Los Sergios, Manu manel, Pablo, Diego, Borja y Jamil, y todos los demás con los que he compartido la mayor parte de mi recorrido en esta universidad, espero seguir manteniendo el contacto con todos vosotros.

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. Los cuales creyeron en mí desde el principio, incluso en momentos en los que ni yo mismo creía y por no dejarme tirar la toalla en ningún momento, ayudándome en todo lo posible, desde tratando de comprender lo que hacía hasta trayéndome cafés con galleta en los peores momentos. Mis hermanos, abuelos, amigos de la infancia.... A todos vosotros, simplemente gracias, no sería quien soy de no ser por vosotros.

Muchas gracias a todos, este éxito también os pertenece.

Juan Antonio

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Estado del arte	3
2.1	Guías de onda	3
2.1.1	Modos de propagación.	3
2.1.2	Guía de onda rectangular	5
2.1.3	Guía de onda circular.....	6
2.1.4	Programa de cálculo de campos EM	7
2.2	Teoría de Antenas	9
2.2.1	Concepto de Antena.....	9
2.2.2	Banda de frecuencias	9
2.2.3	Clasificación de las Antenas.....	9
2.2.4	Parámetros de una antena	10
2.2.4.1	Diagrama de Radiación.	10
2.2.4.2	Concepto de Diagrama de Radiación	10
2.2.4.3	Tipos de diagramas de radiación	11
2.2.4.4	Ganancia Directiva y Directividad	11
2.2.4.5	Ganancia de Potencia y Ganancia Máxima	12
2.2.4.6	Eficiencia	12
2.2.4.7	Impedancia de entrada	12
2.2.4.8	Parámetros de dispersión	13
2.2.5	Antenas de Bocina	13
2.2.5.1	Tipos de antenas de bocina.....	14
2.2.5.2	Antena de bocina circular	14
3	Diseño de bocinas.....	15
3.1	Bocina cónica monomodo	15
3.2	Bocinas multimodo.....	16
3.2.1	Motivación.....	16
3.2.2	Antena de Bocina Multimodo de Potter	17
3.2.3	Diseño Antena de Bocina Multimodo	17
3.2.4	Reflexión antena	19
3.2.5	Optimizador.....	23
4	Fabricación mediante impresión 3D.....	25
4.1	Transformador.	25
4.2	Flange	26
4.3	Antena completa.....	26
4.4	Fabricación de la antena	28
4.5	Resultados experimentales	29
4.5.1	Reflexión (S_{11}).....	29
4.5.2	Diagrama de radiación de la antena.....	30
4.5.3	Ganancia obtenida	32
5.	Conclusiones y trabajo futuro.....	33
5.1	Conclusiones.....	33
5.2	Trabajo futuro	33
	Referencias	34
	Glosario	35

Anexos	XXXVII
A Herramientas de diseño y simulación.	XXXVII
A.I Matlab.....	XXXVII
A.II CST Microwave Studio.....	XXXVII
A.III Cura Ultimaker	XXXIX
B Proceso Fabricación Antena de Bocina	XL
C Cámara anecoica	XLI
C.I Funcionamiento	XLI
C.II Equipamiento	XLII
C.II.1 Analizador de redes.....	XLII
C.II.2 Kit de calibración	XLII
C.II.3 Antena de referencia.....	XLIII
C.II.4 Software de medida.....	XLIII
C.II.5 Amplificadores	XLIV
C.II.6 Proceso de medida.....	XLIV

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: GUÍA DE ONDA	3
FIGURA 2-2: MODOS DE PROPAGACIÓN.	4
FIGURA 2-3: GUÍA DE ONDA RECTANGULAR.	5
FIGURA 2-4: GUÍA DE ONDA CIRCULAR.....	6
FIGURA 2-5: TE ₁₁ , GUÍA DE ONDA CIRCULAR A 18.5 GHZ.....	7
FIGURA 2-6: TM ₁₁ , GUÍA DE ONDA CIRCULAR A 32 GHZ.....	7
FIGURA 2-7:TE ₂₂ , GUÍA DE ONDA CIRCULAR A 100 GHZ.....	8
FIGURA 2-8: MODO HE ₁₁	8
FIGURA 2-9 DIAGRAMAS DE RADIACIÓN: A) ISOTRÓPICO B) OMNIDIRECCIONAL C) DIRECTIVO	11
FIGURA 2-10: DIAGRAMA DE RADIACIÓN: A) CARTESIANAS 2D B) POLARES EN 2D C) ESFÉRICAS 3D	11
FIGURA 2-11: PARÁMETROS S, RED DE 2 PUERTOS.	13
FIGURA 2-12: ANTENAS DE BOCINA	14
FIGURA 2-13: ANTENA DE BOCINA CIRCULAR	14
FIGURA 3-1: ANTENA DE BOCINA MONOMODO ANTENA DE APERTURA CÓNICA.....	15
FIGURA 3-2: REFLEXIÓN (S ₁₁) BOCINA CÓNICA MONOMODO.....	15
FIGURA 3-3: DIAGRAMA DE RADIACIÓN BOCINA CÓNICA MONOMODO.....	16
FIGURA 3-4: ANTENA DE BOCINA: A) MONOMODO B) MULTIMODO.....	16
FIGURA 3-5: ANTENA DE BOCINA POTTER.	17
FIGURA 3-6: CÁLCULO DEL PRIMER ESCALÓN.	17
FIGURA 3-7: CÁLCULO DEL SEGUNDO ESCALÓN.....	17
FIGURA 3-8: BOCINA MULTIMODO CST.....	18
FIGURA 3-9: REFLEXIÓN (S ₁₁) EN FUNCIÓN DE 'R ₂ '.....	19
FIGURA 3-10: VARIACIÓN 'R ₂ ' CASO EXTREMO R ₂ =7	MM. 19

FIGURA 3-11: REFLEXIÓN (S11) EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD 'L2' .	20
FIGURA 3-12: VARIACIÓN R2 CASO EXTREMO 'L2=0.5*LAMBDA(λ) MM' .	20
FIGURA 3-13: REFLEXIÓN (S11) EN FUNCIÓN DEL TERCER RADIO 'R3' .	20
FIGURA 3-14: REFLEXIÓN (S11) EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD 'L3' .	21
FIGURA 3-15: REFLEXIÓN (S11) EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE APERTURA 'THETA' .	21
FIGURA 3-16: DIAGRAMA DE RADIACIÓN ANTENA DE BOCINA MULTIMODO TEÓRICO NORMALIZADO.	22
FIGURA 3-17: REFLEXIÓN (S11) CON LOS VALORES DE LA TABLA [4] .	23
FIGURA 3-18: REFLEXIÓN (S11) BOCINA CÓNICA MULTIMODO OPTIMIZADA .	23
FIGURA 3-19: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA BOCINA CÓNICA MULTIMODO OPTIMIZADA .	24
FIGURA 4-1: TRANSFORMADOR RECTANGULAR A CIRCULAR .	25
FIGURA 4-2: REFLEXIÓN (S11) DEL TRANSFORMADOR .	25
FIGURA 4-3: FLANGE WR51 .	26
FIGURA 4-4: ANTENA DE BOCINA MONOMODO COMPLETA .	26
FIGURA 4-5: REFLEXIÓN (S11) DE LA ANTENA DE BOCINA MONOMODO COMPLETA .	27
FIGURA 4-6: ANTENA DE BOCINA MULTIMODO COMPLETA A) EXTERIOR B) INTERIOR .	27
FIGURA 4-7: REFLEXIÓN (S11) DE LA ANTENA DE BOCINA MULTIMODO COMPLETA .	28
FIGURA 4-8: IMPRESORA 3D .	28
FIGURA 4-9: ANTENA DE BOCINA CIRCULAR MONOMODO FINAL .	29
FIGURA 4-10: REFLEXIÓN (S11) DE LA ANTENA CON MATERIAL ABSORBENTE .	29
FIGURA 4-11: DIAGRAMAS DE RADIACIÓN A 17 GHz: A) PLANO H B) PLANO E .	30
FIGURA 4-12: DIAGRAMAS DE RADIACIÓN A 18.5 GHz: A) PLANO H B) PLANO E .	31
FIGURA 4-13: DIAGRAMAS DE RADIACIÓN A 20 GHz: A) PLANO H B) PLANO E .	31
FIGURA 4-14: GANANCIA REAL DE LA ANTENA DE BOCINA CIRCULAR .	32
FIGURA 0-1: LOGO MATLAB .	XXXVII
FIGURA 0-2: EJEMPLO CÓDIGO EN LENGUAJE MATLAB .	XXXVII
FIGURA 0-3: LOGO CST .	XXXVII

FIGURA 0-4: DIAGRAMA DE RADIACIÓN 2D EN CST	XXXVIII
FIGURA 0-5: ENTORNO DE TRABAJO CST	XXXVIII
FIGURA 0-6: DIAGRAMA DE RADIACIÓN 3D EN CST	XXXVIII
FIGURA 0-7: LOGO CURA ULTIMAKER.....	XXXIX
FIGURA 0-8: ESPACIO IMPRESIÓN.	XXXIX
FIGURA 0-9: ANTENA DE BOCINA CÓNICA MONOMODO.....	XXXIX
FIGURA 0-10: CÁMARA ANECOICA RFCAS EPS UAM.....	XLI
FIGURA 0-11: MATERIAL ABSORBENTE DE LA CÁMARA ANECOICA.....	XLI
FIGURA 0-12: ANALIZADOR DE REDES.	XLII
FIGURA 0-13: KIT DE CALIBRACIÓN WR51.....	XLII
FIGURA 0-14: ANTENA DE REFERENCIA.	XLIII
FIGURA 0-15: SOFTWARE UTILIZADO PARA MEDIR EN LA CÁMARA ANECOICA.....	XLIII
FIGURA 0-16: AMPLIFICADOR MINI-CIRCUITS ZX60-24-S+.....	XLIV
FIGURA 0-17: FUENTE DE ALIMENTACIÓN PROMAX FAC-662B.....	XLIV
FIGURA 0-18: ESQUEMA MONTAJE CAMARA ANECOICA.....	XLIV

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: FÓRMULAS CÁLCULO MODOS.....	4
TABLA 2: TABLA FRECUENCIAS MICROONDAS.....	9
TABLA 3: VALORES DE DISEÑO	15
TABLA 4: VALORES DE LA ANTENA DE BOCINA MULTIMODO.....	22
TABLA 5: VALORES OPTIMIZADOS DE LA ANTENA DE BOCINA MULTIMODO.....	24

1 Introducción

1.1 Motivación

Las comunicaciones por satélite son utilizadas por millones de personas a diario, ya sea para hacer búsquedas por internet o para navegación GPS. Uno de los elementos más utilizados en los radioenlaces son las antenas de bocina, debido a sus bajas pérdidas, altas directividades, grandes valores de potencia y a que son mecánicamente muy robustas.

En este trabajo se diseñarán y construirán diferentes antenas de bocina mediante impresión 3D para comunicaciones por satélite, para lo cual se trabajará en la banda de frecuencias K, concretamente entre 17 GHz y 20 GHz. Los pasos serán: diseño de varias antenas con un programa de simulación, comparativa de las simulaciones, construcción de una de ellas para verificar que el diseño teórico se adecua al construido y medición de esta antena fabricada, comparándola con la simulación teórica. El método que se usará para fabricar la antena será la impresión 3D, y para aplicarle las propiedades EM se pintará la antena con una pintura metalizada.

Se diseñarán antenas con la máxima directividad posible y unos lóbulos secundarios muy pequeños, para así reducir el riesgo del multi-trayecto y hacer la antena lo más directiva posible en el máximo del lóbulo principal. Para conseguir esto es necesario estudiar el efecto que tiene en los diagramas de radiación la propagación multimodo en las guías de onda. Las antenas propuestas utilizan la polarización lineal y en consecuencia el campo eléctrico y magnético son perpendiculares a la dirección de propagación.

Como el principal objetivo es conseguir una buena radiación, aparte de la importancia de los diagramas de radiación y la ganancia, también es necesario tener en cuenta que el coeficiente de reflexión a la entrada de la antena sea inferior a -15 dB.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este TFG es analizar diferentes tipos diferentes de antenas de bocina circulares de la misma longitud, pero que tienen diferentes modos en la apertura.

Los objetivos concretos de este TFG son:

1. Diseño de un programa que permita observar los campos EM de los modos TE_{mn} y TM_{mn} de una guía de onda circular, así como poder graficar una posible combinación entre varios campos de diferentes modos.
2. Diseño de varias antenas de bocina circulares diferentes para comparar sus prestaciones.
3. Construcción de las antenas descritas anteriormente mediante impresión 3D y comparación de los resultados de radiación y reflexión medidos en la cámara anecoica con los teóricos.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- En el **capítulo 2** se hace referencia a los aspectos teóricos utilizados en este TFG, teoría de guías de onda y en teoría de antenas, haciendo hincapié en las antenas de bocina y diferenciando estas últimas en 2 tipos: monomodo y multimodo. También se muestran las combinaciones de modos del programa realizado.
- En el **capítulo 3** se detalla el diseño de las dos antenas en las que se centra este TFG: la antena de bocina circular monomodo y la antena de bocina circular multimodo, situándose ambas en la banda K con frecuencias comprendidas entre 17 GHz y 20 GHz. Se analizarán los resultados teóricos que se alcanzan con estos diseños en cuanto a reflexión y a radiación.
- En el **capítulo 4**, se muestra cómo se solventa el problema del *flange* y el diseño de la antena completa que se fabrica, así como una comparación entre los resultados medidos y los resultados teóricos del CST.
- Por último, en el **capítulo 5** se presentan las conclusiones extraídas a lo largo de todo el proceso de diseño y fabricación de los diferentes elementos expuestos en este TFG, así como un apartado de posibles mejoras y líneas de trabajo futuro.

2 Estado del arte

En este capítulo se explicará el punto de la partida de este TFG, explicando las bases teóricas de este trabajo, para su posterior diseño de las antenas.

Este capítulo se divide en 2 partes: Fundamentos teóricos de las guías de onda y Teoría de antenas.

2.1 Guías de onda

Una guía de onda es un medio físico por el cual se propaga una onda, la cual lleva una señal. Suele utilizarse a altas frecuencias, en sustitución de las líneas de transmisión que presentan unas altas pérdidas a dichas frecuencias.

La transmisión de una señal por este medio reduce las pérdidas que se producen en la transmisión de la señal desde el emisor hasta el receptor, por lo que el uso de este medio para la transferencia de información es de los más utilizados en el campo de las microondas.

Una guía de onda está formada por un conductor perfecto en el exterior que rodea un dieléctrico, el cual lo determina su constante dieléctrica (ϵ_r). Cada material tiene una ' ϵ_r ' diferente.

