

### TRABAJO FIN DE GRADO INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

# Diseño de antena de apertura tipo bocina basada en colimado de campo en tecnología SIW para milimétricas

Autor Andrés Biedma Pérez

**Directores** Pablo Padilla de la Torre Cleofás Segura Gómez



Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación

Granada, Julio de 2022



# Diseño de antena de apertura tipo bocina basada en colimado de campo en tecnología SIW para milimétricas

Autor Andrés Biedma Pérez

**Directores** Pablo Padilla de la Torre Cleofás Segura Gómez



Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones

#### Diseño de antena de apertura tipo bocina basada en colimado de campo en tecnología SIW para milimétricas

Andrés Biedma Pérez

**Palabras clave**: Antena de apertura, Celda unidad, Antena de Bocina, Corrección del frente de fase, Tecnología SIW.

#### Resumen

La necesidad de mayor velocidad de transmisión que demandan las sociedades modernas en las que la inmensa mayoría de la humanidad vive, junto al aumento de dispositivos conectados a la red han producido una evolución del sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones sin precedentes en las últimas décadas y actualmente una transición de los sistemas de comunicación al nuevo paradigma de sistemas de comunicación 5G. Estas necesidades han generado a la misma vez una saturación del espectro electromagnético resoluble únicamente mediante el aumento de los anchos de banda, frecuencias de trabajo y velocidad para las nuevas tecnologías. Para atender esta demanda resulta indispensable el diseño de dispositivos que sean capaces de satisfacer las condiciones indicadas anteriormente.

Con la intención de proponer una solución a los problemas mencionados anteriormente, surge la necesidad de este proyecto. Este consistirá en el diseño, caracterización y fabricación de una antena de bocina en plano H basada en colimado de campo construida en tecnología *Substrate Integrated Waveguide* (SIW) para milimétricas capaz de trabajar en altas frecuencias, con un ancho de banda considerable y debido al uso de tecnología SIW, sencilla y barata de fabricar.

En el presente proyecto se presenta el diseño optimizado de una antena de bocina basada en colimado de campo en tecnología SIW en el rango de frecuencias milimétricas capaz de trabajar como antena de transmisión y recepción en sistemas de comunicación 5G, así como su prototipado y su correspondiente caracterización y medida en cámara anecoica. Todo el trabajo realizado durante estos meses ha dado lugar a una publicación científica en la revista IEEE TAP que en el momento de redacción de esta memoria se encuentra en proceso de revisión (*mayor revision*).

#### Holey SIW Horn Antenna Based on a H-plane Lens-wise Wavefront Collimation

Andrés Biedma Pérez

**Keywords**: Antenna Aperture, Holey Unit Cell, Horn Antenna, Phase Front Correction, Substrate Integrated Waveguide (SIW).

#### Abstract

The need for higher transmission speeds demanded by the modern societies in which the vast majority of humanity lives, together with the increase in the number of devices connected to the network, has led to an unprecedented evolution of the Information and Communication Technologies sector in recent decades and, at present, a transition of communication systems to the new paradigm of 5G communication systems. At the same time, these needs have generated a saturation of the electromagnetic spectrum that can only be resolved by increasing bandwidths, working frequencies and speeds for new technologies. In order to meet this demand, it is essential to design devices that are capable of satisfying the above-mentioned conditions.

With the intention of proposing a solution to the aforementioned problems, the need for this project arises. This will consist of the design, characterisation and manufacture of an H-plane horn antenna based on field collimation built in Substrate Integrated Waveguide (SIW) technology for millimetres capable of working at high frequencies, with a considerable bandwidth and, due to the use of SIW technology, simple and cheap to manufacture.

This project presents the optimised design of a horn antenna based on SIW technology field collimation in the millimetre frequency range capable of working as a transmitting and receiving antenna in 5G communication systems, as well as its prototyping and corresponding characterisation and measurement in an anechoic chamber. All the work carried out during these months has resulted in a scientific publication in the IEEE TAP journal, which at the time of writing this report is in the process of revision (*major revision*).

D. **Pablo Padilla de la Torre**, Profesor del Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones del Departamento Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada.

D. **Cleofás Segura Gómez**, Investigador Predoctoral (FPU) del Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones del Departamento Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada.

#### Informan:

Que el presente trabajo, titulado *Diseño de antena de apertura tipo bocina basada en colimado de campo en tecnología SIW para milimétricas*, ha sido realizado bajo su supervisión por Andrés Biedma Pérez , y autorizamos la defensa de dicho trabajo ante el tribunal que corresponda.

Y para que conste, expiden y firman el presente informe en Granada a 8 de julio de 2022.

Los directores:

Pablo Padilla de la Torre

Cleofás Segura Gómez

## Agradecimientos

A Dulce y a Carmen, que me enseñaron el secreto de la filantropía.

A Encarni que, pese a mi resistencia y mis dificultades, leyó conmigo mis primeras palabras.

A José Miguel y Fernando, que me revelaron las matemáticas y la filosofía. A Consuelo, que me introdujo en el teatro, me narró cuentos y me hizo llorar de emoción.

A Cristino, que me condenó a la poesía.

A Pablo, que supo ver en mí lo que los demás no vieron.

A Antonio, que me abrió las puertas de su casa, y a sus padres, que me han cuidado como a otro miembro más de la familia.

A José Manuel, Ignacio y María, yo sé quién soy si levanto la copa y bebo con vosotros, mis primeros amigos elegidos, precisamente entonces en la cafetería, cuando una boca impura me preguntó con quién andaba y me dijo quién era.

A mis padres, Mercedes y Tibu, mis maestros en la escuela y en la vida, que con tanto amor han moldeado mi persona, que me llevaron de la mano por aquella sierra que me vio crecer y me pusieron en el camino del compromiso con el otro, de la literatura, la música y la poesía, que se han dejado el cuerpo para que todo lo que hoy sucede sea posible.

A mi hermano, Guillermo, la persona que más quiero en este mundo, que siempre lo ha tenido más difícil y lo ha hecho mucho mejor que yo, te espero en la línea de meta.

Gracias a la vida que me ha dado tanto, Me ha dado la risa y me ha dado el llanto, Así yo distingo dicha de quebranto, Los dos materiales que forman mi canto, Y el canto de ustedes que es el mismo canto, Y el canto de todos que es mi propio canto.

Violeta Parra

# Índice general

1.	Intr	coducción, objetivos y motivación	<b>21</b>
	1.1.	Introducción y motivación	21
	1.2.	Objetivos	22
	1.3.	Estructura del documento	23
2.	Fun	damento Teórico	<b>25</b>
	2.1.	Introducción	25
	2.2.	Fundamentos de Antenas	25
		2.2.1. Parámetros de Antenas	25
	2.3.	Guías de onda y tipos de antenas	29
	2.4.	Tecnología SIW	32
	2.5.	Estructuras periódicas: Diagramas de dispersión	35
		2.5.1. Diagrama de Brillouin	37
	2.6.	CST: Simulador Electromagnético de Onda Completa $\ .\ .\ .$	38
3.	Pro	puesta de diseño	<b>49</b>
	3.1.	Introducción	49
	3.2.	Diseño de la zona de colimado	50
	3.3.	Diseño de la interfaz de transición radiante	51
	3.4.	Diseño de la alimentación: Transición GCPW-SIW	52
4.	Des	arrollo del diseño	55
	4.1.	Introducción	55
	4.2.	Cálculo de la estructura	55
	4.3.	Celda unidad e índice de refracción variable	57
	4.4.	Zona de colimando: distribución de perforaciones $\ . \ . \ .$	58
5.	Pro	totipado	63
	5.1.	Introducción	63
	5.2.	Prototipado	63
		5.2.1. Extracción de los gerbers	64
	5.3.	Prototipo y proceso de caracterización	64
		5.3.1. Entorno	65

6.	Mee	didas y validación	67
	6.1.	Problemática $r = 0.1  mm$	67
	6.2.	Caracterización	68
		6.2.1. Ganancia en frecuencia	68
		6.2.2. Parámetros $S$	70
		6.2.3. Diagramas de radiación	70
7.	Pla	nificación y costes	73
	7.1.	Recursos	73
		7.1.1. Recursos humanos	73
		7.1.2. Recursos de hardware y software	74
	7.2.	Planificación	74
		7.2.1. Diagrama de Gantt	75
	7.3.	Costes	76
		7.3.1. Presupuesto	76
8.	Con	nclusiones y lineas futuras	79
	8.1.	Conclusiones y principales resultados	79
	8.2.	Futuras líneas de investigación	81

# Índice de figuras

2.1.	Diagrama de radiación de una antena y parámetros del dia-	
	grama de radiación. Figura obtenida de [1]	27
2.2.	Ejemplos de los diferentes tipos de polarización. Figura obte-	
	nida de [2]. $\ldots$	28
2.3.	Diferentes tipos de antenas de apertura rectangular. De iz-	
	quierda a derecha: Sectorial plano E, Sectorial plano H y Pi-	
	ramidal	31
2.4.	Parámetros característicos de una antena de bocina plana sec-	
	torial en plano H	32
2.5.	Funcionamiento de una guía de onda en SIW y parámetros.	
	Figura obtenida de [3]	33
2.6.	Estructura <i>air-filled</i> SIW. Figura obtenida de [4]	35
2.7.	Ejemplos de diagrama de dispersión. Figuras obtenidas de $[5]$	
	y [6] respectivamente. $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	37
2.8.	Estructura periódica: celda unidad rectangular con perfora-	
	ción de radio variable	37
2.9.	Representación bidimensional del diagrama de Brillouin	38
2.10.	. Visión de un proyecto nuevo en el software CST	39
2.11.	. Definición de unidades y frecuencia de trabajo	40
2.12.	Creación de un nuevo componente	41
2.13.	. Creación del cuerpo de la guía de onda	41
2.14.	. Creación del sustrato $RO4003C$	42
2.15.	. Cambio del eje de coordenadas y creación del bloque corres-	
	pondiente al sustrato <i>RO4003C</i>	42
2.16.	. Creación de los bloques metálico y dieléctrico para dar forma	
	a la antena.	43
2.17.	. Seleccionado de caras a las que realizar la extrusión	43
2.18.	. Resultado tras el proceso de extrusión	44
2.19.	Figuras para ilustrar las diferentes Boolean Operations de	
	CST. En la Fig. 2.19a se muestra el esquema de referencia	
	para el resto de operaciones. Figuras obtenidas de [7]	44
2.20.	. Selección de la instrucción Boolean Operations - Add $\ldots$ .	45
2.21.	. Esquema antena de bocina terminada	45