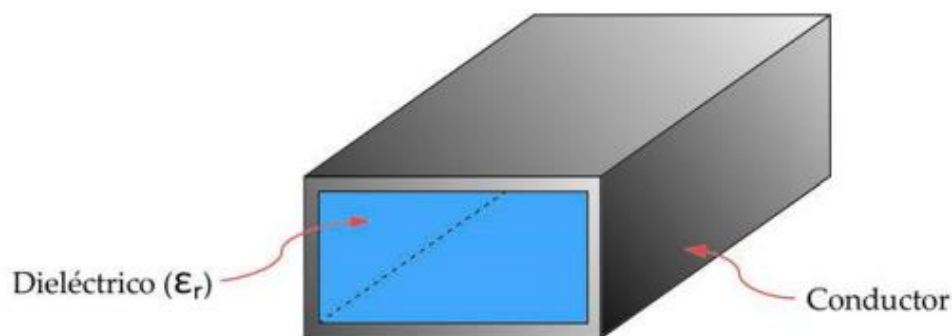


Figura 2-1: Guía de onda

La constante dieléctrica del medio es un número complejo formado por la parte real (ϵ_r') y parte imaginaria (ϵ_r''), de donde si dividimos entre la constante dieléctrica del vacío obtenemos lo siguiente:

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = (1 + X_e) \quad (1)$$

Donde " X_e " se corresponde con la parte imaginaria, con la parte de pérdidas del material.

2.1.1 Modos de propagación.

Las ondas electromagnéticas se desplazan por las diferentes guías de onda en diferentes modos de propagación, los cuales dependen de las especificaciones de la guía y la frecuencia a la que se utilizan.

Si la frecuencia de la señal es superior a la frecuencia de corte de dicho modo, entonces hay propagación de la señal; si por el contrario la frecuencia de corte del modo es superior a la de la señal, entonces no habría propagación y se trataría de un modo "evanescente".

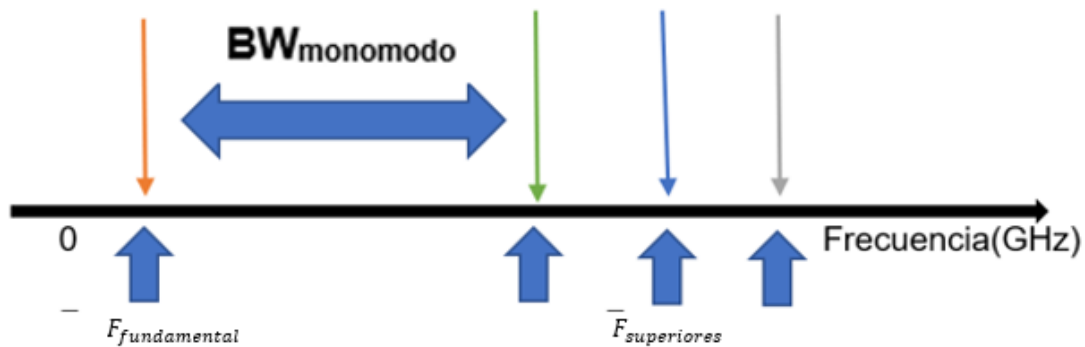


Figura 2-2: Modos de propagación.

El ancho de banda monomodo (BW) es el ancho de banda que comprendido entre el modo fundamental y el primer modo de orden superior.

Existe un número infinito de modos de propagación y cada uno de ellos viene dado por una frecuencia determinada y por la estructura de la guía de onda en cuestión.

En una guía de onda existe la propagación de diferentes modos:

- **Modo Transversal Eléctrico (TE):** En los modos TE la componente longitudinal eléctrica tiene valor nulo ($E_z = 0$) mientras que la componente longitudinal magnética tiene un valor distinto de 0 ($H_z \neq 0$).
- **Modo Transversal Magnético (TM):** En los modos TM sucede al contrario que en los TE, la componente longitudinal eléctrica tiene valor distinto de 0 ($E_z \neq 0$) mientras que la componente longitudinal magnética tiene valor nulo ($H_z = 0$).
- **Modo Transversal Electromagnético (TEM):** Los modos TEM se producen cuando la guía de onda posee más de un conductor perfecto. Dicho modo posee las componentes longitudinales del campo eléctrico y magnético con valor nulo ($E_z = 0, H_z = 0$).
- **Modo Híbrido:** Son aquellos modos en los que el valor de las componentes longitudinales eléctricas y magnéticas son, ambas, diferentes de 0 ($E_z \neq 0, H_z \neq 0$). El medio más característico es la fibra óptica.

A continuación, se muestra una tabla que resume las fórmulas que dan lugar a los diferentes modos mencionados anteriormente.

Componentes/modos	TE	TM	TEM	HÍBRIDOS
E_z	0	$F_e(u_1, u_2)e^{-\gamma z}$	0	$F_e(u_1, u_2)e^{-\gamma z}$
H_z	$F_h(u_1, u_2)e^{-\gamma z}$	0	0	$F_h(u_1, u_2)e^{-\gamma z}$
E_t	$Z(H_t \times z)$	$(-\gamma/kc^2) \cdot (z \times E_z)$	$F_{et}(u_1, u_2)e^{-\gamma z}$	$F_{et}(u_1, u_2)e^{-\gamma z}$
H_t	$(-\gamma/kc^2) \nabla H_z$	$(1/Z)(z \times E_t)$	$(1/Z)(z \times E_t)$	$F_{ht}(u_1, u_2)e^{-\gamma z}$

Tabla 1: Fórmulas cálculo modos

Se pueden clasificar las guías de onda en función de su forma, siendo las más utilizadas:

- Guía de onda rectangular
- Guía de onda circular

2.1.2 Guía de onda rectangular

La guía de onda rectangular viene dada por sus dimensiones “a” (anchura) y “b” (altura).

En la guía rectangular al poseer solo un conductor perfecto solo se pueden propagar modos TE y TM. Dichos modos vienen dados por las frecuencias de corte, las cuales se basan en las dimensiones a y b de la guía rectangular.

Epsilon (ϵ) y mu (μ) se corresponden con las propiedades del dieléctrico del interior de la guía.

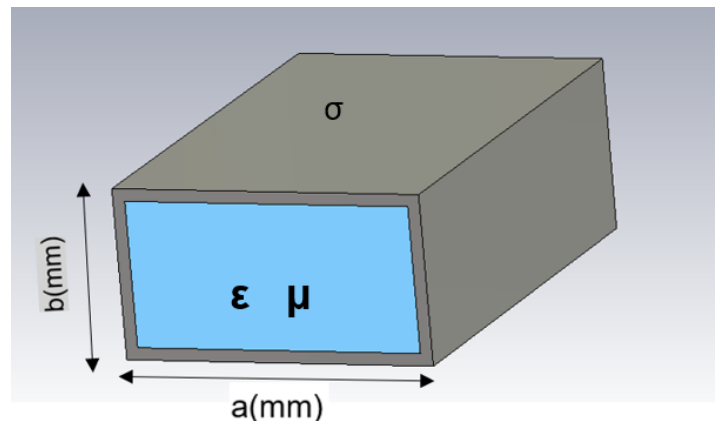


Figura 2-3: Guía de onda rectangular.

En este tipo de guías solo se pueden propagar los modos TE y TM, los cuales se propagan en función de la siguiente fórmula, Siendo:

$$f_{c_{mn}} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{m}{a}\right)^2} \quad (2)$$

Siendo “c” la velocidad de la luz y “m” y “n” los índices de los modos.

La longitud de onda para la que se propaga cada uno de los modos varía en función de la frecuencia de corte de la guía, la cual varía a su vez en función de las dimensiones de la guía rectangular.

$$\lambda_{mn} = \frac{\lambda}{\sqrt{(1 - (f_{c_{mn}}/f_o)^2)}} \quad (3)$$

Donde lambda (λ) es la longitud de onda en el dieléctrico de la guía de onda rectangular.

2.1.3 Guía de onda circular

Las guías de onda circular son muy utilizadas debido a sus amplias prestaciones. Constan de un cilindro con un radio determinado, donde por fuera lo recubre un material con una conductividad (σ) muy elevada y en el interior un dieléctrico con una permitividad eléctrica (ϵ) y permeabilidad magnética (μ) que vienen dadas por el dieléctrico utilizado. Al igual que la guía rectangular solo puede propagar modos TE y TM al tener solo un conductor perfecto, los cuales vendrán dados en función del radio de la guía (r).

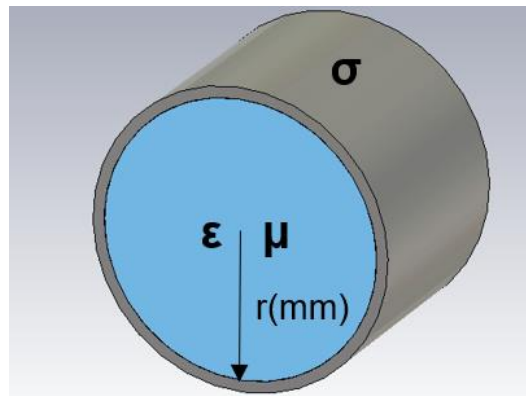


Figura 2-4: Guía de onda circular

Los modos de la guía circular se calculan de forma diferente a los de la guía de onda rectangular, debido a que, al ser su geometría cilíndrica, es necesario realizar los cálculos en coordenadas cilíndricas. Para calcular las frecuencias de los modos es necesario conocer las funciones de Bessel [9].

Las frecuencias de corte de los modos se calculan de forma diferente a los de la guía rectangular, las fórmulas son las siguientes:

$$\frac{p'_{mn}}{2a\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad \frac{p_{mn}}{2a\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (4)$$

Las variables p'_{mn} y p_{mn} son las raíces de las funciones de Bessel, siendo p'_{11} el equivalente al modo fundamental (TE₁₁) y cuyo valor es 1.841 y p_{11} el equivalente al modo TM₀₁ y cuyo valor es 2.405, correspondiéndose al primer modo de orden superior. El ancho de banda monomodo es un valor fijo equivalente que calcular la frecuencia de corte del modo fundamental y multiplicarlo por un factor de 1.3.

En este caso es necesario trabajar en ancho de banda multimodo por lo que es necesario realizar un programa que grafique los campos electromagnéticos a diferentes frecuencias en las que se propagan más de un modo.

2.1.4 Programa de cálculo de campos EM

Las bases de este diseño son las ecuaciones de [1] y se desarrolla en Matlab. Los parámetros de entrada son:

- Modo que se desea graficar (m y n) en mm.
- Frecuencia de diseño (GHz).
- Radio de la guía de onda (mm).

El programa devuelve 2 posibles resultados. Si el modo y su correspondiente campo eléctrico y magnético se propagan o, en caso contrario, a que frecuencia empieza a propagarse.

Graficamos 3 modos, TE_{11} , TM_{11} y TE_{22} :

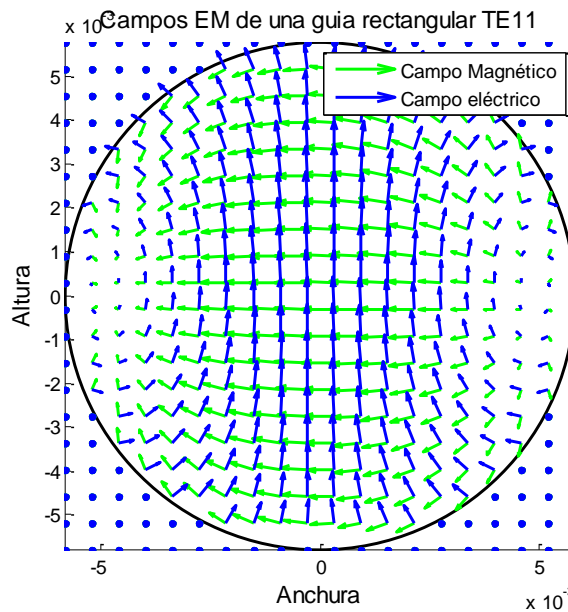


Figura 2-5: TE_{11} , Guía de onda circular a 18.5 GHz.

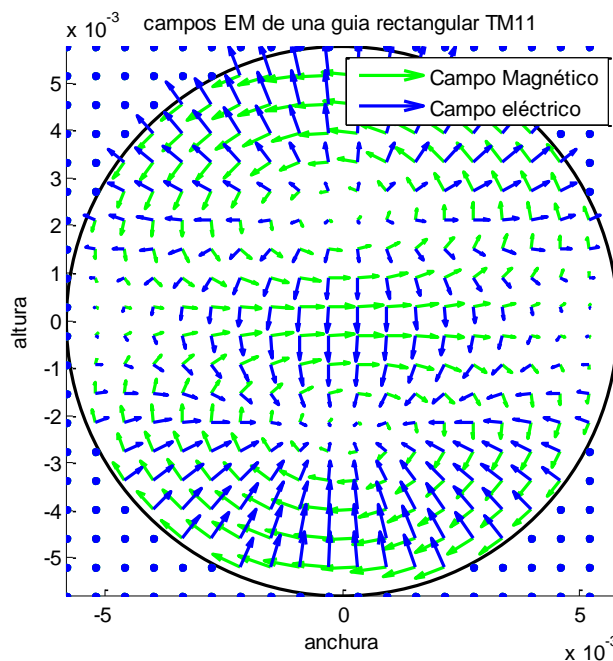


Figura 2-6: TM_{11} , guía de onda circular a 32 GHz

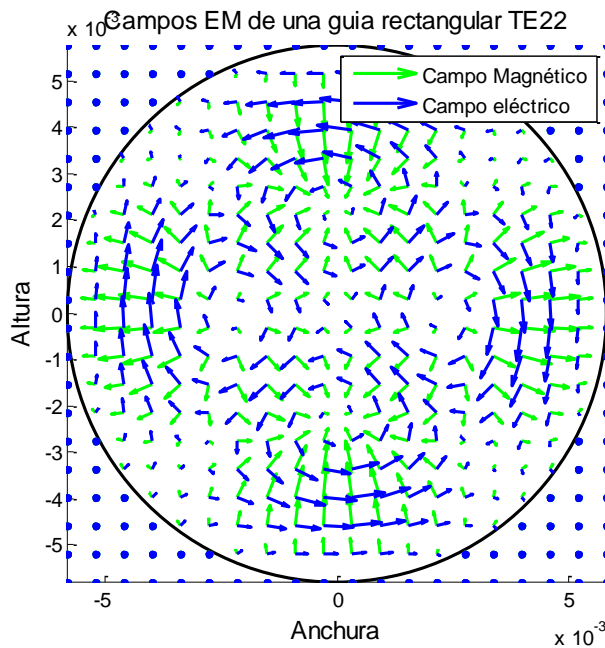


Figura 2-7: TE₂₂, guía de onda circular a 100 GHz

A raíz de este resultado y al querer realizar una antena de bocina multimodo de altas prestaciones se modifica el fichero para que ahora permita graficar combinaciones de modos diferentes con un cierto porcentaje de cada modo

Se va a representar ahora el modo HE₁₁ que resulta de combinar el modo TE₁₁ con un cierto porcentaje del TM₁₁, de esta forma se consigue que el campo eléctrico en la guía sea completamente uniforme en toda la superficie, logrando un aspecto similar a una alimentación uniforme en una guía de onda rectangular.