2.22.	Definición de un puerto en CST	46
2.23.	Definición las condiciones de contorno	46
2.24.	Definición de los monitores de campo.	47
2.25.	Obtención de resultados	47
3.1.	Esquemático del modelo de la zona de colimado para la antena de bocina en plano H	50
3.2.	Opciones de distribución de perforaciones en la zona de co- limado de la antena de bocina SIW: Fig. 3.2a distribución cartesiana $(x, y)$ , Fig. 3.2b distribución radial $(r, \theta)$ , y Fig. 3.2c distribución mixta $(x, \theta)$ con r fijo a las columnas en x y distribución angular uniforme en $\theta$ .	51
3.3.	Esquemático de la transición desde la apertura de la antena al espacio libre	52
3.4.	Parámetro $S_{11}$ de la transición desde la apertura de la antena al espacio libre	52
3.5.	Transición GCPW a SIW: Diseño esquemático. Las dimensiones son: $W_{G_1} = 0.10 mm$ , $W_{L_1} = 0.35 mm$ , $W_{G_0} = 0.88 mm$ , $W_{L_0} = 0.55 mm$ , $W_1 = 0.97 mm$ , y $L_T = 2.65 mm$ . Figura obtenida de [8]	53
3.6.	Parámetros S de la transición GCPW-SIW.	53
4.1.	Zona de colimado: Fig. 4.1a análisis geométrico para la co- rrección de fase, Fig. 4.1b configuración angular de las celdas unidad.	56
4.2.	Distribución del índice de refracción en el plano normal a la dirección de propagación, para $\theta_{max} = 30^{\circ}$ , $\Delta d_{min} = 1.5\lambda_0$ , $\Delta r_{max} = 3.5\lambda_0$ y segure = 3.55	57
4.3.	Celda unidad: Fig. 4.3a ejemplo del diagrama de dispersión de la zona irreducible $\Gamma - X - M$ de Brillouin para una celda perforada rectangular de dimensiones: $p_x = 1.7 mm$ y $p_y =$ 1.3 mm y un radio de perforación de $r = [0.05 - 0.55] mm$ , y Fig. 4.3b relación del índice de refracción $(n)$ con la frecuencia.	58
4.4.	Celda rectangular equivalente para celdas deformadas	59
4.5.	Análisis del diagrama de dispersión considerando la celda uni- dad rotada de forma que la dirección de propagación esté ali- neada con la dirección radial, v $p' = n_r/cos(\theta)$ ,,	59
4.6.	Diagrama de dispersión para la dirección $x'$ de propagación cuando $p'_y$ es variable: $p'_y = 1.3 - 2.6 mm$ . El radio de perforación $r = 0.25 mm$ y $p'_x = 1.7 mm$ son fijos	59
	w	

4.7.	Rango de los valores del índice de refracción equivalente dis- ponibles para la celda unidad perforada SIW modificando el valor del radio: Fig. 4.7a para una fila radial cuyo ángulo de apertura es $\theta = 0^{\circ}$ y por tanto, $p'_x = p_x$ . Fig. 4.7b para una fila radial cuyo ángulo de apertura $\theta = 27.75^{\circ}$ y por tanto,	
4.8.	$p'_x = p_x/\cos(27.75)$	60 61
5.1.	Esquema de la antena	63
5.2.	Fig. 5.2a Transición al aire y Fig. 5.2b conector SMP con	64
5.3.	Gerbers: Fig. 5.3a Vista Top, Fig. 5.3b vista Bottom y Fig.	04
	5.3c vista conjunta con las perforaciones de aire en color rojo.	64
5.4. 5.5	Antena fabricada	65
0.0.	Fig. 5.5b alineación por láser y Fig. 5.5c proceso de medida de diagramas	66
6.1.	Comparación de parámetros S entre el prototipo de antena con radios de tamaño $r = 0.1 mm$ y sin ellos	67
6.2.	Comparación de la ganancia simulada en función de la fre- cuencia para el prototipo de antena con radios de tamaño r = 0.1 mm y sin ellos	68
6.3.	Comparación de la ganancia en frecuencia entre: antena fa- bricada, antena con zona de colimado y antena sin zona de	00
C 4	colimado.	69
0.4.	antena de tipo bocina en plano H con zona de colimado y Fig. 6.4b antena de tipo bocina en plano H sin zona de colimado.	69
6.5.	Parámetro $ S_{11} $ de la antena de bocina en plano H basada en colimado de campo (simulado y medido). En línea negra discontinua el límite habitual que marca el valor de este paráme-	
0.0	tro como admisible: $ S_{11}  = -10  dB$ .	70
6.6.	Diagrama de radiación en 2-D en plano H para la antena medida en el laboratorio, la antena de bocina en plano H con zona de colimado simulada y la antena de bocina sin zona de colimado simulada a diferentes frecuencias: $f_1 = 36 GHz$ Fig.	
	6.6a, $f_2 = 40 GHz$ Fig. 6.6b y $f_3 = 44 GHz$ Fig. 6.6c	71

6.7.	Diagrama de radiación en 3-D para la antena medida en el laboratorio a las frecuencias: Fig. 6.7a $f_1 = 36 GHz$ , Fig. 6.7b	
	$f_2 = 40  GHz$ y Fig. 6.7c $f_3 = 44  GHz$	71
7.1.	Diagrama de Gantt.	75
8.1.	Diseño 3D de la antena en plano H con zona de colimado en tecnología SIW	80

# Índice de cuadros

7.1.	Presupuesto del proyecto.	77
8.1.	Comparación entre el diseño propuesto y estructuras del es-	
	tado del arte con corrección de fase integradas	81

## Capítulo 1

# Introducción, objetivos y motivación

#### 1.1. Introducción y motivación

Las dos primeras décadas del s. XXI consolidan el fuerte desarrollo que las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones venían experimentando de forma exponencial desde mediados del siglo pasado. El proceso de globalización que han experimentado la mayoría de las sociedades del planeta no se entiende sin el desarrollo en paralelo de las comunicaciones. Asimismo, múltiples autores de diferentes áreas de conocimiento coinciden en que lo que hasta ahora conocíamos como "Edad Contemporánea" está desapareciendo y apuntan a un nuevo paradigma: la era de la información [9], en la que las comunicaciones van a instaurarse en campos hasta ahora concebidos lejos de las mismas. Ejemplos ilustrativos de estos campos (y agudizados debido a las recientes circunstancias vividas a causa de la pandemia de la COVID-19) son: la medicina y la educación. No hace muchos años atrás abordar la docencia online, la atención médica o incluso operaciones a distancia hubiera resultado del todo imposible.

Este desarrollo ha tenido un fuerte impacto en las democracias modernas de todos los países del mundo que están teniendo grandes dificultades para lidiar con el crecimiento de las comunicaciones [10] a la vez que por otra parte este crecimiento está siendo un impulso de desarrollo socio-económico especialmente para los denominados "países en vías de desarrollo" [11]. Los principales retos a los que como sociedad debemos abordar en esta primera parte de siglo son: democratizar la información y el acceso a las tecnologías junto con hacer frente a la crisis climática, dos asuntos a priori dispares pero con una estrecha relación [12].

Como autor de este trabajo y futuro ingeniero, no pretendo más que aportar un pasito más en el camino a cumplir los objetivos mencionados anteriormente. Dentro de los diversos sectores implicados en el desarrollo de las comunicaciones este trabajo se ubica dentro del área de la tecnología 5G. En telecomunicaciones las siglas 5G hacen referencia a la quinta generación de tecnologías de telefonía móvil. Al igual que su predecesora (4G), las redes 5G son redes de celdas y reciben este nombre debido a que el área de cobertura/servicio se encuentra dividida en pequeñas regiones denominadas *celdas*. La tecnología 5G no sólo pretende aumentar el ancho de banda sino abrirse a nuevos paradigmas de comunicaciones:

- Aumento del ancho de banda para usuarios medios.
- Capacidad masiva sin prestar atención al ancho de banda, dentro de este paradigma encontraríamos redes de sensores e IoT. Redes con una gran cantidad de comunicaciones de bajo *throughput* pero baja latencia y gran densidad de usuarios.
- Aplicaciones críticas de latencia: operaciones médicas a distancia o coches autónomos.

Es por ello que resulta crucial poder disponer de antenas compatibles, eficientes y baratas capaces de trabajar dentro de estos nuevos paradigmas a muy alta frecuencia.

#### 1.2. Objetivos

El objetivo fundamental de este trabajo es el de diseñar y validar una antena capaz de operar eficientemente en la banda de alta frecuencia asociada a 5G, como es el rango de frecuencias de [25-45] GHz. Sin embargo, el aumento de las frecuencias de trabajo lleva consigo el problema del aumento de las pérdidas por propagación en el espacio libre descritas en la famosa *Ecuación de Friis* [13]. Precisamente para subsanar este problema se ha optado por aumentar la directividad mediante el diseño de una antena de apertura tipo bocina en plano H basada en colimado de campo en tecnología SIW (véase la subsección [2.4]) que opera en la región del espectro electromagnético de la banda Q (en frecuencias comprendidas entre los 30 GHz hasta los 50 GHz). Este objetivo se encuentra divido en los siguientes ítems:

- Manejar técnicas de fabricación y diseño en tecnología SIW.
- Estudiar conformado de haces con celdas unidad para compensar fases a través de velocidad de propagación o índice de refracción.
- Corrección de errores de fase en antenas de bocina.

- Aprender a diseñar elementos radiantes en alta frecuencia con el Software CST (software industrial fundamental dentro del campo del diseño de antenas y radiofrecuencia).
- Diseño, medida y validación de una antena de bocina.

#### 1.3. Estructura del documento

En este apartado se describen brevemente los distintos capítulos en los que se divida el presente documento.

#### • Capítulo 1: Introducción, objetivos y motivación.

En él se ha realizado un análisis del contexto actual de las telecomunicaciones y detallado la motivación por la que se ha llevado a cabo la elaboración de este proyecto. Asimismo, incluye los objetivos y una breve descripción de la estructura del documento.

#### • Capítulo 2: Fundamento teórico.

En este capítulo se realizará una explicación en profundidad de los conceptos fundamentales que servirán al lector para comprender el proceso de diseño planteado. Se expondrá teoría básica sobre antenas y sus parámetros, guías de onda, tecnología SIW, estructuras periódicas y el concepto de celda unidad. También se presentará una introducción al software utilizado para análisis y simulación (CST Suite) mediante la construcción desde cero de una antena de bocina óptima en plano H.

#### • Capítulo 3: Propuesta de diseño.

Se expondrá en profundidad la propuesta de diseño y su contexto en relación al estado del arte. En primer lugar se explicará el proceso de diseño de la zona de colimado y en segundo lugar se especificarán las características, así como una introducción a los resultados, de la interfaz de transición radiante y de la transición GCPW-SIW, que sirve como alimentación de la antena.