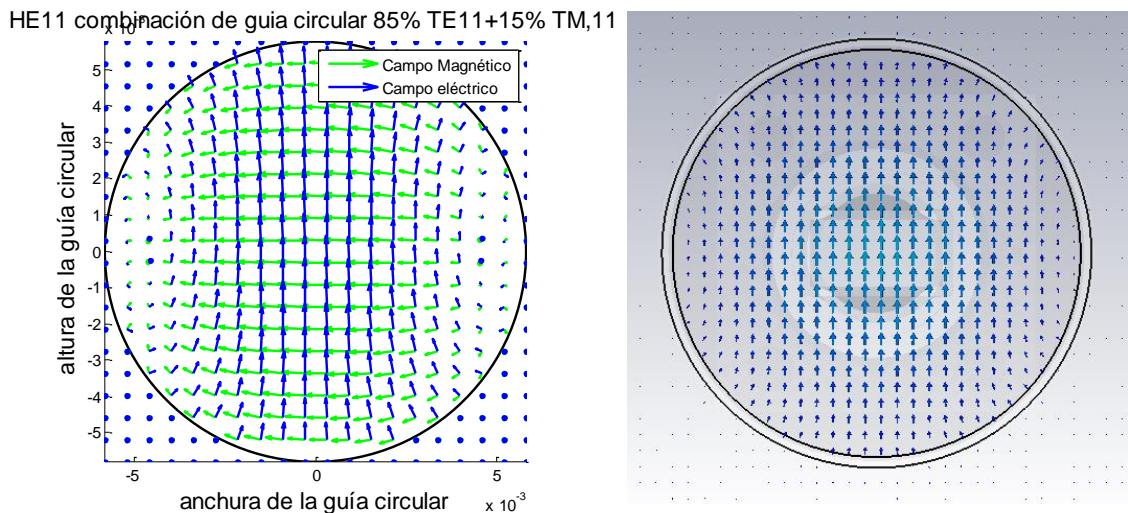


Figura 2-8: Modo HE₁₁.

2.2 Teoría de Antenas

2.2.1 Concepto de Antena

Una antena consta de uno o varios conductores metálicos y su función principal es emitir o recibir ondas electromagnéticas. Las características de la antena dependen de ciertos factores, como son la frecuencia a la que se desea transmitir la información y sus dimensiones físicas.

Las antenas están caracterizadas por el diagrama de radiación, la ganancia, la directividad, la polarización... Es labor del diseñador hacer que todos estos parámetros tengan el valor adecuado.

A la entrada de una antena debe haber un elemento adaptador para que al conectarla al generador la reflexión de la señal sea mínima y se pueda transmitir la máxima señal posible.

2.2.2 Banda de frecuencias

Una forma de clasificar las antenas es en función de la frecuencia a la que se utilizan. El intervalo de frecuencias se llama banda de frecuencias y se definen como frecuencias del espacio electromagnéticas reservadas al uso de las radiocomunicaciones. El uso de estas bandas de frecuencias está regulado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU).

En este TFG al trabajar con microondas, las frecuencias que se utilizarán están comprendidas entre 1 y 300 GHz.

BANDA	FRECUENCIA(GHz)	LONGITUD ONDA(λ)(mm)
L	(1 - 2)	(300 - 150)
S	(2 - 4)	(150 - 75)
C	(4 - 8)	(75 - 37,5)
X	(8 - 12,4)	(37,5 - 24,2)
Ku	(12,4 - 18)	(24,2 - 16,6)
K	(18 - 26,5)	(16,6 - 11,1)
Ka	(26,5 - 40)	(11,1 - 7,5)
Mm	(40 - 300)	(7,5 - 1)

Tabla 2: Tabla Frecuencias microondas.

2.2.3 Clasificación de las Antenas

Existen cuatro tipos básicos de antenas:

1. Antenas de hilo: Los elementos radiantes tiene una longitud de onda muy pequeña y sus dimensiones suelen ser en torno a 1 lambda de tamaño (monopolo, dipolo, yagi...). Se utilizan en frecuencias comprendidas entre 300 KHz y 3 GHz.

2. Antenas de onda progresiva:

Este tipo de antenas suele estar formado por hilos conductores de gran longitud (varias longitudes de onda). Se utilizan en frecuencias comprendidas entre 3 y 300 MHz.

3. *Array* de antenas:

Los *arrays* de antenas están formados por una sucesión de la misma antena separada una cierta distancia, lo cual la permite actuar como una única antena con un diagrama de radiación propio. El diagrama de radiación de estas antenas se puede modificar cambiando la amplitud y la fase de cada elemento del array.

4. Antenas de apertura:

Las antenas de apertura son aquellas que utilizan su superficie para direccionar el haz electromagnético en la dirección deseada. Gracias a esto se consigue concentrar su emisión y recepción en una dirección determinada.

Este TFG se centrará en un tipo de antenas de apertura, concretamente en las antenas de bocina.

2.2.4 Parámetros de una antena

2.2.4.1 Diagrama de Radiación.

El diagrama de radiación es la representación de como radia una antena en función de las coordenadas angulares del espacio. Se define para campo lejano, esto es cuando:

$$d_{antena} > 2 \cdot \frac{D^2}{\lambda} \quad (5)$$

Donde: D se corresponde con el diámetro de la antena y lambda (λ) con la longitud de onda para la frecuencia de uso.

2.2.4.2 Concepto de Diagrama de Radiación

Los principales parámetros que definen el diagrama de radiación de una antena son:

- **Lóbulo Principal:** Es el margen angular en torno a la dirección de radiación máxima. Con ello se define la dirección de apuntamiento.
- **Dirección de apuntamiento:** Es la dirección donde la radiación de la antena es máxima.
- **Lóbulos secundarios:** Son los dos máximos relativos que están contiguos al lóbulo principal.
- **Side Lobe Level (SLL):** Es el cociente entre los valores máximos del lóbulo principal y del lóbulo secundario.
- **Anchura de Haz a 3 dB:** Es la separación angular de direcciones en las que el diagrama de radiación de un haz toma como valor la mitad del máximo.

2.2.4.3 Tipos de diagramas de radiación

En función de la directividad de la antena y en la forma de radiar hay tres tipos de diagramas:

- Isotrópicos: La antena radia de igual forma en todo el espacio tridimensional.
- Omnidireccionales: La antena radia con simetría de radiación en torno a un eje.
- Directivos: La antena radia en una dirección determinada.



Figura 2-9 Diagramas de radiación: a) Isotrópico b) Omnidireccional c) Directivo

El diagrama de radiación se puede representar en 2D o en 3D. Para representar en 2D se suelen utilizar las coordenadas cartesianas o polares mientras que en la representación 3D se suele utilizar las coordenadas esféricas.

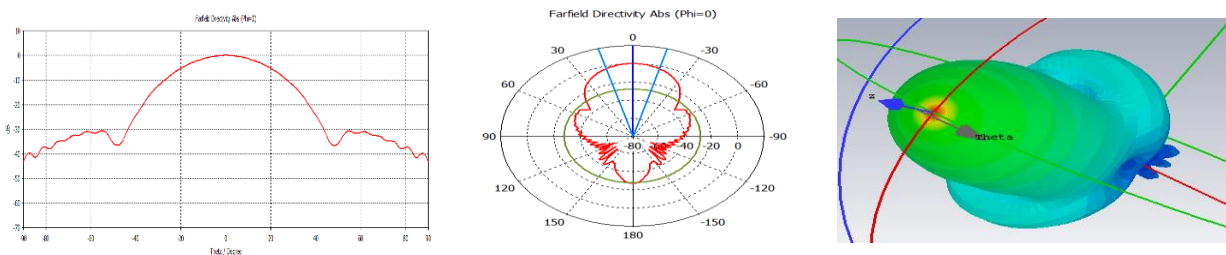


Figura 2-10: Diagrama de radiación: a) cartesianas 2D b) polares en 2D c) esféricas 3D

Cada representación tiene sus pros y sus contras. Con la representación en cartesianas se distingue muy bien el lóbulo principal y los lóbulos secundarios, así como la SLL (*Side Lobe Level*), mientras que con las polares se ve muy bien cómo se distribuye la potencia en todo el espacio tridimensional.

2.2.4.4 Ganancia Directiva y Directividad

La ganancia directiva se define como la densidad de potencia radiada de una antena, en comparación con otra antena de referencia que radie la misma cantidad de potencia de forma isotrópica.

La directividad de una antena muestra su capacidad para concentrar la energía que radia en un solo punto. Se calcula como la relación entre la intensidad de radiación en una dirección (U) frente a la intensidad de radiación que generaría la antena si fuese isotrópica (Figura 2-9), es decir, si radiase uniformemente en todas las direcciones ($U(\Theta_0, \Phi_0)$).

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \cdot \frac{U(\theta, \phi)}{Prad} \quad (6)$$

2.2.4.5 Ganancia de Potencia y Ganancia Máxima

La ganancia de potencia se define como la relación entre la intensidad de radiación de una antena y la de una antena de referencia isotrópica que acepta dicha potencia P_{ent} .

$$G(\theta, \Phi) = 4\pi \cdot \frac{U(\theta, \Phi)}{P_{ent}} \quad (7)$$

Se define como Ganancia máxima al mayor valor que puede tener la Ganancia de potencia. Su valor puede ser menor o igual a 0.

$$G_o = G(\theta_o, \Phi_o) \quad (8)$$

2.2.4.6 Eficiencia

Hay una forma de relacionar la directividad y la ganancia y es mediante la eficiencia. La eficiencia se define como el rendimiento de la antena.

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{ent}} \quad (9)$$

La eficiencia total agrupa todas las pérdidas que puedes sufrir la señal por diversas causas:

- Eficiencia de adaptación ζ_{adap}
- Eficiencia de conductores ζ_{disc}
- Eficiencia de dieléctricos ζ_{disd}

Estas no son las únicas que existen, pero son las más relevantes y las que más influyen en la eficiencia total. La suma de todas ellas se denomina eficiencia total de la antena.

$$\zeta_{tot} = \zeta_{adap} \cdot \zeta_{dis_c} \cdot \zeta_{dis_d} \quad (10)$$

2.2.4.7 Impedancia de entrada

La impedancia de entrada se define como la relación entre la tensión y corriente entre los terminales de la antena. La impedancia de entrada va a determinar cuanta tensión debe aplicar un generador para que se produzca una corriente determinada, en consecuencia, cuanta potencia es capaz de radiar.

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad (11)$$

La impedancia de entrada puede ser compleja: a la parte real se la denomina resistencia y la parte imaginaria se la conoce como reactancia.

2.2.4.8 Parámetros de dispersión

Las antenas, como circuitos de microondas que son, pueden caracterizarse también como una red de dos puertos, donde uno de ellos sería el puerto físico de entrada de la antena radiación (Figura 2-21).



Figura 2-11: Parámetros S, red de 2 puertos.

Los parámetros de dispersión o parámetros S se usan para relacionar la potencia que hay a la entrada de la antena (entrada de la figura 2-21) y a la salida de la antena (salida de la figura 2-21). Se corresponde con una matriz cuadrada que tiene tantas filas y columnas como entradas y salidas tenga el cuádruplo.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

En dicha matriz las letras ‘b’ se corresponden con ondas transmitidas del cuádruplo y las letras ‘a’ con ondas incidentes.

Donde todas ellas se relacionan a través de S_{11} , S_{12} , S_{21} y S_{22} contemplándose 2 tipos de parámetros S:

- Coeficiente de Reflexión (S_{11} , S_{22}), mide la cantidad de potencia que se refleja y sale por el mismo lugar de entrada. Siempre que se realiza un diseño se desea que sea lo menor posible.
- Coeficiente de transmisión (S_{12} , S_{21}), mide la cantidad de potencia que se transmite y sale por el terminal opuesto. Se desea que sea lo máximo posible.

Se suelen contemplar estos parámetros en Decibelios (dB).

2.2.5 Antenas de Bocina

Las antenas de bocina son otro tipo de antena de apertura. Son muy utilizadas en el rango de las microondas. Su funcionamiento consiste en propagar una señal a través de un medio (guía de onda, líneas de transmisión.) y llegado un cierto punto abocinar la superficie, para así hacer que se pueda transmitir hasta otra antena la cual actuará como antena receptora. Las antenas de bocina tienen varios usos: pueden utilizarse como elemento único para propagar una señal de un punto a otro, o como parte de un array para aumentar la directividad de esta y así concentrar más señal en su lóbulo principal. También pueden usarse como alimentador de las antenas parabólicas, consiguiendo de esta forma directividades muy altas, las cuales sería difíciles de conseguir con una antena de bocina, pues para ello tendrían que ser muy grandes.

2.2.5.1 Tipos de antenas de bocina

Las antenas de bocina pueden dividirse en 4 subcategorías:

- Antena de bocina piramidal (a)
Las antenas de bocina piramidales son un tipo de bocina rectangular, se basan en ensanchar tanto la parte horizontal (Plano H) como la vertical (Plano E), lo que permite radiar haces estrechos en ambos planos.
- Antena de bocina rectangular sectorial Plano E (b)
Las antenas de bocina sectoriales Plano E consisten en ensanchar el plano Vertical. Su error de fase óptimo es 1/4.
- Antena de bocina rectangular sectorial Plano H (c)
Las antenas de bocina sectoriales Plano H consisten en ensanchar el plano Horizontal. Su error de fase óptimo es 3/8.
- Antenas de bocina circulares (d)
Las antenas de bocina circulares tienen una alimentación circular la cual propaga el modo fundamental, el TE₁₁, extendiéndolo a la apertura.

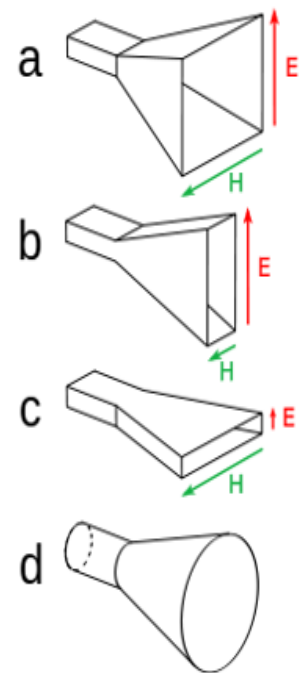


Figura 2-12: Antenas de bocina

2.2.5.2 Antena de bocina circular

Este TFG se centra en la antena de bocina circular. Los parámetros de esta antena son:

- a = Radio de entrada de la guía de onda circular.
- R_c = Distancia desde el centro de fase hasta el extremo de la apertura.
- L_c = Distancia desde el centro de fase hasta el centro de la apertura.
- γ_c = Ángulo de abocinamiento.
- A = Radio de la apertura de la antena de bocina circular.

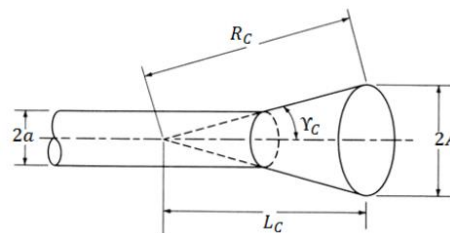


Figura 2-13: Antena de bocina circular

Conociendo varios de estos parámetros y mediante trigonometría básica se pueden calcular el resto de las incógnitas para así obtener la antena de bocina circular completa. Se alimenta la antena con el modo fundamental TE₁₁ y se propaga hasta la apertura y es ahí donde calculamos el campo radiado en función de los parámetros descritos anteriormente

La directividad de una bocina cónica de pared lisa es máxima cuando se cumple que su radio es:

$$A_{opt} = \frac{\sqrt{3\lambda_o L_c}}{2} \quad (13)$$

3 Diseño de bocinas

3.1 Bocina cónica monomodo

Diseñamos una antena de bocina monomodo centrada en 18.5 GHz y que abarque entre 17 y 20 GHz (en banda K) propagando el modo fundamental. Para ellos elegimos de radio de entrada 5.98 mm.

NOMBRE	DIMENSIÓN	VALOR (mm)
a	Radio de la guía de onda	5,78
A_{aper}	Radio de la apertura	19,9053
L_{guía}	Longitud de la guía de onda	16,2162
L_c	Longitud del abocinamiento	133,7837
L_{tot}	Longitud de la antena	150

Tabla 3: Valores de diseño

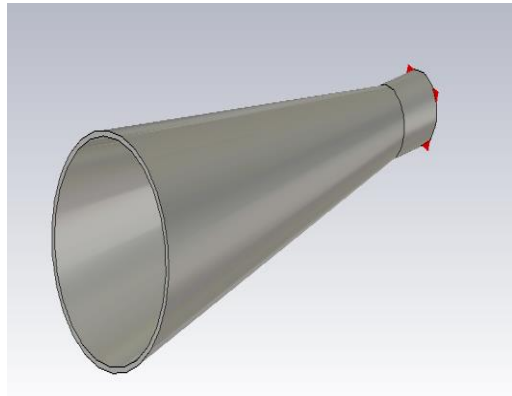


Figura 3-1: Antena de bocina monomodo Antena de apertura cónica.

Para el diseño de esta antena utilizamos el programa CST (CST Studio Suite).

Podemos observar que la reflexión es bastante buena ya que toda la banda de trabajo está por debajo de -20 dB.

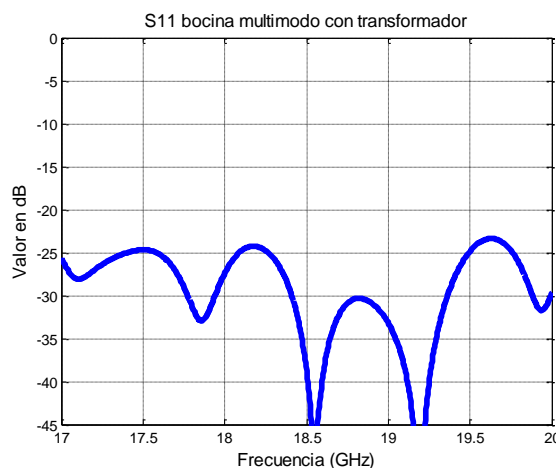


Figura 3-2: Reflexión (S₁₁) Bocina cónica monomodo.

A continuación, en el diagrama de radiación de la antena podemos observar que el plano H tiene en primer lóbulo secundario alrededor de los -30 dB mientras que el valor del primer lóbulo secundario del plano E es de -20 dB y la componente contrapolar tiene un valor inferior a -20dB.

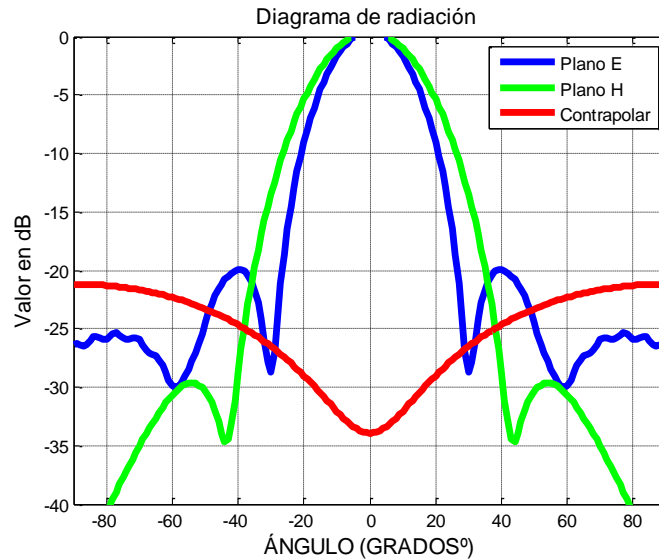


Figura 3-3: Diagrama de radiación Bocina cónica monomodo.

3.2 Bocinas multimodo

3.2.1 Motivación

Con el fin de reducir la SLL de la antena se va a trabajar en ancho de banda multimodo, es decir se va a hacer que nuestra antena propague más de un modo.

A medida que avanzan las ondas EM se encuentran con discontinuidades en la superficie, lo que hace que aparezcan modos que no se propagaban anteriormente. Con estos nuevos parámetros se propagan los modos que se deseen, sin olvidar que el objetivo es reducir la SLL.

El modo se quiere propagar es el TM_{11} . Introducir este modo hace que el campo al finalizar la guía sea uniforme, en el sentido que se propagaba anteriormente, tal y como se indica en la siguiente figura:

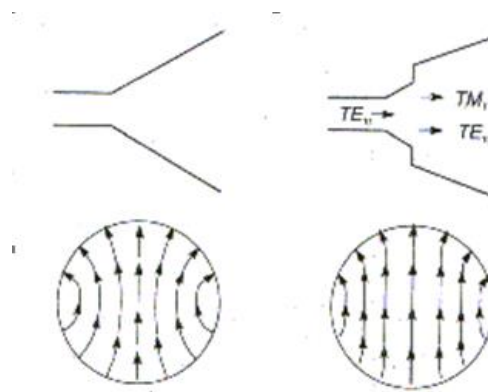
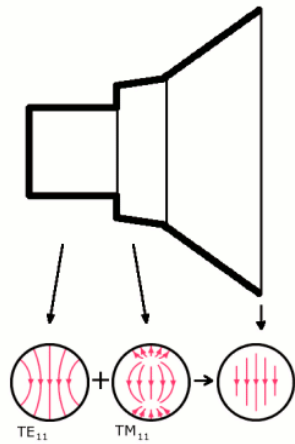


Figura 3-4: Antena de bocina: a) Monomodo b) Multimodo.

Es preferible tener la alimentación uniforme, pues permite que el nivel de los lóbulos secundarios sea menor y la señal se propague mayormente en el lóbulo principal, despreciando el resto de los ángulos de apuntamiento.

Para ver cuanto porcentaje de modo TM_{11} se va a seguir el ejemplo de la antena de bocina Potter.

3.2.2 Antena de Bocina Multimodo de Potter



La principal antena de bocina circular multimodo es la antena de bocina Potter. Esta utiliza el primer escalón para empezar a propagar el modo TM_{11} y una vez transcurrida una cierta distancia comienza a abocinar la guía, haciendo que en la apertura de la antena haya una distribución de campo parecida a la alimentación uniforme en todas las partes de la apertura.

Para comenzar a diseñar nuestra antena de bocina multimodo partimos del diseño del libro [2].

Figura 3-5: Antena de bocina Potter.

3.2.3 Diseño Antena de Bocina Multimodo

El objetivo del primer escalón es dejar el modo TM_{11} (primer modo superior) sin propagarse, es decir que se empiece a propagar a 20.1 GHz. Por lo que se calculan cuáles deben ser los valores de la nueva guía de onda:

$$r = \frac{(P_{mn} * c^2)}{(2 * \pi * f_{\text{sin_excitar_TM}})}$$

TE11 = 1.841 20GHz

Velocidad de la luz ($3 * 10^8$ m/s)

Figura 3-6: Cálculo del primer escalón.

Se calcula cual debe ser el valor máximo del radio para no tener para no propagar el modo TM_{11} , dicho valor es **9.1326** mm.

La longitud de esta parte no es tan relevante debido a que se comporta como una línea de transmisión $\lambda/2$, y no afecta a la impedancia global.

Ahora se procede a calcular el valor del siguiente radio, teniendo en cuenta que se debe introducir el campo TM_{11} , pero sin llegar a propagar el siguiente modo, el TM_{21} :

$$R2 = \frac{P_{mn(1,1)} * c}{(2 * \pi * f_{TM11})}$$

TM11 = 2.405 10.6324 GHz

Velocidad de la luz ($3 * 10^8$ m/s)

Figura 3-7: Cálculo del segundo escalón

Esto fórmula da el valor máximo que puede tener el segundo escalón sin propagar el modo TM_{21} , con un valor de **10.8** mm.

La longitud de este tramo sí que es importante ya que tiene que ser lo suficientemente larga para que se propague el modo TM_{11} y no se disipe. Tiene que ser superior a $0.608 * \lambda$, siendo λ la longitud de onda del tramo en cuestión.

Con todos estos valores solo falta la parte del abocinamiento. Se elige una longitud de abocinamiento tal que la dimensión total de la antena sea igual que la antena de bocina monomodo, debido a que el objetivo es comparar diferentes antenas de la misma longitud, pero diferentes prestaciones, y un radio de apertura suficientemente grande para que la ganancia de la antena sea buena pero procurando no tener un ángulo de abocinamiento demasiado grande. Si el radio de apertura de la antena es demasiado elevado pueden producir problemas en la fabricación mediante impresión 3D. La antena de bocina circular monomodo diseñada con el programa CST resultante quedaría:

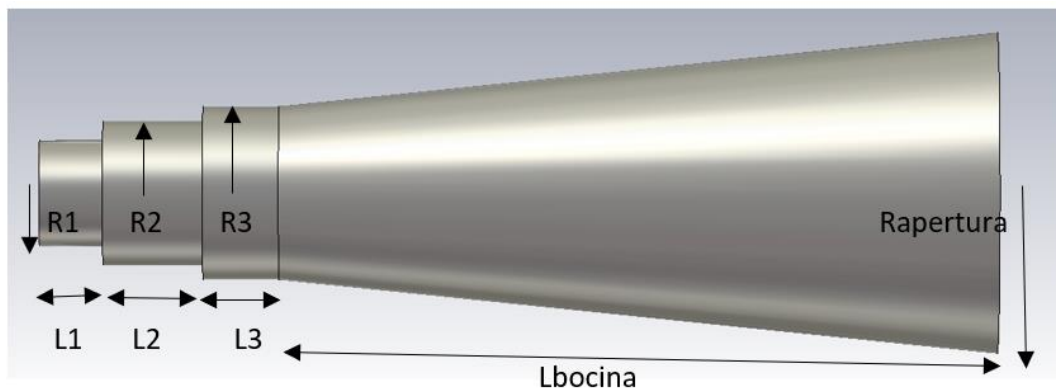


Figura 3-8: Bocina multimodo CST.

Los parámetros de diseño de los que se disponen serían:

- R_2
- L_2
- R_3
- L_3
- R_{aper}

Teniendo en cuenta que la longitud total de la antena está prefijada a 150 mm y que la entrada tiene que ser una guía de onda circular de radio 5.78 mm, se pueden variar los parámetros por separado para ver cuál es el efecto que produce en la reflexión al modificar la forma original de la antena.

3.2.4 Reflexión antena

1. Primero se va a variar el radio del primer escalón “ R_2 ”, obteniendo lo siguiente:

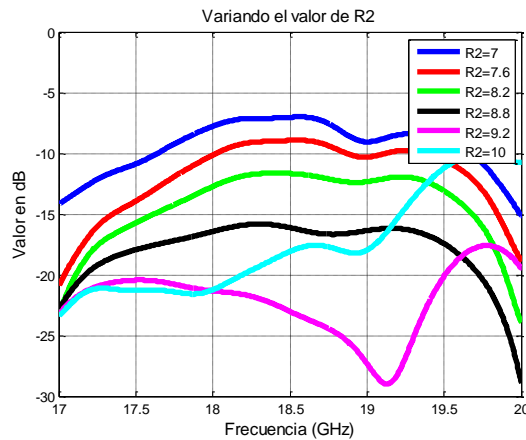


Figura 3-9: Reflexión (S_{11}) en función de ' R_2 '.

Al variar el radio del segundo tramo de la antena de bocina multimodo se puede observar que disminuye la reflexión a medida que se aumenta el valor de este radio. Por lo que se puede decir que el valor óptimo estará entre ' $R_2=8.8\text{mm}$ ' y ' $R_2 = 9.2\text{mm}$ ' ya que a partir de este último valor la reflexión a altas frecuencias comienza a empeorar, volviéndose más resonante.

El peor caso es para ' $R_2=7\text{mm}$ ' y es en el que el paso entre el primer tramo de la guía y el segundo es mínimo y no se cambia de modo.

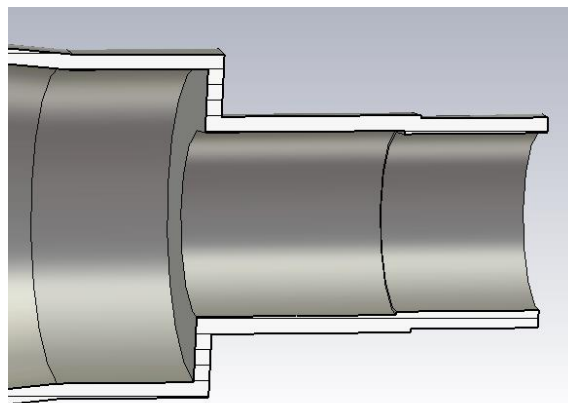


Figura 3-10: Variación ' R_2 ' Caso Extremo $R_2=7\text{ MM}$.

2. A continuación, se variará la longitud del segundo tramo “ L_2 ”, obteniendo lo siguiente:

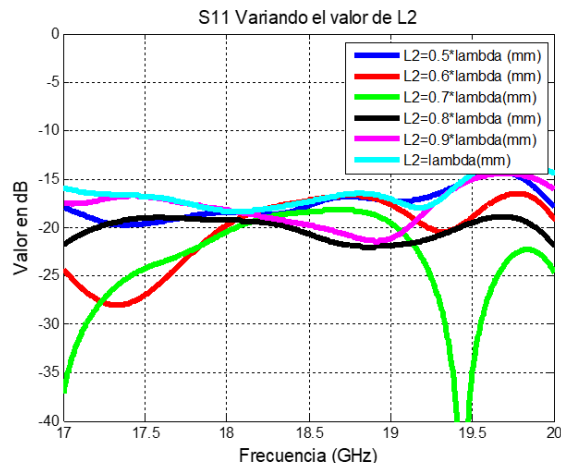


Figura 3-11: Reflexión (S_{11}) en función de la longitud ‘ L_2 ’.

Al variar la longitud del segundo tramo de guía de onda circular es posible observar que a medida que el valor de L_2 se acerca a “ $0.7*\lambda$ ”, se obtiene una muy buena respuesta, por lo que el valor óptimo tendrá un valor próximo a este.

El peor caso es cuando la longitud de este tramo tiene una longitud “ λ ”, en el que la reflexión permanece en toda la banda más o menos constante con un valor entre -13 y -16 dB.

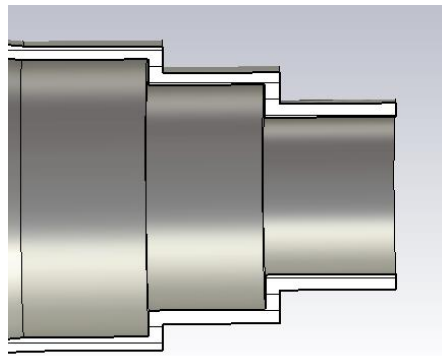


Figura 3-12: Variación R_2 Caso Extremo ‘ $L_2=0.5*\lambda$ ’ MM’.