#### • Capítulo 4: Desarrollo del diseño.

Se presentarán los diversos cálculos que se han llevado a cabo para obtener el prototipo final de la antena de bocina en plano H en tecnología SIW basada en colimado de campo. En primer lugar se profundizará en el cálculo de la estructura de la zona de colimado para posteriormente establecer la relación entre celda unidad e índice de refracción variable. Finalmente se realizará un análisis pormenorizado sobre la distribución de radios mixta  $(x, \theta)$ .

#### • Capítulo 5: Prototipado.

En este capítulo se detallará todo el proceso de prototipado una vez diseñadas las láminas finales que conforman la antena.

#### • Capítulo 6: Medidas y validación.

Tras completar el proceso de diseño y desarrollo de los capítulos anteriores en este capítulo se expondrán los resultados obtenidos tras comprobar empíricamente los resultados previamente obtenidos mediante simulación.

#### • Capítulo 7: Planificación y costes.

Se presentará una organización de las diferentes tareas realizadas durante todo el tiempo que se ha extendido este proyecto. También se añade un apartado acerca de los posibles costes conllevaría la consecución de este trabajo desde una perspectiva comercial.

#### Capítulo 8: Conclusiones y líneas futuras.

En este capítulo final se realizará un resumen de todo el proyecto, mediante una reflexión acerca de lo aprendido e investigado durante su ejecución. Del mismo modo se resumen las características del dispositivo radiante obtenido y las posibles líneas futuras.

## Capítulo 2

# Fundamento Teórico

#### 2.1. Introducción

Tal y como se ha descrito anteriormente, el presente trabajo consiste en el diseño, fabricación y caracterización de una de antena de bocina empleando tecnología SIW ("Substrate Integrated Waveguide"), es por ello, que antes de entrar a describir detalladamente el proceso de diseño y los resultados obtenidos se van a definir conceptos básicos relacionados con las antenas, guías de ondas y tecnología SIW que permitirán una mejor compresión del tema. Todos los conceptos desarrollados en este capítulo están basados en Antenas (Á. Cardama, 2002) [14] y Antenna Theory, Analysis and Design (C. A. Balanis, 2005) [15].

#### 2.2. Fundamentos de Antenas

#### 2.2.1. Parámetros de Antenas

De acuerdo con [16] una antena es: "la parte de un sistema de transmisión o recepción que está diseñada para irradiar o recibir ondas electromagnéticas", es decir, es el nexo de unión entre el espacio libre y el dispositivo receptor/emisor de información.<sup>1</sup> De acuerdo a la definición anterior una antena tiene dos modos de funcionamiento: antena en transmisión o en recepción. En base a esta distinción se presentan los parámetros de antena más relevantes en cada uno de los dos modos, sin embargo, es relevante destacar el teorema de reciprocidad [17] que establece lo siguiente: "Los parámetros de las antenas (directividad, ancho de haz, impedancia, resistencia de radiación, etc.) son idénticos en transmisión y recepción."

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Una definición más poética pero igualmente ilustrativa de estos elementos radiantes es: "Antena como oído/altavoz del mundo".

#### Parámetros de antena en transmisión.

• Impedancia de antena: Impedancia que presenta una antena entre sus terminales o de forma alternativa relación entre la tensión y la intensidad en la entrada de la antena. Por lo general, este valor es complejo y tanto la parte real como la parte imaginaria depende de la frecuencia. Cuando la impedancia de antena es puramente real a una frecuencia dada se dice que la antena es resonante, lo cual facilita la adaptación con la línea de transmisión y la distribución de corrientes aumenta.

$$Z_a(\omega) = \frac{V_{ent}}{I_{ent}} = R_a(\omega) + jX_a(\omega)$$
(2.1)

• **Densidad de potencia:** Cantidad de potencia que ofrece la antena por unidad de superficie en una determinada dirección. Este parámetro permite una primera aproximación acerca de la forma en la que se distribuye la potencia de la antena en el espacio.

$$\wp(r,\phi,\theta) = \Re[\vec{E} \times \vec{H}^*] \tag{2.2}$$

• Intensidad de radiación: Potencia por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección. En zona de campo lejano es independiente de la distancia a la que se encuentra la antena.

$$K(\phi, \theta) = \wp(\phi, \theta) \cdot r^2 \tag{2.3}$$

 Directividad: Relación entre la densidad de potencia radiada en la dirección de máxima radiación de la antena (a una distancia dada) y la densidad de potencia que entregaría una antena isotrópica que radiase la misma potencia.

$$D = \frac{\wp_{max}}{P_r/(4\pi r^2)} \tag{2.4}$$

Diagrama de radiación: Es el parámetro que más información proporciona acerca de una antena y suele ser el más relevante a la hora de decidir el tipo de antena a utilizar para un problema dado. Se describe mediante una función matemática o una representación gráfica de la distribución de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales. Se suele representar en la región de campo lejano. Por lo general, las antenas suelen presentar una zona en la que la directividad es máxima denominada *lóbulo principal*; las zonas de máximos diferentes al lóbulo principal se denominan *lóbulos secundarios*. Los lóbulos se encuentran entre mínimos de radiación los cuales son denominados

*nulos*. Del diagrama de radiación podemos obtener otros parámetros relevantes:

- Ancho de haz a -3dB ( $\Delta \theta_{-3dB}$ ): separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación de potencia alcanza la mitad del valor máximo. A partir de este parámetros es posible obtener una buena aproximación del valor de la directividad mediante las expresiones de Krauss [18] y de Tai-Pereira [19].
- Ancho de haz entre nulos  $(\Delta \theta_c)$ : separación angular de las direcciones del espacio en las que el lóbulo principal toma un valor mínimo.
- Nivel de lóbulo principal a secundario (*NLPS*): cociente (expresado en dB) entre el valor del diagrama de radiación en la dirección máxima de radiación y en la dirección del máximo lóbulo secundario. Por norma general, esta relación hace referencia al lóbulo secundario de mayor amplitud que habitualmente se sitúa adyacente al lóbulo principal.
- Relación delante-atrás (D/A): cociente (expresado en dB) entre el valor del diagrama de radiación en la dirección del máximo y el valor en la dirección diametralmente opuesta.



Figura 2.1: Diagrama de radiación de una antena y parámetros del diagrama de radiación. Figura obtenida de [1].

Polarización: La polarización de una antena en una dirección es la de la onda radiada. Es la figura geométrica descrita, al transcurrir el tiempo, por el extremo del vector campo eléctrico en un punto fijo del espacio en el plano perpendicular a la dirección de propagación. Habitualmente el tipo de polarización más común en antenas es la polarización de tipo elíptica, pero hay dos casos de interés, que son particularizaciones del caso elíptico:

- Lineal: La figura trazada es un segmento recto.
- Circular: La figura trazada es una circunferencia.



Figura 2.2: Ejemplos de los diferentes tipos de polarización. Figura obtenida de [2].

#### Parámetros de antena en recepción.

- Adaptación de la antena: La impedancia de una antena receptora es la misma que la de impedancia de dicha antena cuando actúa como transmisora. En recepción, la antena se comporta como una línea de transmisión presentando una impedancia de antena compleja. Ante la dificultad de medir la impedancia de antena en altas frecuencias surgen los parámetros de dispersión (parámetros S). Los parámetros S hacen referencia a la relación entre las ondas de potencia entre los distintos puertos. En el contexto de este trabajo, el parámetro S más determinante es el  $S_{11}$ .
  - **Parámetro**  $S_{11}$ : Se corresponde con el coeficiente de reflexión en el puerto de entrada del sistema. Relaciona las ondas de potencia reflejada y entregada en dicho puerto. Es el parámetro circuital más importante de una antena. Este parámetro debe ser lo más bajo posible (el convenio habitual marca fijar el valor de este parámetro torno a -10 dB para considerarse un límite admisible), puesto que el objetivo es que la antena radie hacia la máxima potencia hacia el exterior o reciba la máxima hacia el interior. Para minimizarlo es necesaria una adaptación de impedancias.
- Área efectiva: Las antenas extraen potencia del frente de onda incidente, lo que implica que presenten cierta área efectiva de captación definida como la relación entre la potencia que entrega la antena a su carga (supuesta para esta definición sin pérdidas y adaptada) y la

densidad de potencia de onda incidente.

$$A_{ef} = \frac{P_L}{\wp_{inc}} \tag{2.5}$$

#### 2.3. Guías de onda y tipos de antenas

Antes de entrar a discutir las particularidades de las antenas de bocina, es necesario introducir conceptos relacionados con la tecnología SIW (véase subsección 2.4) y las antenas de apertura (entre las que se encuentra la antena de bocina). Una guía de ondas es una estructura capaz de confinar y transportar ondas electromagnéticas a través de un camino determinado con mínimas pérdidas. Es por ello que las guías de onda resultan indispensables en los sistemas de alimentación de antenas y circuitos de microondas. A diferencia de las líneas de transmisión, las guías de onda pueden albergar diferentes configuraciones de campos TEM simultáneamente. Un parámetro fundamental de las guías de onda es la frecuencia de corte, esta delimita el límite en frecuencia que tienen que superar los distintos modos de la guía para que puedan empezar a propagarse a través de la misma. Existen distintos tipos de guías, sin embargo, este trabajo se ha centrado exclusivamente en el uso de guías de onda rectangulares trabajando en el modo fundamental. Para este tipo de guías la frecuencia de corte a partir de la cual los diferentes modos se propagan viene determinada por las dimensiones geométricas de la guía:

$$f_c(m,n) = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$
(2.6)

Donde "a" es el ancho de la guía, "b" es la altura de la guía y "m" y "n" hacen referencia al tipo de modo que se propaga. Los distintos modos de propagación posibles en una guía de ondas son:

- Modos TEM o transversalelectromagneticos: No disponibles en guías de onda de geometría rectangular. Por ello en tecnología SIW no es posible. Véase subsección 2.4.
- Modo TM o transversal magnético: Caracterizado porque la componente magnética en el eje de propagación es nula, mientras que sí existe componente eléctrica.
- Modo TE o transversal eléctrico: Caracterizado porque la componente eléctrica en el eje de propagación es nula, mientras que sí existe componente magnética.
- Modo H o modo híbrido: Superposición de las dos configuraciones anteriores.