3. A continuación, se va a variar el radio del tercer escalón ‘ R_3 ’, obteniendo lo siguiente:

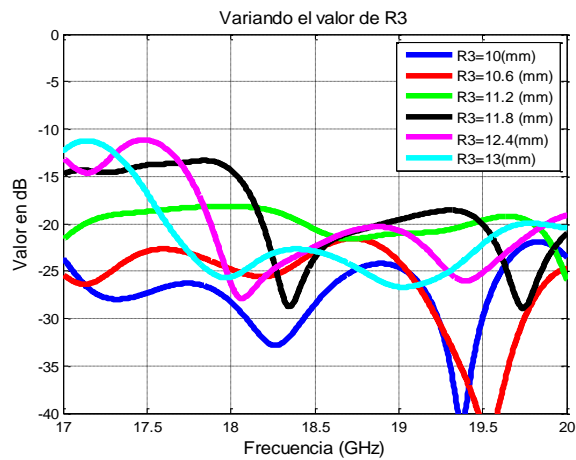


Figura 3-13: Reflexión (S_{11}) en función del tercer radio ‘ R_3 ’.

Se obtiene una muy buena reflexión cuando el radio de la guía de onda circular esta entre 10 y 11.2 mm.

Los peores casos se dan cuando el valor de dicho radio sobrepasa los 12 mm de amplitud ya que se acerca a los -10 dB.

4. A continuación, se varía la longitud de la guía de onda del tercer tramo ‘L₃’, obteniendo:

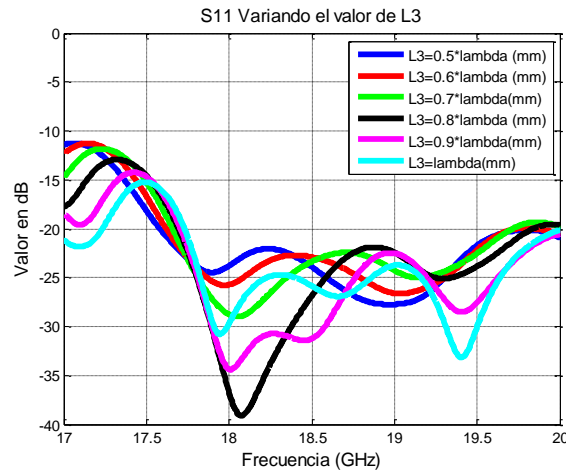


Figura 3-14: Reflexión (S₁₁) en función de la longitud ‘L₃’.

A medida que se aumenta la longitud de este tramo de la antena va mejorando la respuesta en toda la banda de frecuencias, pero a partir de “ $0.8*\lambda$ ”, comienza a empeorar a frecuencias intermedias, por lo que el valor óptimo de reflexión estará entre “ $0.8*\lambda$ ” y “ $0.9*\lambda$ ”.

5. El radio de apertura de la antena viene dado por el ángulo de la apertura y la longitud de abocinamiento (esta la tenemos fija ya que tenemos de longitud total 150mm). En el diseño de Potter, el ángulo óptimo es 6.5° , por lo que se tomará ese valor como referencia y se irá variándolo para ver en qué modo afecta a la antena.

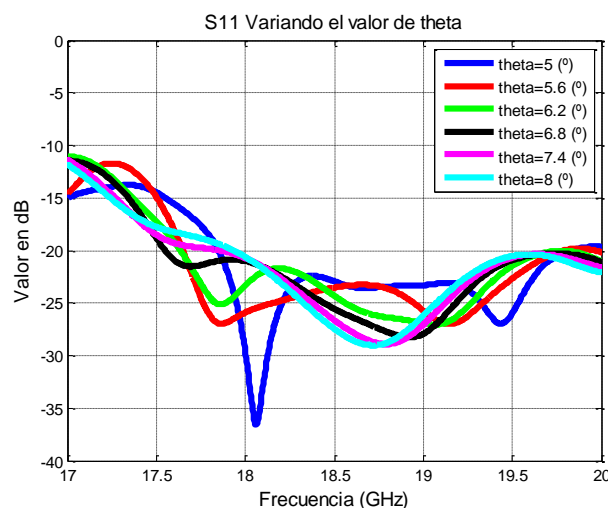


Figura 3-15: Reflexión (S₁₁) en función del ángulo de apertura ‘THETA’.

El valor óptimo del radio de Apertura de la antena de bocina multimodo vendrá dado por el ángulo de apertura, el cual estará comprendido entre 5° y 6.2° .

PARÁMETRO	DIMENSIÓN	VALOR (mm)
R_1	Radio de la guía de onda de entrada	5,98
L_1	Longitud del primer tramo de guía de onda	8,1081
R_2	Radio del segundo tramo	9,136
L_2	Longitud del segundo tramo	14,5945
R_3	Radio del tercer tramo	11
L_3	Longitud del tercer tramo	9,8864
R_{aper}	Radio de la apertura de la antena	21,1954

Tabla 4: Valores de la antena de bocina multimodo.

Esto con respecto a la reflexión de la antena, pero hay que tener en cuenta que lo que interesa es que la SLL de las componentes copolar y contrapolar de los planos E y H sean parecidas y estén todas por debajo de -30 dB, lo que hará que los valores calculados anteriormente se modifiquen y se alejen de su valor óptimo.

El objetivo es que la antena sea lo más directiva posible, es decir radie lo máximo posible en el lóbulo principal y pierda lo menos posible radiando en los lóbulos secundarios. Por eso ahora centramos en ver cómo afecta la variación descrita con anterioridad a los “*Farfields*” de la antena.

El diagrama de radiación de una antena de bocina es de tipo directivo, tal y como se indica en [Figura 3.4.1: c)]. Como se ha mencionado anteriormente, se quiere que la mayor parte de la señal la propague el lóbulo principal.

El mejor resultado que hemos hallado variando los parámetros de diseño, teniendo en cuenta una serie de restricciones comunes $R_{aper} > R_3 > R_2 > R_1$ es:

- Diagrama de radiación

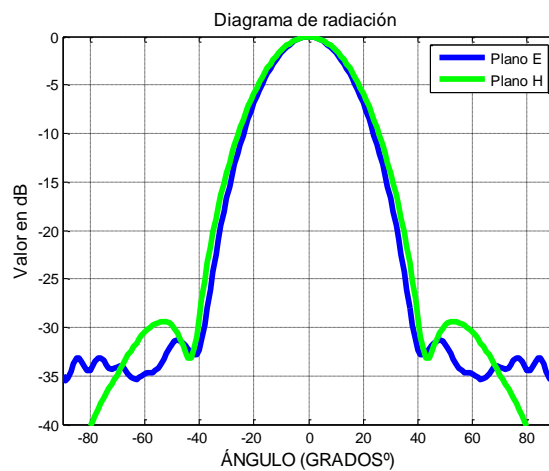


Figura 3-16: Diagrama de radiación antena de bocina multimodo teórico normalizado.

- Reflexión

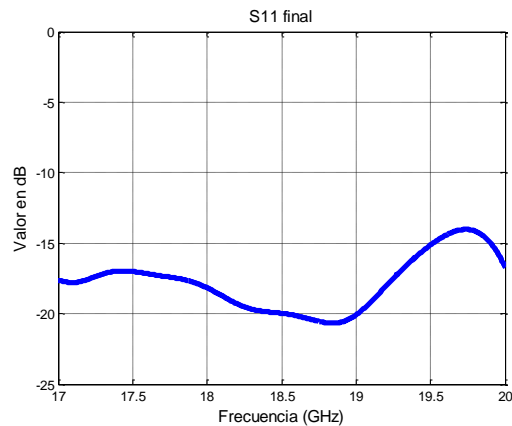


Figura 3-17: Reflexión (S_{11}) con los valores de la tabla [4]

Con respecto a la radiación de la antena vemos que el resultado es bastante bueno, ya que hemos reducido la SLL del plano E considerablemente, y el nivel de los lóbulos secundarios se sitúa en ambos casos por debajo de -28 dB. Con respecto a la reflexión (S_{11}) el resultado ha empeorado manteniéndose por debajo de -14 dB en toda la banda de trabajo.

3.2.5 Optimizador

Llegados a este punto y teniendo en mente que se quiere obtener una bocina de unas buenas prestaciones se pasa el optimizador para que dé los mejores valores de cada parámetro de diseño. Poniendo como requerimientos que la reflexión de toda la banda sea inferior a -19 dB y que la SLL de ambos planos y la componente contrapolar sea inferior a -30 dB.

El resultado que se obtiene es que la reflexión de la antena en toda la banda de trabajo está por debajo de los -19.4 dB.

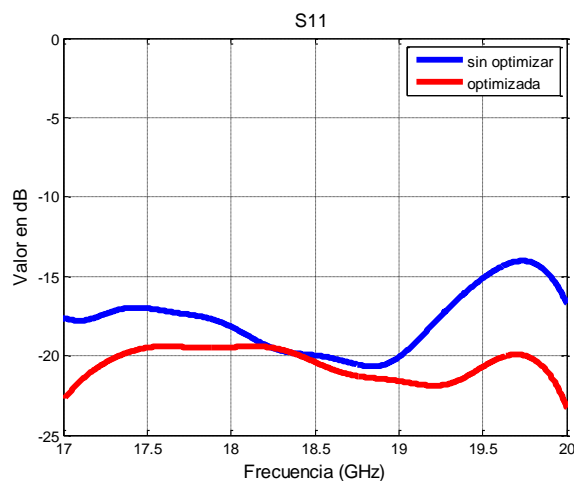


Figura 3-18: Reflexión (S_{11}) Bocina cónica multimodo optimizada.

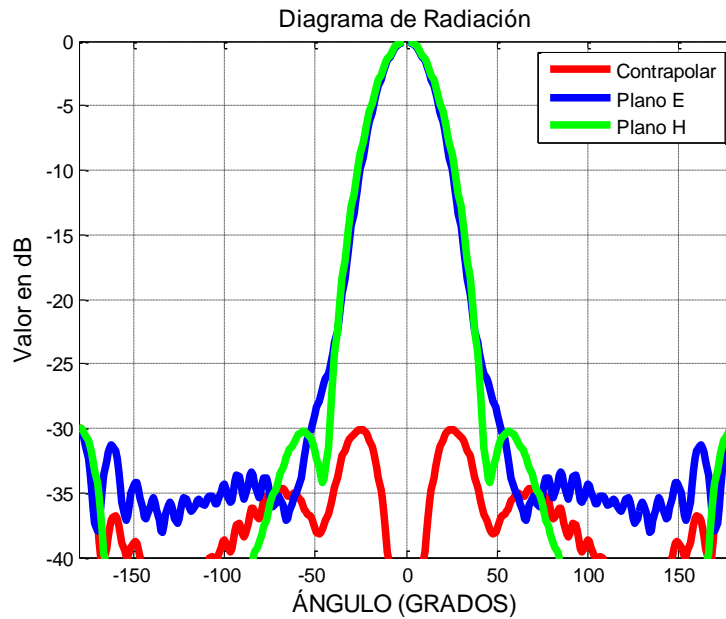


Figura 3-19: Diagrama de Radiación de la Bocina cónica multimodo optimizada.

Respecto a la SLL se puede observar que se ha reducido un poco con respecto al resultado anterior y la contrapolar tiene un nivel bastante bajo por lo que se obtiene un buen resultado, y la reflexión de la antenna ha mejorado manteniéndose en toda la banda de trabajo por debajo de -19 dB. Lo que equivale a perder 12.6 mW cuando entra 1 W.

PARÁMETRO	VALOR			
	VALOR (mm)	OPTIMIZADO	DIFERENCIA	PORCENTAJE
R ₁	5,98	5,98	0,00	0,000%
L ₁	8,11	8,11	0,00	0,000%
R ₂	9,14	9,19	0,05	0,557%
L ₂	14,59	12,73	-1,86	14,623%
R ₃	11,00	11,09	0,09	0,794%
L ₃	9,89	9,66	-0,23	2,363%
R _{aper}	21,1954	20,4715	-0,72	3,536%

Tabla 5: Valores optimizados de la antenna de bocina multimodo.

Como se puede observar los valores que devuelve el optimizador son muy parecidos a los calculados previamente, pero los resultados gráficos con estos valores han mejorado sustancialmente. Con estos valores se obtiene una directividad similar a la antenna de bocina circular monomodo pero unos diagramas de radiación mucho mejores, con unos lóbulos secundarios inferiores en ambos planos.

4 Fabricación mediante impresión 3D

4.1 Transformador.

Al no disponer de un conector de las dimensiones de nuestra guía de onda, es decir de un conector coaxial circular de radio 5.78 mm, es necesario diseñar uno e imprimirlo con la impresora 3D para así poder añadir con el conector del que sí se dispone a las antenas ya diseñadas. Para ellos se utilizará el programa de diseño CST, utilizado anteriormente.

La idea básica es convertir la entrada de una guía de onda rectangular WR51 a una guía de onda circular de radio 5.78mm. Es conveniente que el transformador tenga una buena adaptación para que no afecte en exceso a la eficiencia de la antena. El mejor resultado que obtenemos es el siguiente:

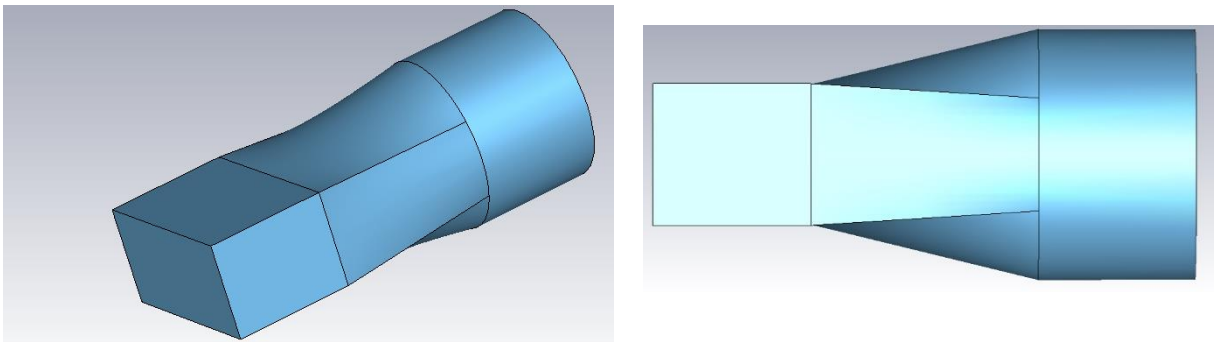


Figura 4-1: Transformador rectangular a circular.

El coeficiente de reflexión que obtenemos está por debajo de -20 dB en toda nuestra banda de trabajo y tiene un mínimo de -58 dB en nuestra frecuencia central.

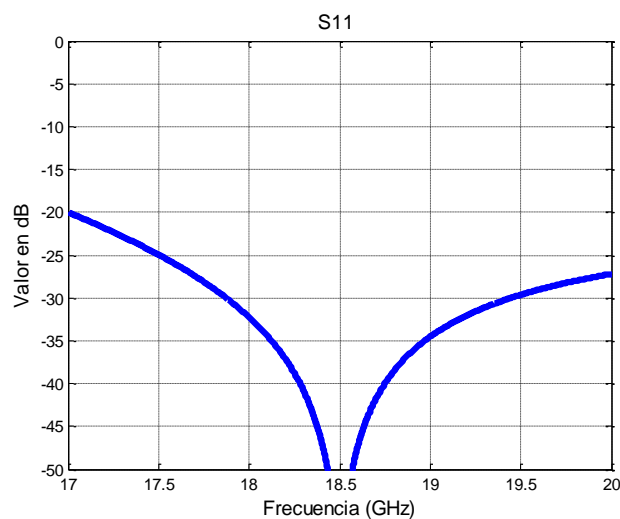


Figura 4-2: Reflexión (S_{11}) del transformador.