Tal y como se mencionaba anteriormente, solo aquellas frecuencias que superen el valor de la frecuencia de corte para un cierto modo se propagarán, esto hace que podamos ver la guía de ondas como un filtro paso alto. En este trabajo se pretende trabajar en el modo fundamental, por lo tanto, es primordial conseguir una frecuencia de trabajo que supere la frecuencia de corte y que a su vez quede por debajo del resto de armónicos para que la guía sea monomodo. Para guías diamagnéticas (aquellas con permeabilidad magnética unidad), se tiene que la frecuencia de corte asociada al modo fundamental es:

$$f_{1,0} = \frac{c}{2a\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.7}$$

Para los siguientes modos las frecuencias de corte son:

$$f_{2,0} = \frac{c}{a\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.8}$$

$$f_{0,1} = \frac{c}{2b\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.9}$$

Otro de los parámetros fundamentales junto con la frecuencia de corte de los diferentes modos es la longitud de onda dentro de la guía. Este parámetro se define como:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \tag{2.10}$$

Es común, tal y como sucede con las antenas construidas mediante tecnología SIW, que las guías de ondas estén rellenas de otro material distinto del aire. Esta característica provoca que tanto la longitud de onda, como la frecuencia de corte de la guía estén determinadas por la permitividad eléctrica del medio del que están rellenas. La longitud de onda se calcula ahora como:

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r f}} \tag{2.11}$$

La idea principal del uso de guías de onda es aprovechar que estas confinan el campo entre sus paredes lo que provoca que la onda rebote y se generen así los mencionados modos. La única dirección en la que la onda se propaga es aquella en base a la cual se extiende la guía.

#### Tipos de antenas: Antenas de apertura.

Anteriormente se ha descrito cómo se confina y transmite una onda a través de una guía de ondas, sin embargo, el objetivo final es la radiación. Para realizar dicha tarea hay múltiples elementos radiantes o antenas. Sin embargo, se van a describir únicamente las antenas de apertura puesto que es el elemento básico sobre el que se ha construido todo el trabajo. Las antenas de apertura son aquella que utilizan superficies o aperturas para dirigir el haz electromagnético. No obstante, esta transición abrupta entre la antena y el espacio exterior genera una ineficiencia que se acentúa especialmente si la antena se encuentra rellena de un material distinto del aire, como es el caso que nos atañe. En guías rectangulares se distinguen dos tipos diferentes de bocinas:

- Sectorial: Se abre en una única componente. Solo amplía de forma gradual el valor de *a* o *b*. Dependiendo de qué valor modifica se tienen dos tipos de antenas sectoriales:
  - Sectorial plano H: Abre la componente *a*. Esto permite que el campo eléctrico permanezca confinado en su valor de amplitud. Es el tipo de implementación utilizada en este proyecto.
  - Sectorial plano E: Abre la componente b.
- **Piramidal**: Abre ambos planos de forma simultánea. Amplía tanto la componente *a* como *b*.



Figura 2.3: Diferentes tipos de antenas de apertura rectangular. De izquierda a derecha: Sectorial plano E, Sectorial plano H y Piramidal.

Como se ha destacado con anterioridad, uno de los objetivos es conseguir una antena muy directiva, para ello, la antena debe conseguir un frente de onda lo más plano posible. Aquella que mejor satisface dicha condición y por tanto su directividad es máxima son las antenas de iluminación óptima. Reciben este nombre debido a que el error de fase es el menor posible. Este error de fase es la diferencia de fase entre la componente central (al haz que menos distancia recorre desde que se genera en la guía de onda hasta que sale radiado por la bocina) y la componente externa (aquel haz que recorre más distancia). En la bocina sectorial plano H el error de fase se describe mediante:

$$t = \frac{3 \cdot \lambda}{8} \tag{2.12}$$

y por tanto el tamaño final de la apertura óptima resulta:

$$A_{opt} = \sqrt{3 \cdot \lambda \cdot L_H} \tag{2.13}$$

donde  $L_H$  es la longitud exterior de la bocina y depende del ángulo de ensanchamiento y la longitud central de la bocina.



Figura 2.4: Parámetros característicos de una antena de bocina plana sectorial en plano H.

#### 2.4. Tecnología SIW

Tal y como se ha descrito en 2.3 la guía de onda hueca, sin dieléctrico, es el elemento de transporte por antonomasia dentro del rango de las microondas y las milimétricas. No obstante, a medida que el sistema requiere un aumento de la frecuencia de trabajo el tamaño de la guía se hace cada vez más pequeño y su fabricación se complica, lo que implica un aumento de la complejidad del diseño y de los costes de producción del mismo. Es por ello por lo que desde mediados de la década de los 90 se están explorando alternativas que permiten lidiar con los problemas descritos. Las dos tecnologías que más han destacado son la "gap-waveguide" (guía de ondas con separación) [20] y la "substrate-integrated wavewide - SIW" (guía de ondas integrada en sustrato) [21]. De ahora en adelante se va a detallar en profundidad la tecnología SIW puesto que todo el trabajo se ha realizado en dicha tecnología.

La idea fundamental en tecnología SIW es ser capaz de sintetizar una configuración en una estructura plana soportada por un sustrato dieléctrico que sea compatible con tecnologías planares como microstrip, stripline o coplanar. Esto resulta de gran utilidad pues permite la creación de canales artificiales de guía de onda que pueden ser utilizados para diversas aplicaciones como el diseño de filtros, resonadores u otro tipo de circuitos. La figura Fig. 2.5 muestra el funcionamiento de una guía de onda en SIW, en ella las paredes metálicas superior e inferior (metalizaciones de la estructura plana) son idénticas a las de una guía convencional mientras que las paredes laterales son sustituidas por vías metálicas de forma cilíndrica. Si las vías cilíndricas se colocan lo suficientemente cerca las unas de otras, el conjunto de estas se comporta como una pared maciza, bloqueando el paso de las ondas electromagnéticas hacia el exterior consiguiendo así el comportamiento equivalente al de una guía de onda tradicional.



Figura 2.5: Funcionamiento de una guía de onda en SIW y parámetros. Figura obtenida de [3].

#### Reglas de diseño en SIW

Pese a que como se ha comentado anteriormente la tecnología SIW permite replicar el efecto de las paredes laterales de una guía de onda, las formas de propagación de las ondas electromagnéticas no son exactamente idénticas a las de una guía de ondas tradicional. La principal diferencia radica en qué modos se puede propagar 2.3. En SIW sólo se puede transmitir un modo transversal magnético (TM) o transversal eléctrico (TE), nunca ambos a la vez, esto es debido a la discontinuidad eléctrica que presentan las vías metalizadas.

Existen múltiples criterios de diseño en la tecnología SIW, sin embargo, el que se ha utilizado para la realización de este proyecto es aquel que engloba la geometría de las vías metálicas y su localización para crear una guía de onda con un ancho dado. El valor del ancho de la guía junto con el del espesor del material dieléctrico definen completamente las dimensiones de la guía que recordemos es la que determina la frecuencia de corte de los modos. En la figura Fig. 2.5 se define el espesor del dieléctrico como h y el ancho de la guía como W. Este ancho se mide desde los centros de la vía. Es posible elegir diferentes configuraciones geométricas para realizar los postes metalizados, habitualmente se opta por el uso de vías elípticas puesto que son muy sencillas de introducir mediante el uso de brocas y además gozan de una amplia gama de tamaños. Se define D como el diámetro mayor de la elipse y  $d_p$  como diámetro menor. La relación  $D/d_p$  es un factor a minimizar para disminuir las pérdidas por fugas de campo. El valor mínimo posible de este ratio es 1, lo que implica una geometría circular Asimismo, se define dcomo la periodicidad de las vías, es decir, cada cuanto aparece cada vía o de otra manera, la distancia entre ellas.

La propia naturaleza de la geometría de las vías provoca que las paredes mimetizadas no sean perfectas, esto se traduce en un nuevo parámetro denominado ancho efectivo  $(W_{eff})$  definido como aquel ancho que percibe la onda electromagnética que se propaga por la guía SIW. Existen diferentes aproximaciones a la hora de calcular el ancho efectivo, en la ecuación 2.14 se presenta la utilizada en el diseño de este trabajo.

$$W_{eff} = W - 1.08 \frac{D^2}{b} + 0.1 \frac{D^2}{W}$$
(2.14)

La principal problemática del uso de vías para crear paredes son las posibles fugas entre los huecos que quedan entre ellas. Sin embargo, las ecuaciones de diseño de SIW Ec. 2.14 - 2.16 permiten crear la estructura eliminando prácticamente dichas pérdidas, modificando el diámetros de las vías (D) y la distancia entre ellas (d).

$$D < \frac{\lambda_g}{5} \tag{2.15}$$

$$d \le 2D \tag{2.16}$$

Adicionalmente a las pérdidas de fuga aparecen también las producidas debido a las imperfecciones de los materiales (rugosidad, porosidad del metal, etc.). Sin embargo, las pérdidas realmente limitantes a la hora trabajar con tecnología SIW son las ocasionadas por la propagación debidas a la presencia de un sustrato dieléctrico. Estas pérdidas aumentan con la frecuencia, debido a que la onda debe recorrer una mayor longitud eléctrica, es por ello, que a partir de frecuencias por encima de los [30 - 40] GHz resulta muy complicado emplear eficientemente esta tecnología.

Llegados a este punto el lector podría preguntarse acerca del sentido de este trabajo: ¿Para qué fabricar una antena de bocina en tecnología SIW dentro del rango de frecuencias e incluso superior al que esta misma tecnología deja de operar adecuadamente?

#### Air-Filled SIW (AFSIW)

De acuerdo a lo expuesto con anterioridad el principal elemento que limita el aumento en frecuencia son las pérdidas debidas al dieléctrico que forma la capa de sustrato, por tanto, la solución al problema resulta inmediata: eliminar el sustrato. Sin embargo, no hay una manera sencilla de aplicar esta solución con la configuración original monocapa Fig. 2.5 ya que el sustrato es el soporte físico y no se puede prescindir de él. En [22], se propuso una nueva configuración formada por tres capas que permitiese la eliminación parcial del sustrato en la región en la que se propaga la onda permitiendo así subsanar el problema de las pérdidas debidas al aumento de la frecuencia de trabajo. Esta configuración se muestra en la . 2.6.



Figura 2.6: Estructura *air-filled* SIW. Figura obtenida de [4].

La capa central denominada Substrate 2 que incluye tanto las vías metálicas como la zona de aire haría la función de configuración original SIW presentada en la Fig. 2.5 mientras que las capas Substrate 1 y 3 son dieléctricos, con una o dos capas de metal que incluyen las paredes metálicas superior e inferior necesarias para confinar la onda. Para que la capa central mantenga soporte físico, el dieléctrico no se elimina completamente. Es necesario dejar una delgada tira de dieléctrico entre la zona de aire y las vías metálicas.

#### 2.5. Estructuras periódicas: Diagramas de dispersión

Las estructuras periódicas son aquellas que siguen un cierto patrón que se repite de forma periódica. Para estudiarlas estas se dividen en lo que se conoce como celda unidad. La celda unidad es la estructura mínima que se repite cubriendo toda la macroestructura. A través del análisis del diagrama de dispersión de la celda unidad es posible describir el comportamiento de la macroestructura. Ejemplos de tecnologías que hacen uso de la celda unidad son: reflectarrays, estructuras EBG (*Electromagnetic Band-Gap*) y FSS (*Frequency Selective Surface*). Dentro de los múltiples usos de la celda unidad, en este proyecto se ha utilizado el concepto de celda unidad con el
objetivo de modificar la fase de la onda electromagnética, al poder modificar la velocidad de propagación. Esto permite la corrección del frente de onda en la bocina SIW, dando lugar a un frente de onda plano en la apertura de la antena. Dicho frente de onda plano dará lugar a un diagrama de radiación más directivo, y a una antena con un mayor nivel de ganancia.

El diagrama de dispersión establece la relación existente entre la frecuencia (f) y la constante de fase  $(\beta)$  de la onda electromagnética que se propaga a través de la estructura. Unos ejemplos de diagrama de dispersión se muestran en la Fig. 2.7. En la Fig. 2.7a se ilustra el concepto **línea de la luz**, esta línea es una función cuya pendiente es igual a la velocidad de la luz en el material que se emplea como medio de propagación. A partir de ella puede calcularse cuál es la velocidad de fase de la onda que se propaga por la estructura mediante la Ec. 2.17.

$$v_f = \frac{w}{\beta} = \frac{v'}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c^{TE_{mn}}}{f}\right)^2}}$$
(2.17)

Donde v' es:  $v' = c/\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}$ . En guías de ondas rectangulares es común utilizar la velocidad de grupo, definida como la velocidad de la envolvente de la onda que se propaga:

$$v_g = \frac{dw}{d\beta} = v' \sqrt{\left(\frac{f_c^{TE_{mn}}}{f}\right)^2}$$
(2.18)

En este proyecto resultará de gran utilidad conocer cual es el índice de refracción (n) de la estructura periódica, este lo podemos obtener a partir de la relación entre la velocidad de la luz (c) y la velocidad de fase  $(v_f)$ :

$$n = \frac{\beta}{k_0} = \frac{\beta}{2\pi f/c} = \frac{c}{v_f}$$
(2.19)

De acuerdo con la Ec. 2.19, a medida que las rectas de Fig. 2.7a se separan con respecto a la línea de la luz, el índice de refracción asociado a las mismas aumenta.

En la Fig. 2.7b se ilustra el concepto de **banda prohibida**, denominada así porque dentro de ese rango de frecuencias ninguna onda puede propagarse por la estructura. El hecho de esta no propagación por la estructura es debida a las características de la misma, ya que ningún modo tiene frecuencias para esa zona. Si no existe banda de corte, quiere decir que siempre hay modos propagándose, cada uno comenzando y acabando en sus frecuencias de corte, pero conectados.



Figura 2.7: Ejemplos de diagrama de dispersión. Figuras obtenidas de [5] y [6] respectivamente.

#### 2.5.1. Diagrama de Brillouin

Para obtener el diagrama de dispersión de la estructura es necesario llevar a cabo un estudio sobre la celda unidad. En el contexto de este trabajo la celda unidad consiste en una estructura rectangular de dimensiones:  $p_y =$ 1.3 mm y  $p_x = 1.7 mm$  con una perforación circular de radio variable en el centro de la misma, véase la Fig. 2.8.



Figura 2.8: Estructura periódica: celda unidad rectangular con perforación de radio variable.

El estudio de la *zona irreducible de Brillouin* definida como: la primera mínima zona de Brillouin que es posible obtener tras reducir la celda unidad a partir de sus simetrías, permite determinar el comportamiento de la celda completa. A la representación gráfica Fig. 2.9 se le denomina **diagrama de Brillouin**, la celda unidad representada en la misma incluye un agujero circular como elemento periódico de la estructura, la zona irreducible queda delimitada por las líneas de color rojo.

El diagrama de Brillouin está delimitado por los ejes  $\beta_x$  y  $\beta_y$  que abarcan



Figura 2.9: Representación bidimensional del diagrama de Brillouin.

el intervalo  $[-\pi/p, \pi/p]$ , por convención suelen multiplicarse por el período (p) para expresar el diagrama en unidades angulares. De modo que los vértices de la zona irreducible de Brillouin se definen mediante las coordenadas:  $\Gamma = (0,0), X = (\pi,0) \text{ y } M = (\pi,\pi).$ 

A partir del diagrama se traza la trayectoria que sigue la onda electromagnética en la celda unidad y se obtiene su comportamiento en frecuencia. Por tanto, se tiene caracterizada la dirección en la que ciertas frecuencias se pueden transmitir. Supóngase un rayo que se propaga en la dirección  $\beta_x$ (dirección 0°), para obtener su diagrama de dispersión bastaría con estudiar cual es la variación de frecuencia que se produce en el vector de  $\Gamma$  a X. Puesto que el diagrama en este vector/camino marca las diferencias de fase que sucederían entre los bordes dirección X (y sin desfase en Y) para comprobar que longitudes de onda entrarían en resonancia en esta estructura.

## 2.6. CST: Simulador Electromagnético de Onda Completa

CST Studio Suite es un software tipo CAD (diseño asistido por ordenador), escrito en Visual Basic, para el análisis electromagnético 3D de alto rendimiento para diseñar, analizar y optimizar componentes y sistemas electromagnéticos. Entre los objetos más comunes del análisis se incluyen el rendimiento y la eficiencia de antenas y filtros, la compatibilidad electromagnética y las interferencias (EMC/EMI), exposición del cuerpo humano a campos de EM, los efectos electromecánicos de motores y generadores, etc. En esta sección no se va a entrar a detallar cada una de las aplicaciones mencionadas anteriormente sino que se presenta una breve introducción a CST mediante la creación paso a paso de una antena de bocina, centrando la atención en las funcionalidades propias del diseño, modelado y caracterización de dispositivos radiantes.

#### Creación de un nuevo proyecto

La pantalla de trabajo de un proyecto en blanco en CST se muestra en la Fig. 2.10. En ella se diferencian cuatro subventanas principales:

- Navigation Tree: En él se puede navegar por todo el proyecto. Se encuentran desde los diferentes tipos de materiales empleados, las características de los puertos utilizados hasta las diferentes carpetas con los resultados tras las simulaciones.
- Barra de tareas: En ella se encuentran las distintas opciones del programa "File", para las propiedades del archivo; "Modeling" para crear los diferentes componentes del diseño en cuestión; "Simulation" para configurar y lanzar las distintas simulaciones que CST ofrece; "Post-Proccesing" para el post procesado de datos y "View" para configurar la vista del entorno.
- Parameter List: Contiene el nombre, valor y descripción de cada una de las variables que se han definido.
- Messages: Ventana que presenta diferentes mensajes, realmente útil cuando sucede algún error durante la simulación o para ver la evolución del proceso.

File       Hore       Modeling       Simulation       Post-Processing       Vew       Security       Processing       Post-Processing       Postent       Post-Processing       Post	📄 😼 🗟 🗞 🗳 🕫 🥫		Antena Bocina - Tutorial CST - CST Studio Suite	- 8 X
Volume Volume   Volume <t< th=""><th>File Home Modeling</th><th>Simulation Post-Processing View</th><th></th><th>Search (Alt+Q) 🔍 🔺 🕜 -</th></t<>	File Home Modeling	Simulation Post-Processing View		Search (Alt+Q) 🔍 🔺 🕜 -
Numpton Tree       X         Genome       Antena Booina - Tutorial CST* ©         Genome       Conversion         Genome       Conversion <t< th=""><th>Paste Copy View - Clipboard Settin</th><th>simulation Project - Solver - Simulation Simulation</th><th>r Mesh Global Vere Propertie - Mesh Global</th><th>Open Macros Report - Report Macros</th></t<>	Paste Copy View - Clipboard Settin	simulation Project - Solver - Simulation Simulation	r Mesh Global Vere Propertie - Mesh Global	Open Macros Report - Report Macros
Servit Servit	Navigation Tree X	Antena Bocina - Tutorial CST* 🔀		
	Corporets Corporets Corporets Corpose Corpos	3D         Schematic           Parameter List         Expression           #         a         3.22           #         Appt         = 2*81*tranD(theta)           #         Ax         = 1.634*tands0+19*p/2           #         Ax2         = 1.634*tands0+19*p/2	Artena Bocina - Tutorial CST - CST Studio Sulte Vela 222 Antena Bocina - Tutorial CST 224 Antena Bocina - Tutorial CST 225 Antena Bocina - Tutorial CST 226 Antena Bocina - Tutorial CST 227 Antena Bocina - Tutorial CST 228 Antena Bocina - Tutorial CST 229 Antena Bocina - Tutorial CST 229 Antena Bocina - Tutorial CST 229 Antena Bocina - Tutorial CST 220 Antena Bocina - 220 Antena Antena - 220 Antena Antena - 220 Antena Antena - 220 Antena Antena - 220 Antena Antena - 220 Antena Antena	X Message X This CST project has been created with a newer version. Message mogrees

Figura 2.10: Visión de un proyecto nuevo en el software CST.

En todo proyecto lo primero que hay que hacer es definir las unidades y la frecuencia a la que se va a trabajar, para ello basta con clicar en la esquina inferior derecha tal y como se muestra en la Fig. 2.11.

📄 📬 🖟 🍓 🗳 🕫 🗉				Antena Bocina - Tutorial CST - CST Studio Suite	- @ ×
File Home Modeling	Simulation Post-Pr	ocessing View			Search (Alt+Q) 🔍 🔺 🕐 -
Paste Copy View - Clipboard Settin	s Simulation Project - Solver	Simulation	er Mesh Glo View Units	Al Edit History Calculator Parameters	
Navigation Tree X	Antena Bocina - Tut	orial CST* 🔀	Projec	Results	
Components     C			Dime mm Freq GHz Volta Volta S Indu Indu	rore: Temperfule: V [Alion → V rxy: Time: Current: A → V taroce: Resistance: Capacitance: Capacitance: pF	z ×
Excitation Signals     Field Monitors				Aceptar Cancelar Ayuda	
Voltage and Current Monitors	3U Parameter List	schematic		X Result Navinator X Messanes	×
Mesh	V Name	Expression	Value	Description I V 3D Run ID	-
- 2D/3D Results	-m a	= 3.22	3.22	Ancho Guia	been created with a newer version.
- Fafields	-== Aopt	= 2*R1*tanD(theta)	43.6444942166943	Anchura Optima	
	-m Ax	= 1.634*landa0+p/2	14.8463771428571	DeltaX	
	-m Ax2	= 1.634*landa0+19*p/2	30.1463771428571	DeltaX_divisiones version vers	
Ready				Q 🔶 🥶 Q 🥑 📰 🞜 🗊 - 😥	Raster=0.500 Normal mm GHz s K

Figura 2.11: Definición de unidades y frecuencia de trabajo.