4.2 Flange

Para una correcta sujeción de la antena y que no se obtengan datos erróneos en la medida de esta es necesario diseñar un *flange* rectangular WR51 para que la sujeción sea correcta. Lo diseñaremos con el mismo programa, el CST.

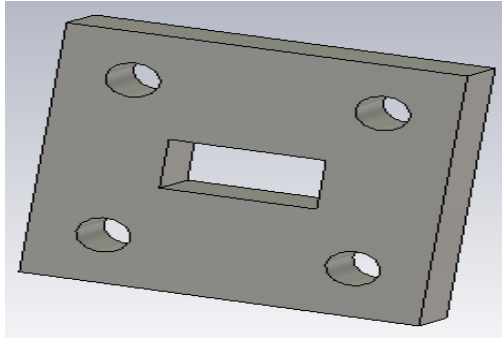


Figura 4-3: Flange WR51.

Para que este diseño no afecte a nuestra antena el tramo de guía de onda que introducimos al añadir el *flange*, lo eliminamos del tramo de guía de onda de la parte rectangular del transformador. De este modo ni la longitud total de la antena ni sus antiguos resultados teóricos se modifican.

4.3 Antena completa

A continuación, añadimos el transformador y el *flange* a nuestras antenas y las simulamos para observar su comportamiento final.

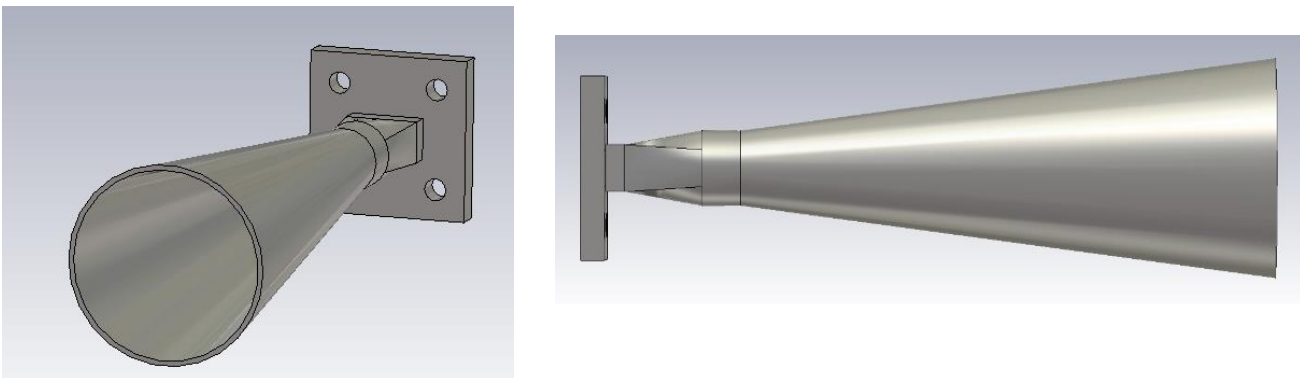


Figura 4-4: Antena de bocina monomodo completa.

Al añadir elementos no ideales que poseen una eficiencia < 1 esperamos que el coeficiente de reflexión de la antena disminuya. La forma que tiene sigue siendo muy parecida a la que tenía antes de introducir el transformador y el *flange*, aunque ahora ha empeorado. Pero observamos que no disminuye en exceso.

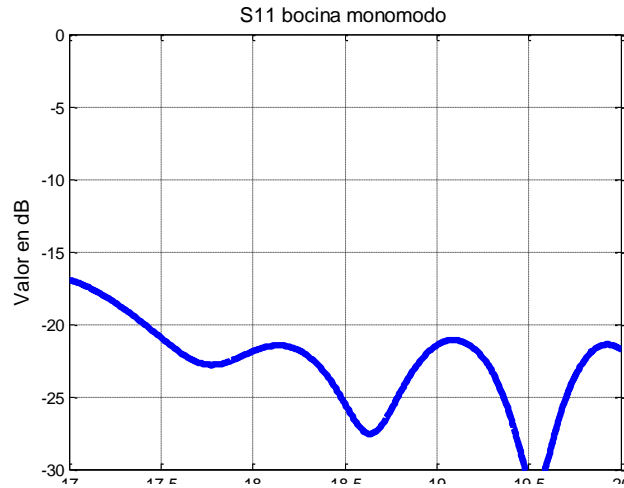


Figura 4-5: Reflexión (S_{11}) de la antena de bocina monomodo

Esta reflexión es asumible ya que no se refleja gran cantidad de señal, transmitiéndose casi toda la onda hasta la apertura de la antena.

Se hace lo mismo para la antena de bocina multimodo y recubrimos por fuera con un cilindro la parte no abocinada, de esta forma la impresora 3D tarda menos y gasta menos recursos al tener que dar menos vueltas. El resultado es el siguiente:

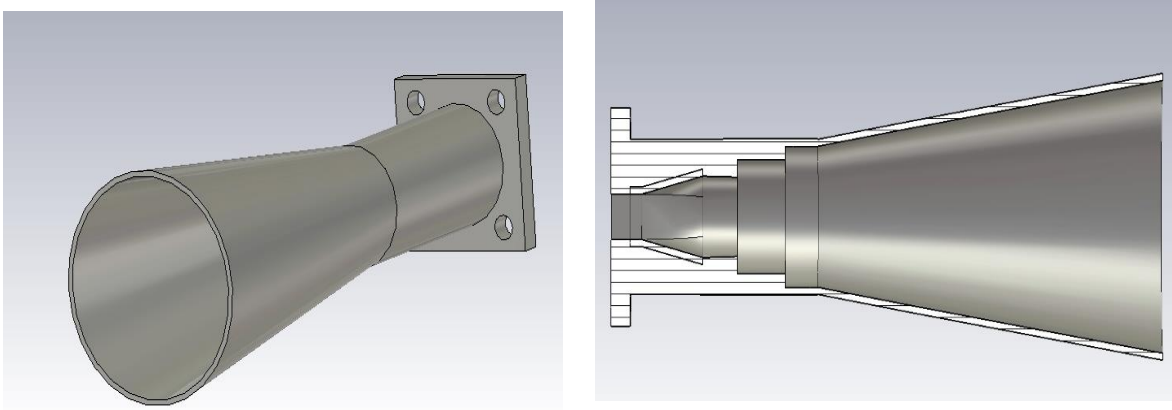


Figura 4-6: Antena de bocina multimodo completa a) exterior b) interior.

Tal y como se esperaba la reflexión de la antena aumenta al introducir el transformador, pasando de -19.5 dB en toda la banda de trabajo a 15 dB, es decir empeora, pero no drásticamente.

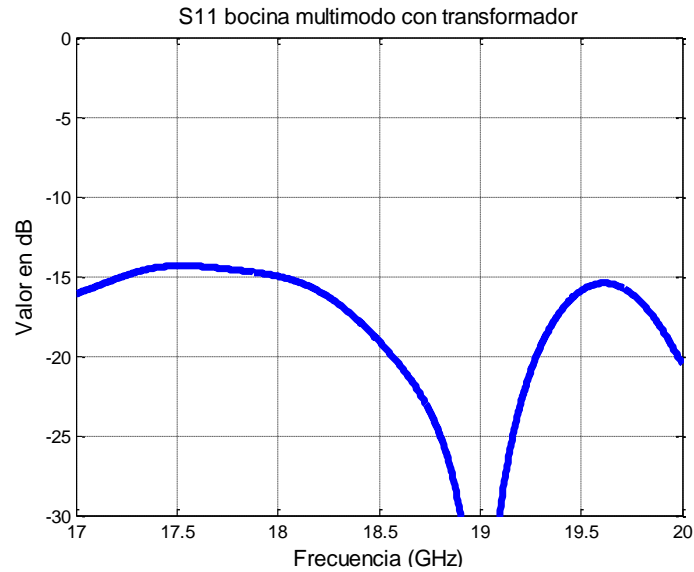


Figura 4-7: Reflexión (S_{11}) de la antena de bocina multimodo completa.

Al igual que con la antena de bocina circular la reflexión (S_{11}) varía, pero sigue siendo una reflexión aceptable, que además presenta una reflexión casi nula a 19 GHz.

4.4 Fabricación de la antena

Para fabricar las antenas se hará uso del software CURA (ANEXO 1), al que se pasa el diseño de la antena que exportamos del CST y es el que utiliza la impresora 3D para imprimir los diseños teóricos.



Figura 4-8: Impresora 3D.

Una vez obtenida la forma de la antena del material elegido, es necesario limarla para eliminar las asperezas y dejar la antena lo más lisa posible para que haya la menor reflexión posible por factores de relieve en el interior de la antena.

Posteriormente se pintará con pintura metalizada lo que le dotará a la antena de propiedades Electromagnéticas. Cuanto mejor esté pintada menos campo atravesará la pintura y se perderá, obteniéndose una mejor radiación de la señal. La antena resultante tras realizar estas acciones es la siguiente:



Figura 4-9: Antena de Bocina Circular monomodo final.

Debido a problemas técnicos, no se ha podido fabricar la antena de bocina multimodo y solo se ha podido fabricar la antena de bocina monomodo. Se procede a medir la radiación de la antena de bocina construida.

4.5 Resultados experimentales

4.5.1 Reflexión (S_{11})

Una vez terminada de pintar la antena de bocina circular y comprobar que todo este correcto, se medirá en la cámara anecoica (ANEXO B) para ver si la radiación de la antena resulta como era esperable, es decir, si se asemeja a sus resultados teóricos.

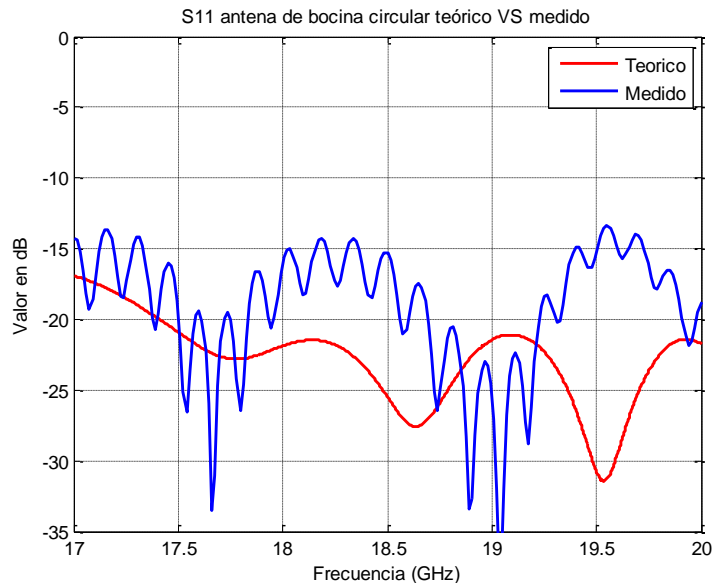


Figura 4-10: Reflexión (S_{11}) de la Antena con material absorbente.

Se puede observar que la forma de las medidas teóricas y reales son similares. La medida real tiene más oscilaciones debido a que el número de puntos utilizados es mayor y a que aparecen pérdidas por diversos factores.

En rojo podemos observar que toda la reflexión (S_{11}) permanece por debajo de los -15 dB y presenta un mínimo en 19.5 GHz.

En azul por el contrario sobrepasa en algunas frecuencias los -15 dB, pero aparecen 2 mínimos uno local en 17.6 GHz y un mínimo global en 19 GHz.

Un Valor de reflexión de -15 dB equivale a una pérdida de potencia de 31.6 mW si la entrada es de 1 Watio, por lo que es bastante asumible.

4.5.2 Diagrama de radiación de la antena

Se miden las componentes copolar y contrapolar de la antena a 3 frecuencias:

- Frecuencia inferior (17 GHz).
- Frecuencia central (18.5 GHz).
- Frecuencia superior (20 GHz).

A continuación, se va a realizar una comparativa entre simulación y medida. Para realizar esta comparación medimos los diferentes planos E y H de la antena a las diferentes frecuencias.

Frecuencia inferior

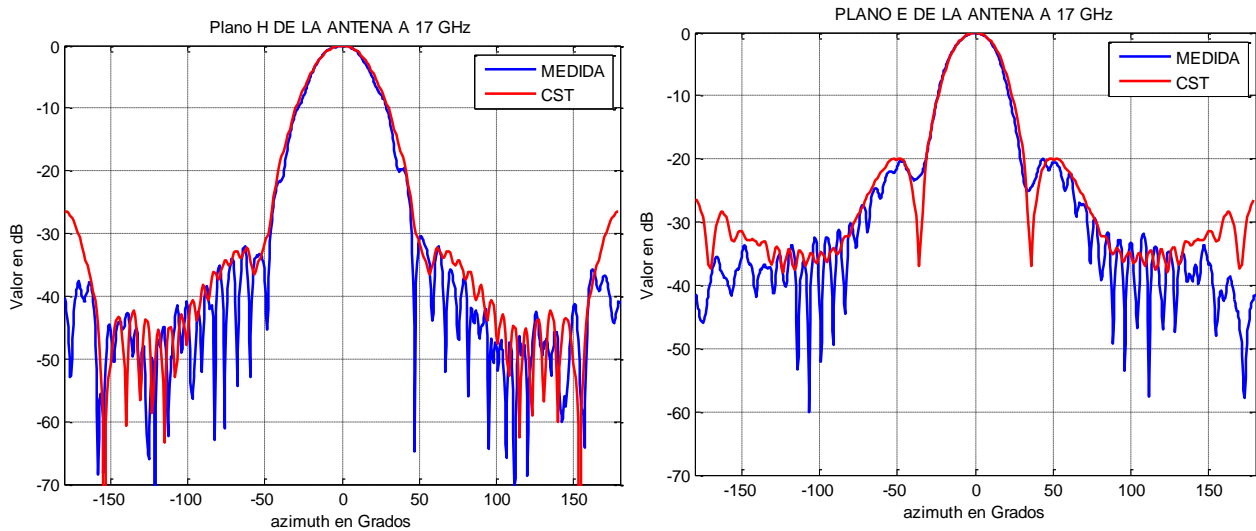


Figura 4-11: Diagramas de Radiación a 17 GHz: a) Plano H b) Plano E

El plano H, presenta un lóbulo principal bastante diferenciado y la SLL (Side Lobe Level) es inferior a los -30 dB tanto en la simulación CST como en la medida real.

En el plano E el lóbulo principal es más estrecho y el nivel del primer lóbulo secundario tiene un valor mayor.

Se puede apreciar que en ambos planos la medida real y la simulación teórica son bastante parecidas, sobre todo por la forma, y que los valores inferiores a -40 dB son casi despreciables.

Frecuencia central

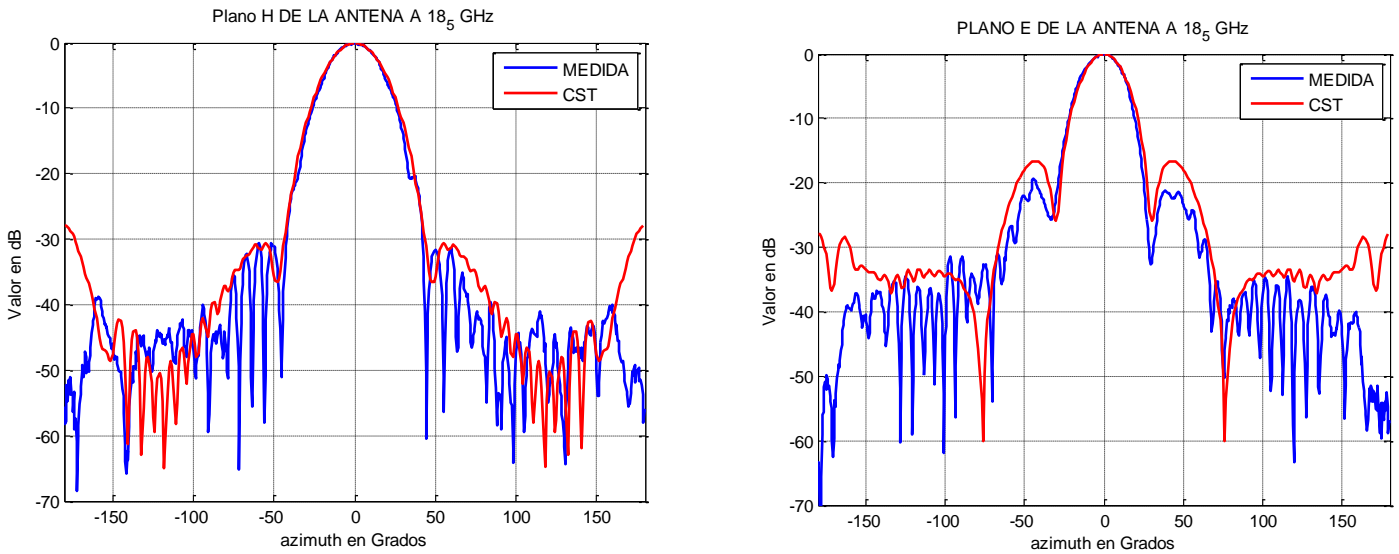


Figura 4-12: Diagramas de radiación a 18.5 GHz: a) Plano H b) Plano E.

El aspecto en ambas es muy parecido, pero en el Plano E a 18.5 GHz la medida real comienza a no ser tan parecida a la simulación, esto se puede deber a diferentes factores: pérdidas de la pintura metalizada, pérdidas en los cables, superficie con imperfecciones que hace que se pueda reflejar señal....

Frecuencia superior

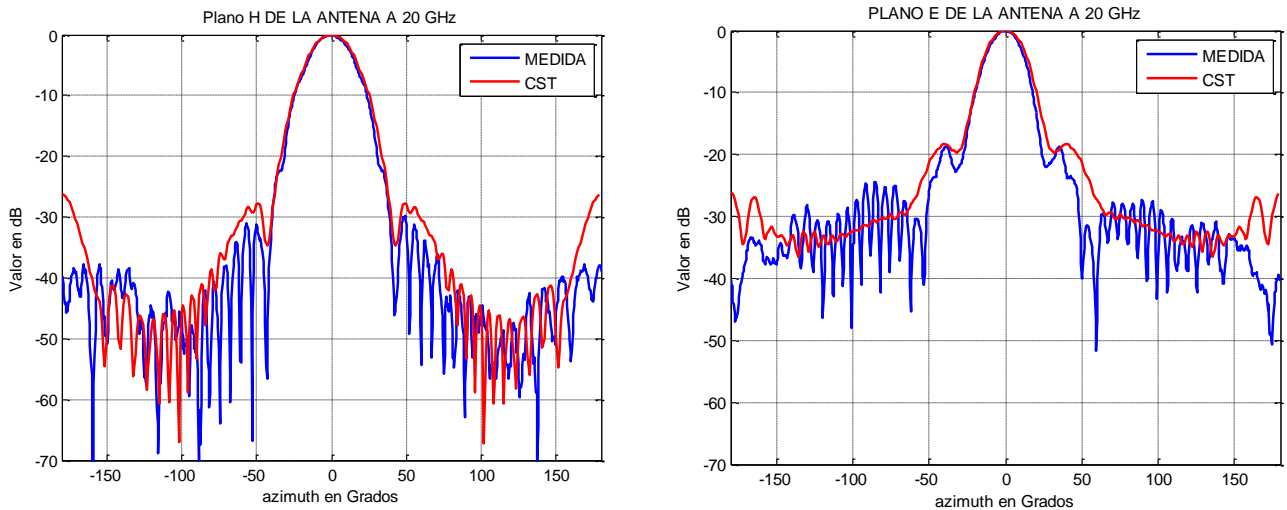


Figura 4-13: Diagramas de radiación a 20 GHz: a) Plano H b) Plano E.

A frecuencias más altas empieza a alejarse el comportamiento medido del simulado, debido a que a altas frecuencias los materiales son más susceptibles a fallar y dar resultados erróneos.

4.5.3 Ganancia obtenida

Al medir la radiación de la antena con respecto a la antena de referencia, se puede sacar la ganancia real que presenta la antena diseñada.

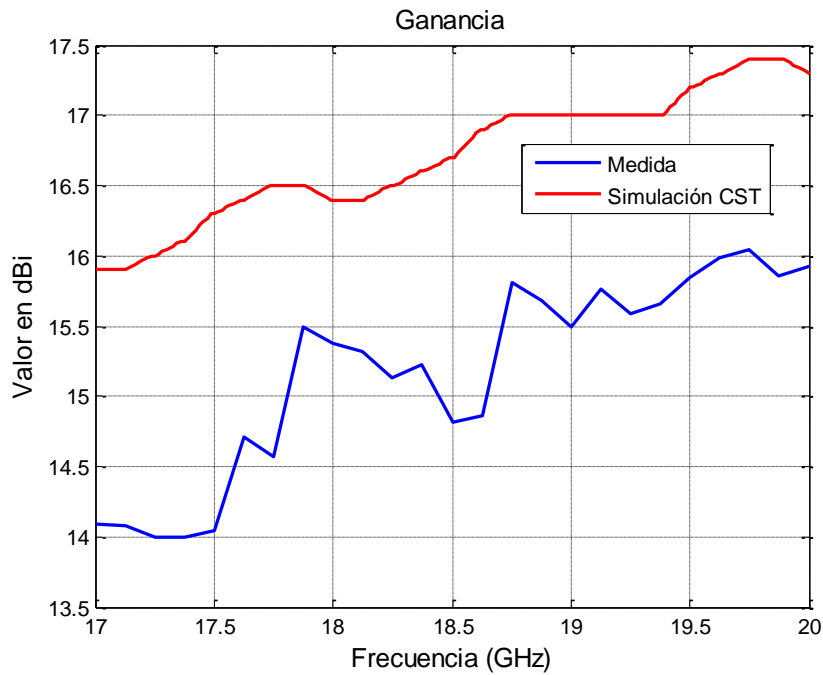


Figura 4-14: Ganancia real de la antena de bocina circular.

Se puede observar que la ganancia medida es inferior a la simulada con el CST, que está entre 16 y 17 dBi. Esto se debe a que los materiales no son perfectos y presentan pérdidas, principalmente la pintura metalizada, que actúa como conductor, pero no es perfecta por lo que se disipa potencia a través de esta, reduciendo la ganancia total.

5. Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

En este TFG se han diseñado diferentes antenas de bocina circulares monomodo y multimodo y su correspondiente diagrama de radiación a diferentes frecuencias entre 17 GHz y 20 GHz, ambas de la misma longitud total. Se ha construido una antena de bocina circular monomodo y se ha comparado con sus simulaciones en CST. Por problemas técnicos no se ha podido construir la antena de bocina multimodo.

El diagrama de radiación medido comparado con el diagrama de radiación simulado en CST es bastante parecido a frecuencias cercanas a la frecuencia central, y a frecuencias altas comienza a alejarse de la simulación debido a la imperfección de los materiales y a la potencia disipada por el conductor. También se puede observar que hay una caída de ganancia en la antena medida con respecto a la antena simulada en CST por el mismo motivo mencionado anteriormente.

Se puede decir que la bocina multimodo ofrece una radiación mucho más directiva con un nivel de SLL bastante mejor que la bocina circular monomodo para el Plano E. En cuanto a la reflexión (S11), en la bocina multimodo empeora con respecto a la bocina monomodo, pero en conjunto es mejor la bocina multimodo ya que radia la mayor parte de la señal en el lóbulo principal.

5.2 Trabajo futuro

Debido al tiempo limitado en la realización de este trabajo, algunos aspectos no han podido ser cubiertos o desarrollados con la precisión requerida. Sería interesante diseñar otros tipos de antenas de bocinas circulares y compararlas entre sí, para observar los diferentes diagramas de radiación y la reflexión de cada una. Por ejemplo, bocina *Spline* o antenas de bocinas corrugada.

Se podría diseñar un transformador con un mejor nivel de adaptación entre la guía de onda circular y la guía de onda rectangular a la que se conectará el *flange* que se utilice.

También se podría hacer una comparación entre diferentes tipos de antenas de bocina, circular con piramidal, circular con sectoriales...

Referencias

- [1] **David M. Pozar**, Microwave Engineering. John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [2] **José Luis Masa Campos**, Antenas y Compatibilidad Electromagnética. Asignatura de Grado, en el cuarto año, impartida en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.
- [3] **A. David Olver, P. J. B. Clarricoats, A. A. Kishk**, Microwave Horns and Feeds
- [4] https://es.wikipedia.org/wiki/Antena#Antenas_de_apertura
- [5] **Luis Rubio Mejía**, Diseño de antenas de bocina sobre SIW, Proyecto de fin de carrera 2014.
- [6] **Lucas Polo López**, Análisis y diseño de bocinas con perfiles arbitrarios mediante análisis modal, Trabajo de Fin de grado 2014.
- [7] **Jorge Alfonso Ruiz Cruz, José Luis Masa Campos**, Medios de transmisión Asignatura de Grado, en el tercer año, impartida en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.
- [8] **Constantine A. Balanis**, Antenna Theory: Analysis and Design.
- [9] **Bessel functions**, <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/besselj.html>

Glosario

API	Application Programming Interface
RFCAS	Radiofrequency Circuits, Antennas and Systems
CST	Computer simulation technology
RF	Radiofrecuencia
TFG	Trabajo de Fin de Grado
SLL	Side Lobe level
ITU	International Telecommunication Union

Anexos

A Herramientas de diseño y simulación.

A.I Matlab

Matlab es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado, con un lenguaje de programación propio (M). También se utiliza para graficar resultados con una mayor resolución. Ofrece soporte tanto para operaciones básicas como complejas -del tipo integrales o sumatorios- así como para representaciones de diferentes funciones.

En este TFG se han realizado varios ficheros en este programa para observar el comportamiento de los diferentes modos que se propagan en función de la frecuencia y el radio de entrada de la guía de onda circular.

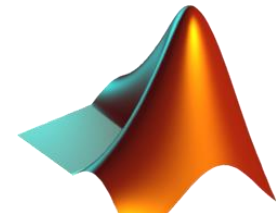


Figura 0-1: Logo Matlab

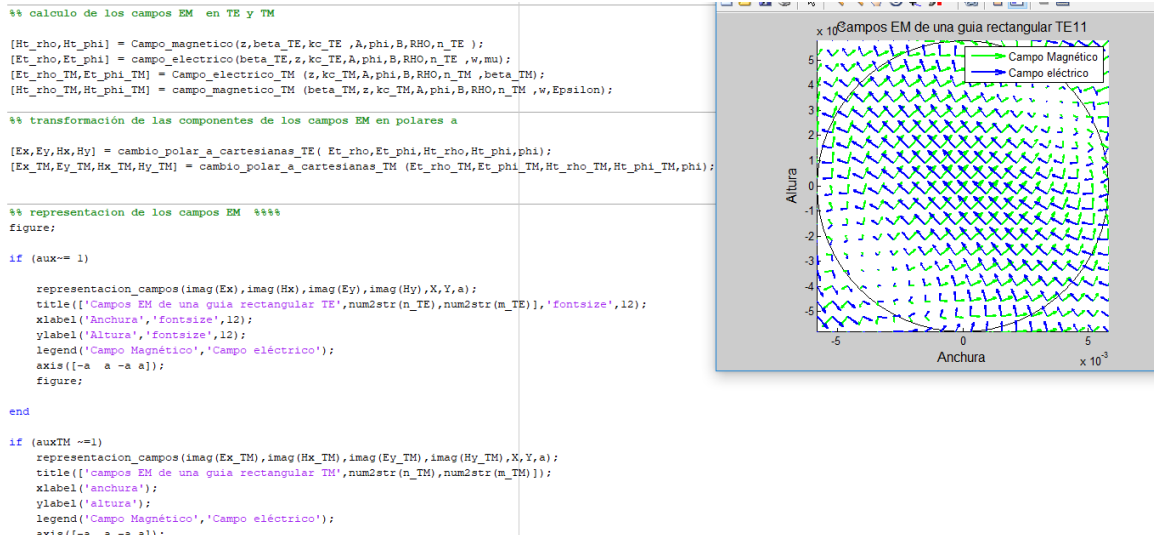


Figura 0-2: Ejemplo código en lenguaje Matlab

A.II CST Microwave Studio

CST Microwave Studio es una herramienta de simulación electromagnética en 2D/3D, en la que se ha basado gran parte de este TFG. Este programa ofrece un análisis muy preciso de cómo se comporta un componente en la realidad. Se pueden medir multitud de elementos tales como antenas, filtros, resonadores, guías de onda...

CST posee diferentes modos de simulación: barridos en frecuencia o tiempo, así como una herramienta para facilitar el trabajo: un potente optimizador, que reduce el tiempo de trabajo consiguiendo unos resultados óptimos.



Figura 0-3: Logo CST

En este TFG todas las simulaciones se han realizado con este programa.

Para ello, además de las herramientas necesarias de diseño, cuenta con una interfaz de trabajo agradable e intuitiva y múltiples opciones para mostrar los resultados.