#### Diseño de una guía de onda

La guía de onda es el primer elemento de la futura antena de bocina que se ha construido. En primer lugar se ha definido un nuevo componente haciendo clic derecho sobre la etiqueta Navigation Tree/Components/New Component (véase la Fig. 2.12). Una vez definido el entorno de este nuevo componente se le da forma mediante la opción "Modeling" y creando así un bloque metálico macizo con dimensiones: ancho de guía (a = 3.22 mm), altura de guía (b = 1.524 mm) y longitud de guía (L = 10 mm), véase la Fig. 2.13.

Una vez definido el cuerpo de la guía se procede a la creación del relleno de la misma, para ello es necesario: primero, la creación de un nuevo material con las propiedades del sustrato RO4003C (permitividad eléctrica  $\varepsilon_{SIW} = 3.55$  y tangente de pérdidas tabulada de  $tan(\delta) = 0.0027$ ), véase la Fig. 2.14 y en segundo lugar, la creación de otro bloque operando del mismo modo que en la Fig. 2.12.

A continuación, por comodidad a la hora de trabajar y por explorar otra de las características de CST se ha movido el plano de coordenadas al centro de la alimentación de la guía, para ello desde la pestaña "Modeling" se ha seleccionado la opción "Local WCS" y después se ha elegido la posición deseada. Esto resulta de utilidad puesto que la antena de bocina en cuestión presenta simetría y definir el resto de parámetros pasa a ser un proceso más

। । 🙀 🐺 📽 📇 ଏ) (° =				Antena Bocina - 1	Futorial C	ST - CST Studio Suite				-	5 X
File Home Modeling	Simulation Post-Process	ing View									Q 🔺 🕜 -
Import/Export Exchange	d brary - s Shape	s la	Align Align Align Blend - Boolean - Tools	Send Tools • Modify Locally •	Curves Curves	Picks Picks Picks	Edit Hist Properties Lis Ed	ory at a	Local WCS · @ · WCS	Normal: X Position: 0 Plane	- +
Navigation Tree X	Antena Bocina - Tutorial C	CST* 🔀									
Actor Prints     New Component     Makesan     Ma	3D         Schem           Parameter Lat         ▼           ▼         Name           =         a           =         a           =         a           =         a           =         a           =         a           =         a           =         a           =         a           =         a           =         a	atic Expression 3.22 2°R1*tanD(theta) 1.634*tanda0+p?2 1.634*tanda0+p?p/2	Value 3.22 43.644942166943 14.8463771428571 30.1463771428571	Description Ancho Guia Anchura Optima DeltaX DeltaX_divisiones	×	Reuk Navgator ▼ 30 Aun 10 at 0: Current Run		X Messages	ر) کے T project has been Progress	2 Z	y x ion.
Ready							ि् 🔶 🥌	🍳 🥑 🔡 🔎	🚺 - 🔛 Ra	aster=0.500 Normal m	nm GHz s K

Figura 2.12: Creación de un nuevo componente.

ା 🖬 📬 🗒 📽 🖉 ମ (ମ :				Antena Bocina - 1	utorial CS	T - CST Studio Suit	te				-	8 X
File Home Modeling	Simulation Post-Proces	sing View								History Tree (Fast I	Model Update)	×
Import/Export Exchange	orary - De te de la constante	es	Align Align Blend ~ Boolean ~ Tools	Shape Tools •	Curves Curves	Picks Picks	Points * Lists * · Picks	Brick Name: Exterior Yesis:		Ymav-		OK Cancel
Navigation Tree X	Antena Bocina - Tutorial	CST* 🗙						1		a	[	Preview
Sector → Components → Components → Arterna Bocha → Arterna Bocha → Arterna Bocha → Arterna Bocha → Arterna Bocha → Arterna Bocha → Arterna Posta → Wres → Wres → Wres → Wres → Wres → Lunger Dements → Fandel Sources → Fandel Sourc	Antena Bocina:Exterior Material PEC Type PEC Thermal cond. PTC							Ymn: esp/2 2mm: 0 Component: Antena Boona Materal: PEC		Ymax: h+esp/2 Zmax: L		Help
Excitation Signals     Field Monitors	3D Scher	matic				Description of the states						
Heid Monitors Votage and Current Monitors Probes Mesh 20/30 Results 20/30 Results Fafields 20/30 Results	Parameter List           V         Name	Expression 3.22 2*R1*tanD(theta) 1.634*landa0+p/2 1.634*landa0+19*p/2	Value 3.22 43.6444942166943 14.8463771428571 30.1463771428571	Description Ancho Guia Anchura Optima DeltaX DeltaX_divisiones	×	State         State           3D Run ID         30 Current Run		×	Messages	project has been crea	ited with a newer ve	x sion.
Ready								छ 🔶 🥥 🧕	0 8 4	- Raster	=0.500 Normal	mm GHz s K

Figura 2.13: Creación del cuerpo de la guía de onda.

sencillo. En la Fig. 2.15 se observa el cambio de coordenadas así como el nuevo bloque (azul) correspondiente al sustrato RO4003C.

Acto seguido se crean otros dos bloques, uno metálico y otro de dieléctrico, de dimensiones: longitud total ( $L_{tot}$ = 49.66 mm) y apertura óptima ( $A_{opt}$  = 43.64 mm) a partir de los cuales mediante el comando de CST *Extrude Face* se obtiene el cuerpo de la antena de bocina deseada. Este proceso se muestra en la Fig. 2.16, la Fig. 2.17 y la Fig. 2.18.

📄 📂 🐺 🗞 🤮 47 (약 = File Home Modeling	Simulation Post-P	rocessing View		Ante	Material Properties: material1 Problem type: Default	~	×	– & X Search (Alt+Q) Q A ?
Import/Export Exchange Material	d brary • brary • brar • brav • brar • brav • brar • brav • br	© © -   <b>``</b> - ⊮ -	Align Align Blend ~ Boolean ~ Tools	Bend Modi Shap	General Conductivity Dispension General properties Material name:	n Themal Mechanics	Density	W     Image: Section of the section of t
Navigation Tree x Search  Sear	Antena Bodina - Tu material 1 Type Normal Epilion 355	torial CST* 🖸			Naterial folder: Type: Normal V Epsilon: 3:55 Color Dow as wireframe Dow reflectives suface	Mu: 1 0°, Transpa 2 Alow culline display Chow culline display	ency 100%	, La constante da constante constante da con
Farfield Sources	3D Parameter List	Schematic		_				ssages X
Las Excitation Signals     Las Excitation Signals     Las Field Monitors     Voltage and Current Mont     Probes     Probes     Mesh	✓         Name           -at         a           -at         Aopt           -at         Ax	Expression = 3.22 = 2*R1*tanD(theta) = 1.634*landa0+p/2	Value 3.22 43.6444942166943 14.8463771428571	Descri Ancho Anchu Delta)				▲ () 전문 This CST project has been created with a newer version.
ID Results ✓ C > Ready	-m Ax2	= 1.634*landa0+19*p/2	30.1463771428571	Delta)	ОК	Cancel Appl	y Help	tessages Progress Progress <b>197</b> Progress mm GHz s K

Figura 2.14: Creación del sustrato RO4003C.



Figura 2.15: Cambio del eje de coordenadas y creación del bloque correspondiente al sustrato RO4003C.

#### Diseño de antena de bocina en plano H.

Tal y como se muestra en la Fig. 2.18 aún resta eliminar el excedente de metal y dieléctrico, para ello, se ha usado una de las instrucciones fundamentales de CST: *Boolean Operations*, el resultado obtenido se muestra en la Fig. 2.21. Estas se describen a continuación:

Add (+): Suma las formas seleccionadas para obtener una única forma. La forma resultante obtendrá el nombre y el material de la primera

📄 📴 🗟 📽 🗳 🗘 (	) <sup>4</sup> ∓		- 8 ×					
File Home Model	ing Simulation Post-	Processing View						Search (Alt+Q) 🔍 🔺 🕐
Import/Export Exchange	round ial Library • Edit • terials	0 0 • 1 • • • • • • • • • • • • • • • •	form Boolean - Tools	Bend Tools • Modify Locally • Shape Tools •	Curves Picks Pick Points Pick Lists Curves Picks	Edit History Properties Edit	Cocal WCS	Cutting Plane + Sectional View
Navigation Tree	× Antena Bocina - T	utorial CST* 🔀						
Search	30	Schentk						y y
- Reld Sources	Parameter List				× Result Navigator	×	Messages	
Ports     Excitation Signals	√ Name	Expression	Value	Description	A 3D Run ID		C) 🔼 🔅 🗶	
- 🙀 Field Monitors	-HI 8	= 3.22	3.22	Ancho Guia	- III 0: Current Run		A This CST project has been seen as the project has been as the project has	n created with a newer version.
Voltage and Current Mor	nit -== Aopt	= 2*R1*tanD(theta)	43.6444942166943	Anchura Optima				
H Mesh	-m Ax	= 1.634*landa0+p/2	14.8463771428571	DeltaX				
< 3	-11 Ax2	= 1.634*landa0+19*p/2	30.1463771428571	DeltaX_divisiones	v		Messages Progress	
Ready						्र 🔶 🥶 🍳 🕻	🥑 🔛 🛋 🎯 - 🚱 R	aster=5.000 Normal mm GHz s K

Figura 2.16: Creación de los bloques metálico y dieléctrico para dar forma a la antena.



Figura 2.17: Seleccionado de caras a las que realizar la extrusión.

forma. Véase Fig. 2.19b.

- Substract (-): Resta la segunda forma a la primera para obtener una sola forma. La forma resultante obtendrá el nombre y el material de la forma de la que se resta la otra forma. Véase Fig. 2.19c.
- Intersect (\*): Intersecta dos formas para formar una sola. La forma resultante obtendrá el nombre y el material de la primera forma de esta operación. Véase Fig. 2.19d.



Figura 2.18: Resultado tras el proceso de extrusión.

Insert (/): La segunda forma se insertará en la primera. Ambas formas se mantendrán. Las formas resultantes no tendrán ningún volumen de intersección. Véase Fig. 2.19e.



Figura 2.19: Figuras para ilustrar las diferentes *Boolean Operations* de CST. En la Fig. 2.19a se muestra el esquema de referencia para el resto de operaciones. Figuras obtenidas de [7].

#### Obtención de resultados

En primer lugar es necesario abordar tres cuestiones básicas para obtener unos resultados coherentes tras la simulación: Puertos de excitación, condiciones de contorno y monitores de campo. Los puertos de excitación en CST

📄 📴 🗟 🦉 🛱 🕫 🗧				Antena Bocina - Tu	utorial CST -	CST Studio Suite					
File Home Modeling	Simulation Post-Proc	cessing View							Search (Al	t+Q) 🔍 🔺	• 🕐
Import/Export Exchange	d brary - is Sh	apes	Align Align Blend Boolean Boolean	Bend Tools  Hodify Locally  Hodify Local  Hod	Curves	<ul> <li>Pick Points •</li> <li>Picks</li> <li>O Clear Picks</li> <li>Picks</li> </ul>	Edit Histor Properties List Edit	■ ⊅• ⊠ 0 ⊑•	Local WCS · D · Cutting WCS · D · Plane ·	Normal: X  Position: 0  Sectional View	
Navigation Tree X	Antena Bocina - Tutor	ial CST* 🔀	Add 📑		•						
Components     C	Antena Bocina:Exteri Material PEC Type DEC Thermal cond. PTC	or	C Subtract Subtract Intersect Insert Intersections Perform I Intersection	ntersection Check on Check Settings							
- Farfield Sources	Farfield Sources 3D Schematic					has a s					
Excitation Signals     Excitation Signal	Parameter List           V         Name           -ss         A           -ss         Ax           -ss         Ax2	Expression = 3.22 = 2*R1*tanD(theta) = 1.634*landa0+p/2 = 1.634*landa0+19*p/2	Value 3.22 43.6444942166943 14.8463771428571 30.1463771428571	Description Ancho Guia Anchura Optima DeltaX DeltaX_divisiones	X Res	ult Navigator 3D Run ID 0: Current Run		X Messages	KE T project has been created v Progress	with a newer version.	

Figura 2.20: Selección de la instrucción Boolean Operations - Add



Figura 2.21: Esquema antena de bocina terminada.

equivalen a la alimentación del elemento a simular. Las múltiples opciones ofrecidas por el programa se muestran en la Fig. 2.22. Para establecer un puerto primero se debe elegir la superficie en la que se va a colocar (mediante Picks) a continuación establecer las diferentes condiciones de simulación, en este caso la más relevante es mantener la guía de onda trabajando en modo fundamental, es decir, seleccionar sólo un modo de propagación.

El siguiente elemento a definir son las condiciones de contorno o *Boun*dary Conditions, véase Fig. 2.23. En este caso para la dirección de propagación (z) se ha seleccionado: open (add space). Esta opción equivale a generar



Figura 2.22: Definición de un puerto en CST.

un plano de vacío en dicha dirección y además añade un espacio para poder calcular problemas de campo lejano o de radiación. Para el resto de componentes se ha seleccionado la opción: *Open*, equivalente a la anterior con la salvedad de no añadir espacio extra.



Figura 2.23: Definición las condiciones de contorno.

En último lugar, el proceso de definición de los monitores de campo se muestra en la Fig. 2.24. Básicamente se establece una medida de campo entre las múltiples que ofrece CST. En particular a este trabajo por tratarse de un problema de radiación se busca el comportamiento en campo lejano (*Far*- field/RCS) y los campos excitados dentro de la antena para poder observar el frente de onda que se propaga en el interior (*E-Field*).



Figura 2.24: Definición de los monitores de campo.

Una vez terminada la simulación, los resultados asociados a los parámetros S, los monitores de campo eléctrico o campo magnético, la ganancia, etc. Se encuentran en la carpetas 1D Results, 2D/3D Results, Farfields, Tables tal y como se muestra en la Fig. 2.25.



Figura 2.25: Obtención de resultados.

## Capítulo 3

# Propuesta de diseño

## 3.1. Introducción

Las antenas de bocina son un tipo de antena de apertura que se viene utilizando ampliamente debido a su capacidad para proporcionar grandes directividades con un diseño muy sencillo. Sin embargo, uno de sus principales problemas es la distribución no uniforme del frente de fase en la apertura, que presenta una distribución pseudo-radial a partir de un punto ficticio equivalente identificado como centro de fase. Esto resulta en una disminución de la directividad máxima proporcionada. Para lidiar con este problema se han presentado diferentes soluciones en la literatura, como por ejemplo: insertar lentes dieléctricas planas después de la antena [23] o el uso de meta-materiales exóticos alrededor de la apertura de bocina [24]. Ambas soluciones persiguen la conversión del frente de fase a una distribución lo más plana posible. En contraste a las soluciones presentadas anteriormente, la alternativa propuesta en este trabajo consiste en el diseño de una antena de bocina en tecnología SIW capaz de modificar el frente de onda mediante el uso de celdas unidad agujereadas dispuestas de una determinada manera a lo largo de la bocina. De esta forma se implementa una zona de colimado, permitiendo así una corrección del frente de onda y una mejor transición entre el dieléctrico y el aire. Las celdas fuerzan a que la velocidad de onda (o el índice de refracción visto desde la perspectiva de la óptica) aumente (o baje) en las zonas externas para que así se compense la longitud de caminos llegando más o menos en fase a la apertura de la antena. Para soportar la estructura de colimado se utiliza la tecnología planar SIW que permite diseñar una bocina de plano H fácilmente. Además, el comportamiento de los agujeros en aire permitirá bajas pérdidas al eliminar el sustrato.

## 3.2. Diseño de la zona de colimado

El diseño de la antena se construye en torno a la idea de añadir una zona de colimado, la cual es parte fundamental de este trabajo. El área en la que el colimado se dispone transforma el frente de onda pseudo-radial dentro de la bocina en un frente de onda plano en la apertura, tal y como se muestra en la Fig. 3.1. Como consecuencia, esta zona se comporta de forma equivalente a tener una lente dentro de la bocina, con la ventaja de presentar un diseño compacto en comparación con otros diseños de antenas que implementan una lente después de la estructura de la bocina.



Figura 3.1: Esquemático del modelo de la zona de colimado para la antena de bocina en plano H.

Existen múltiples estrategias mediantes las cuales es posible introducir el efecto lente dentro de la zona de colimado de una antena de bocina SIW. De acuerdo a la literatura, la incrustación de vías metálicas [25], [26] y las ranuras inclinadas [27] son propuestas comunes para este tipo de antenas. Sin embargo, estas soluciones o adolecen de un ancho de banda pobre para lo que se espera de una antena de bocina o están basadas en guías de onda modificadas cuyo procedimiento no es tan sencillo como el propuesto en este trabajo.

Como alternativa a estas opciones aquí se propone el diseño de una zona de colimado basada en celdas unidades perforadas con diferentes radios. Durante el desarrollo del diseño se consideraron tres configuraciones diferentes: distribución cartesiana (x, y), distribución radial  $(r, \theta)$  y distribución mixta  $(x, \theta)$ . Estas tres opciones se muestran en la Fig. 3.2 y se detallan a continuación.

• Distribución cartesiana de los radios (x, y): Es la más sencilla en cuanto al cálculo exacto de su comportamiento electromagnético se refiere, considerando el análisis periódicos de los modos propios (*eigenmodes*) de la celda unidad de tamaño  $[p_x, p_y]$ . Sin embargo, puesto que la antena de bocina presenta una geometría radial, el trazado de rayos dentro de la bocina no sigue un mallado cartesiano. Lo que implica que cada una de las perforaciones del mallado tiene que tener su propio radio según el valor de la constante de propagación deseada en ese



Figura 3.2: Opciones de distribución de perforaciones en la zona de colimado de la antena de bocina SIW: Fig. 3.2a distribución cartesiana (x, y), Fig. 3.2b distribución radial  $(r, \theta)$ , y Fig. 3.2c distribución mixta  $(x, \theta)$  con r fijo a las columnas en x y distribución angular uniforme en  $\theta$ .

punto del mallado, lo que se traduce en un aumento de la complejidad del diseño.

- Distribución radial de los radios  $(r, \theta)$ : Esta alternativa proporciona una distribución radial que se adapta perfectamente a la geometría radial de la bocina a expensas de que no se pueda analizar directamente con el solucionador de modos propios (*eigen-modos*) puesto que los bordes de la celda unidad no son paralelos a las direcciones periódicas.
- Distribución mixta de los radios  $(x, \theta)$ : mantiene las ventajas de las dos anteriores; una distribución radial en la dirección de propagación, lo que implica que se necesita el mismo valor del índice de refracción para cualquier agujero en una fila radial determinada, con una distribución igual en columnas (en la dirección x) donde los centros de los agujeros en cada columna están alineados. Esta opción también permite el análisis de la estructura considerando la celda unitaria y es la que finalmente se ha seguido en este diseño (considerando una serie de particularidades descritas en 4.4).

## 3.3. Diseño de la interfaz de transición radiante

El diseño de la zona de transición radiante está basado en los trabajos [28] y [29]. Consiste en una extensión situada en la boca de la antena con el objetivo de suavizar el impacto producido por el cambio de medio: dieléctrico a espacio libre. Tiene de dimensiones la anchura  $A = A_{opt} = 43.64 mm$ , altura h = 1.524 mm y longitud  $L = 5\lambda_g = 26.06 mm$ . El parámetro  $\lambda_g$  hace referencia a la longitud de onda más grande asociada a la mínima frecuencia de trabajo a adaptar y al máximo índice de refracción producido.

La transición está subdividida en cinco partes de longitud una longitud de onda  $(L_{div} = \lambda_g = 5.21 \, mm)$ , cada una de estas cinco partes presenta una ratio metal-dieléctrico diferente que va decreciendo a medida que la transición se extiende al exterior. El esquema de la transición y el parámetro  $S_{11}$  se muestran en la Fig. 3.3 y la Fig. 3.4, respectivamente.



Figura 3.3: Esquemático de la transición desde la apertura de la antena al espacio libre.



Figura 3.4: Parámetro  $S_{11}$  de la transición desde la apertura de la antena al espacio libre.

## 3.4. Diseño de la alimentación: Transición GCPW-SIW

Para alimentar la antena de forma eficiente, se utiliza un conector SMAendlaunch connector y por tanto resulta necesario adaptar el conector a la guía de ondas. En la figura 3.5 se muestra el esquemático de dicha transición.



Figura 3.5: Transición GCPW a SIW: Diseño esquemático. Las dimensiones son:  $W_{G_1} = 0.10 mm$ ,  $W_{L_1} = 0.35 mm$ ,  $W_{G_0} = 0.88 mm$ ,  $W_{L_0} = 0.55 mm$ ,  $W_1 = 0.97 mm$ , y  $L_T = 2.65 mm$ . Figura obtenida de [8]

Esta transición está basada en el trabajo de [8]. Comienza en el lado izquierdo del diseño con un SIW de ancho estrecho y una pareja de líneas de separación paralelas que implementan el GCPW (*Grounded Coplanar Waveguide*). Para optimizar el nivel de transmisión hacia la guía de onda SIW de entrada (lado derecho de la figura 3.5) las anchura de la guía de onda y las líneas de separación se estrechan. Este diseño alcanza un ancho de banda desde 32 GHz hasta 44 GHz ideal para el rango de trabajo de la antena SIW en plano H. En la Fig. 3.6 se muestran los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  de la transición GCPW-SIW.



Figura 3.6: Parámetros S de la transición GCPW-SIW.