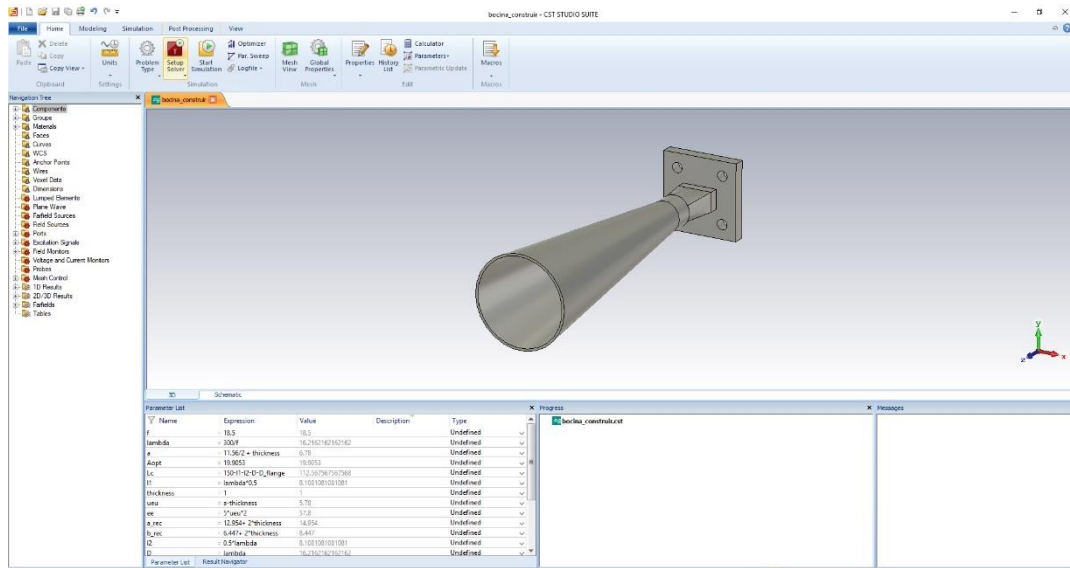


Figura 0-5: Entorno de trabajo CST

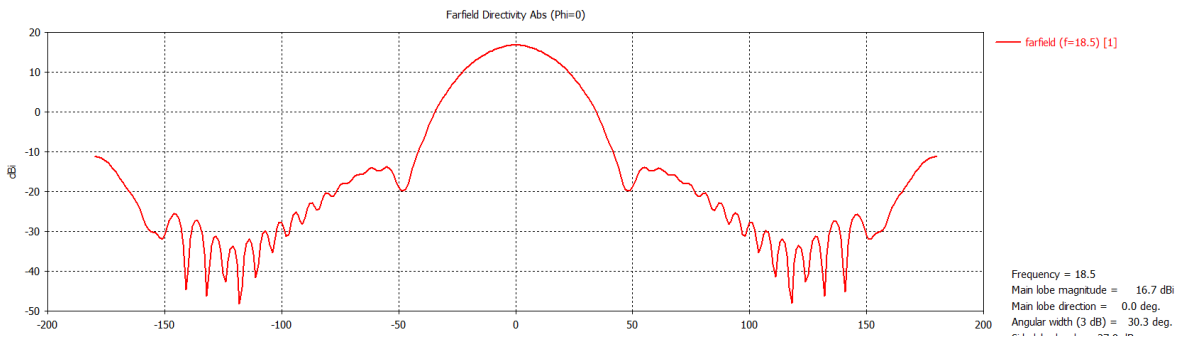


Figura 0-4: Diagrama de radiación 2D en CST

También está la opción de ver las simulaciones en 3D:

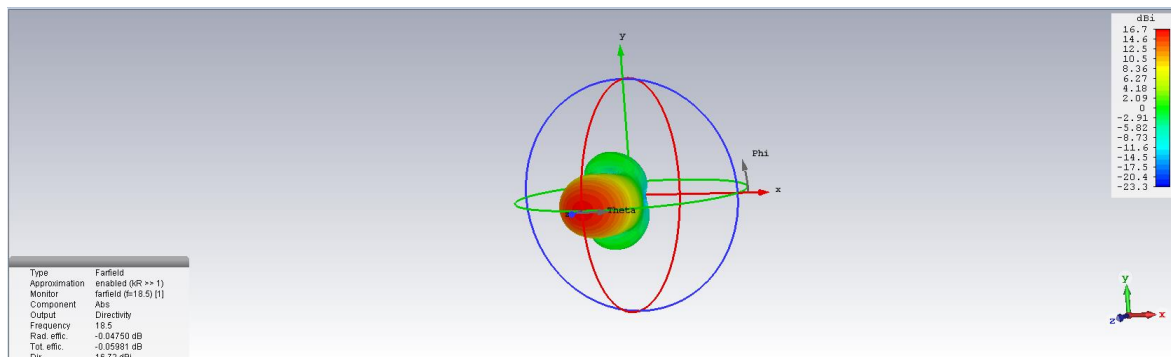


Figura 0-6: Diagrama de radiación 3D en CST

A.III Cura Ultimaker

CURA ULTIMAKER es un software que se utiliza en las impresoras 3D, es un programa gratuito, posee más de 300 diferentes configuraciones para que el resultado de la impresión sea lo más parecido al diseño teórico. Se puede imprimir archivos con formatos STL, OBJ, X3D, 3MF.



Figura 0-7: Logo Cura Ultimaker.

Su funcionamiento es bastante sencillo: se coloca el objeto que se desea imprimir en la bandeja de referencia, se eligen las características de impresión, junto con el material y se ordena imprimir.

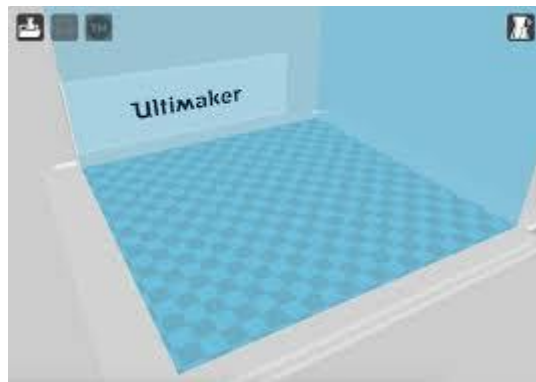


Figura 0-8: Espacio Impresión.

Este es el software que se ha utilizado para la impresión de la antena de bocina cónica monomodo:



Figura 0-9: Antena de bocina cónica monomodo.

B Proceso Fabricación Antena de Bocina

En este anexo se mencionarán los pasos seguidos para la fabricación de la antena.

1. Se exporta el fichero desde CST [anexo A.II] con formato STL.
2. Se abre el programa que se utilizará para la impresión 3D, en este caso será el CURA Ultimaker [Anexo A.III], y se eligen los parámetros de impresión deseados, velocidad de fabricación lenta, para una mejor calidad, line count = 20...
3. Se guarda en un pendrive el fichero que exportamos desde CURA Ultimaker.
4. En la impresora 3D se decide el material con el que se va a fabricar la antena, teniendo en cuenta que el mejor material es bastante tóxico, y el peor no es nocivo durante la fabricación.
5. Una vez fabricada la antena está llena de impurezas, por lo que es necesario limarla en abundancia para dejar las menores reflexiones posibles, ya que esto afectará negativamente a la radiación de la antena.
6. Posteriormente se pintará con una pintura metalizada especial, la cual le otorga a la antena sus propiedades electromagnéticas.

C Cámara anecoica

Para realizar las medidas de la antena se utiliza la cámara anecoica del grupo de RFCAS ubicada en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). La frecuencia máxima que puede medir viene dada por el analizador de redes que utiliza, el cual puede medir hasta 20 GHz.

La cámara anecoica se utiliza para poder medir elementos radiantes en un espacio lo más parecido al espacio libre y sin interferencias, para ello se rodea el habitáculo de un material absorbente de forma piramidal.

C.I Funcionamiento



Figura 0-10: CÁMARA ANECOICA RFCAS EPS UAM.

El funcionamiento de la cámara anecoica se basa en la jaula de Faraday, la cual es una estructura completamente apantallada en la que se consigue que los campos incidentes se atenúen, ya que son absorbidos por el material ubicado en las paredes de esta. Este material hace que los campos incidentes no reboten en las paredes, sino que se atenúen. Este material está compuesto de espuma de poliuretano cargada con partículas de carbón, con una geometría piramidal para realizar una buena transición con el aire

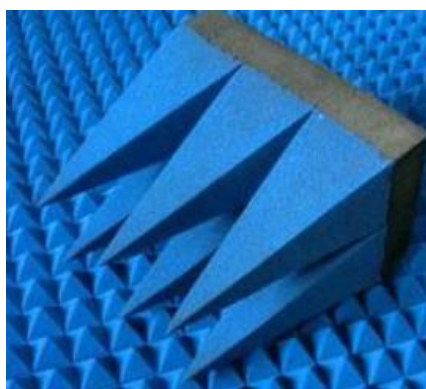


Figura 0-11: MATERIAL ABSORBENTE DE LA CÁMARA ANECOICA.

C.II Equipamiento

C.II.1 Analizador de redes

El analizador de redes es una herramienta que permite analizar en profundidad las propiedades de las redes eléctricas y obtener la respuesta de las señales eléctricas en reflexión y transmisión, es decir, los parámetros S.



Figura 0-12: ANALIZADOR DE REDES.

C.II.2 Kit de calibración

Para obtener las medidas más precisas posibles es necesario realizar una calibración en la banda de frecuencia que deseamos medir. Para ellos debemos eliminar las posibles imprecisiones introducidas por cables, conectores...

Para hacer esto posible es necesario realizar una calibración previa a la medición y así reducir el número de posibles errores de medición.

En el kit que usaremos hay 4 posibles terminaciones:

1. OPEN -> Se corresponde con red abierta.
2. SHORT -> Se corresponde con cortocircuito.
3. BROADBAND LOAD -> Se corresponde con una red con carga.
4. THRU -> Se corresponde con red conectada.



Figura 0-13: Kit de calibración WR51.

C.II.3 Antena de referencia

En el laboratorio hay varias antenas disponibles en función de la banda de frecuencias en las que se trabaje. En este caso trabajaremos entre 17 y 20 GHz, por lo que la antena que utilizaremos será una antena de bocina piramidal que trabaje entre esas frecuencias.

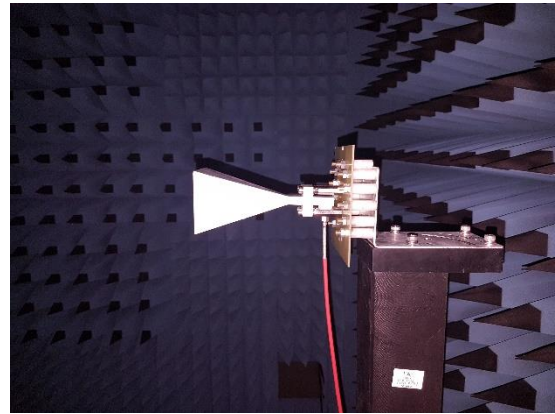
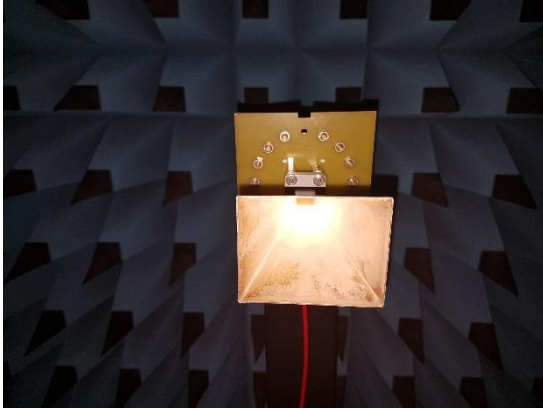


Figura 0-14: Antena de referencia.

C.II.4 Software de medida

El software utilizado es *Antenna Measurement Studio (DAMS)*. Se encarga de hacer girar la plataforma sobre la que está situada la antena para así obtener el diagrama de radiación en todos los ángulos. También utiliza el analizador de redes para realizar estas medidas.

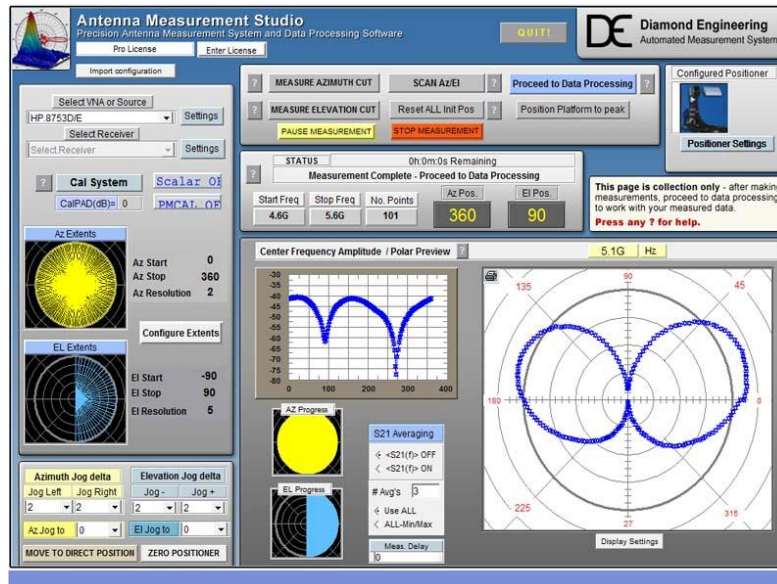


Figura 0-15: Software utilizado para medir en la cámara anecoica.

C.II.5 Amplificadores

Es necesario amplificar la señal debido a que la radiación en el interior de la cámara se atenúa por el efecto otros elementos externos, como los cables de medida. Existen distintos tipos de amplificadores en función de la banda de frecuencia de trabajo. En este caso los que utilizaremos funciona desde 5 hasta 20 GHz.



Figura 0-16: AMPLIFICADOR MINI-CIRCUITS ZX60-24-S+.

Para administrar potencia a estos amplificadores se utiliza una fuente de alimentación externa Promax FAC-662B



Figura 0-17: FUENTE DE ALIMENTACIÓN PROMAX FAC-662B.

C.II.6 Proceso de medida

Para realizar la medida de la antena seguiremos el siguiente esquema:

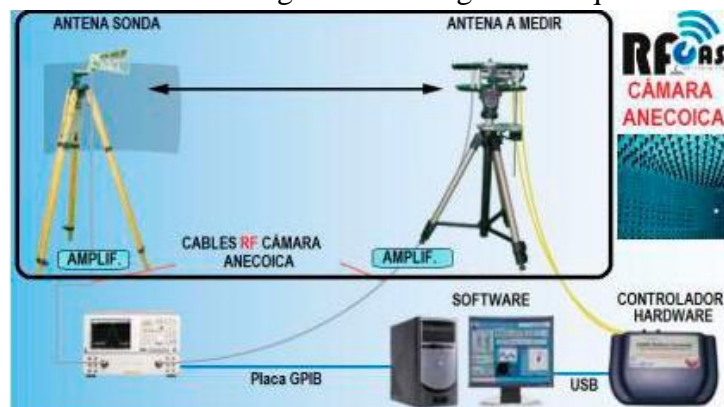


Figura 0-18: ESQUEMA MONTAJE CAMARA ANECOICA.

La antena calibrada actúa como sonda, tal y como se muestra en la figura anterior. Se conecta la antena a medir y la antena sonda a unos amplificadores (si es necesario) para ampliar la señal RF y se conecta la antena a medir al analizador de redes, el cual está conectado al PC que dispone del software DAMS.

Los pasos para realizar la medida son:

1. Seleccionar la antena sonda en función de la frecuencia de trabajo y colocarla según la polarización a medir (horizontal o vertical).
2. Después, hay que encender los amplificadores de la cámara y alinear la antena sonda elegida con la antena de estudio.
3. Configurar el analizador de redes. Se definirá en este paso el ancho de banda y los parámetros de medida. Los parámetros S permiten obtener los diagramas de radiación, el parámetro S21 será entre la antena emisora y la receptora.
4. A continuación, se encenderá el controlador hardware de la plataforma y se iniciará el software de medida. En este paso se indicará analizador de redes utilizado, el tipo de rotación (en elevación o en azimut) y el número de puntos empleados por cada grado de giro.
5. Finalmente, ya se puede empezar a realizar la medida. El propio software, mediante el dispositivo hardware, hace que la plataforma vaya girando y tomando medidas en cada iteración.