# Capítulo 4

# Desarrollo del diseño

## 4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los diversos cálculos que se han debido de llevar a cabo para obtener el prototipo final de la antena de bocina en plano H en tecnología SIW. En primer lugar se profundiza en el cálculo de la estructura de la zona de colimado, a continuación se establece la relación entre la celda unidad y el índice de refracción variable y finalmente se realiza un análisis pormenorizado sobre la distribución de radios mixta  $(x, \theta)$ , introducida previamente en el Cap. 3.

## 4.2. Cálculo de la estructura

Para iniciar el cálculo se va a realizar un análisis geométrico de la estructura. En la figura Fig. 4.1 se muestra la geometría del diseño y se destaca la necesidad de corrección de fase en la zona de colimado. La diferencia de caminos desde el punto focal hasta la apertura entre las diferentes trayectorias angulares se traduce en una diferencia de fase que genera un frente de onda esférico. Si la constante de propagación en el plano normal a la dirección de propagación tiene una distribución uniforme, existe un error de fase desde el centro de la abertura a cualquier otra trayectoria angular, alcanzando su máximo en el límite de la apertura angular de la bocina.

Por lo tanto, si la distribución de la constante de propagación (o índice de refracción) en el plano normal a la dirección de propagación se ajusta adecuadamente, este error de fase puede ser severamente reducido y como consecuencia cada una de las diferentes trayectorias angulares tiene la misma distancia eléctrica a la apertura.

La condición de fase necesaria se deriva del análisis geométrico, dando lugar a:

$$Fase = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left( n_r \Delta r + n_d \Delta d \right) \tag{4.1}$$



Figura 4.1: Zona de colimado: Fig. 4.1a análisis geométrico para la corrección de fase, Fig. 4.1b configuración angular de las celdas unidad.

donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda en el vacío,  $n_r$  y  $n_d$  son los diferentes índices de refracción a lo largo del camino recorrido, y  $\Delta r + \Delta d$  son las distancias recorridas por las dos diferentes zonas. Si como se comentaba con anterioridad, forzamos a que la distancia eléctrica de todas las trayectorias sea la misma, la condición geométrica resultante es:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \left( n_{r_{min}} \Delta r_{min} + n_d \Delta d_{min} \right) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left( n_r \Delta r + n_d \Delta d \right) \tag{4.2}$$

dónde  $n_d = n_{r_{min}}$  es el índice de refracción dentro del sustrato SIW  $(n_{SIW})$ , lo que da a lugar a que el valor máximo de índice de refracción sea  $n_{max} = n_d$ . Entonces, para cualquier trayectoria angular  $(\theta)$ , el índice de refracción deseado es:

$$n_{\theta} = \frac{n_{SIW}(\Delta r_{min} + \Delta d_{min} - \Delta_d)}{\Delta_r} \tag{4.3}$$

Incluyendo la dependencia angular entre los caminos recorridos, el índice de refracción deseado resulta:

$$n_{\theta} = n_{SIW} \left( \cos(\theta) - \frac{\Delta d_{min}}{\Delta r_{min}} \left( 1 - \cos(\theta) \right) \right)$$
(4.4)

Así, el diseño de la zona de colimado implica la definición de la distribución del valor del índice de refracción en el plano normal a la dirección de propagación.

Como resultado la zona de colimado presentada en la Fig. 4.1b está dividida en en base a una distribución mixta de celdas unitarias en 17 columnas,



Figura 4.2: Distribución del índice de refracción en el plano normal a la dirección de propagación, para  $\theta_{max} = 30^{\circ}$ ,  $\Delta d_{min} = 1.5\lambda_0$ ,  $\Delta r_{min} = 3.5\lambda_0$  y  $\varepsilon_{SIW} = 3.55$ .

 $N_y = [1:17]$  y 13 caminos angulares,  $N_x = [-6:1:6]$  cuyos valores de apertura angular son  $\theta = [-27.75^{\circ}, -23.6^{\circ}, -19.3^{\circ}, -14.7^{\circ}, -9.9^{\circ}, -5^{\circ}, 0^{\circ}, 5^{\circ}, 9.9^{\circ}, 14.7^{\circ}, 19.3^{\circ}, 23.6^{\circ}, 27.75^{\circ}]$ . Cuando la dimensión y de la celda dobla su valor (esto sucede en  $N_y = 10$ ) el camino angular se divide dando lugar a dos nuevos caminos angulares y en consecuencia a dos nuevos ángulos de apertura  $\theta$ .

### 4.3. Celda unidad e índice de refracción variable

La celda unidad rectangular perforada de referencia es la representada en la Fig. 4.3 y sus parámetros se han dispuesto de forma que su comportamiento sea el deseado a la frecuencia de trabajo  $f_0 = 40 \, GHz$  con un ancho de banda de  $\Delta f = 10 \, GHz$ , que es la frecuencia de funcionamiento del diseño de la bocina SIW en plano H. Las dimensiones de la celda unidad rectangular utilizada para muestrear la antena mediante una malla 2D son: anchura  $p_x = 1.7 \, mm$  y altura  $p_y = 1.3 \, mm$ . Esto lleva a que por cuestiones de fabricación el radio máximo posible con el que se pueda perforar la celda es de  $r_{max} = 0.55 \, mm$ . A partir de la Ec. 4.4 y en particular de la figura Fig. 4.2 se obtiene la relación fundamental entre el índice de refracción (n) en función del ángulo  $(\theta)$  bajo las condiciones de que el radio de la hendidura es máximo (recuérdese  $r_{max} = 0.55 \, mm$ ).

Para el diseño de la antena se ha utilizado un ángulo de apertura máximo  $\theta_{max} = 27.75^{\circ}$  lo que implica un mínimo índice de refracción (asociado al máximo radio de perforación posible) de  $n_{r_{max}} = 1.643$ . Una vez definidos estos parámetros es posible computar el diagrama de dispersión de la zona





Figura 4.3: Celda unidad: Fig. 4.3a ejemplo del diagrama de dispersión de la zona irreducible  $\Gamma - X - M$  de Brillouin para una celda perforada rectangular de dimensiones:  $p_x = 1.7 mm$  y  $p_y = 1.3 mm$  y un radio de perforación de r = [0.05 - 0.55] mm, y Fig. 4.3b relación del índice de refracción (n) con la frecuencia.

Estas gráficas son fundamentales puesto que permiten relacionar índice de refracción (n) y frecuencia (f) y con ello escoger el radio de perforación adecuado para cada fila.

## 4.4. Zona de colimando: distribución de perforaciones

De acuerdo a lo expuesto en 3.2 la opción escogida para la distribución de los radios es la distribución mixta  $(x, \theta)$ . Esta opción presenta una serie de particularidades que deben ser analizadas en profundidad:

- La celda unidad deforma su estructura rectangular a medida que se avanza en la dirección del rayo.
- La dimensión  $y(p_y)$  de la celda unidad incrementa para las diferentes columnas, mientras que la dimensión  $x(p_x)$  se mantiene constante.

El primer problema puede resolverse seleccionando una celda unidad equivalente, tal y como se muestra en la Fig. 4.4.

Sin embargo, el segundo inconveniente debe considerarse cuidadosamente cuando se analiza la estructura. Dicho análisis puede realizarse mediante el análisis del diagrama de dispersión (tal y como se ha procedido en 4.3) de la celda rectangular equivalente, rotando esta con la intención de alinearla con el rayo angular de propagación, esto se representa en la Fig. 4.4.



Figura 4.4: Celda rectangular equivalente para celdas deformadas.



Figura 4.5: Análisis del diagrama de dispersión considerando la celda unidad rotada de forma que la dirección de propagación esté alineada con la dirección radial, y  $p'_x = p_x/\cos(\theta)$ .

Esta disposición es realmente útil ya que el eje vertical de la celda unidad (y') es ortogonal a la dirección de propagación y la variación en dimensión  $p_y$  tiene un efecto despreciable en el comportamiento de la celda unidad a lo largo de la dirección x', tal y como se demuestra en la Fig. 4.6.



Figura 4.6: Diagrama de dispersión para la dirección x' de propagación cuando  $p'_y$  es variable:  $p'_y = 1.3 - 2.6 \, mm$ . El radio de perforación  $r = 0.25 \, mm$  y  $p'_x = 1.7 \, mm$  son fijos.

Debido a la rotación la celda unidad equivalente ha de ser ensanchada

a un nuevo valor  $p'_x = p_x/\cos(\theta)$ . Así, el diseño de cada fila radial puede hacerse mediante el análisis de la celda equivalente rotada exclusivamente en su dirección x' y para su apropiado nuevo  $p'_x$ . Esta es la aproximación finalmente elegida en el diseño.

En conclusión, el diseño de la zona de colimado se reduce al cálculo del comportamiento de la propagación para cada fila radial. La selección del índice de refracción de cada fila radial se deriva de un problema geométrico analizado mediante el trazado de rayos: los diferentes valores de retardo de fase en el plano de la apertura (debidos a la longitud de cada fila respecto a la apertura) se compensan mediante la constante de propagación a lo largo de la fila. Así mismo, dado que las celdas unitarias perforadas de cada fila radial son idénticas, el diseño de cada fila puede obtenerse analizando la celda unitaria rectangular rotada. En la Fig. 4.7 se muestran los diferentes índices de refracción en función de qué fila radial se ha seleccionado o desde el punto de vista de la celda unidad qué ángulo de apertura  $\theta$  se ha considerado.



Figura 4.7: Rango de los valores del índice de refracción equivalente disponibles para la celda unidad perforada SIW modificando el valor del radio: Fig. 4.7a para una fila radial cuyo ángulo de apertura es  $\theta = 0^{\circ}$  y por tanto,  $p'_x = p_x$ . Fig. 4.7b para una fila radial cuyo ángulo de apertura  $\theta = 27.75^{\circ}$ y por tanto,  $p'_x = p_x/\cos(27.75)$ 

Como se observa en la Fig. 4.7, estos valores de índice de refracción (dependientes del recorrido angular) pueden relacionarse de forma directa con los que proporciona la celda unidad. Los valores del índice de refracción (n) son diferentes dependiendo de qué ángulo de apertura o fila se escoja, siendo especialmente evidentes las diferencias para los valores mayores de

radio de perforación. Por tanto, para obtener una distribución de fase uniforme en la apertura y en consecuencia un frente de onda plano, establecer la relación entre las celdas unidad y sus perforaciones resulta fundamental. La implementación del diseño completo de la zona de colimado produce una distribución de campo plana en la apertura de la bocina, tal y como se muestra en la Fig. 4.8, el frente de onda llega con una diferencia de fase muy pequeña, lo que hace que la directividad aumente su valor con respecto a la antena diseñada sin zona de colimado, véase el Cap. 6.



Figura 4.8: Resultados del diseño a 40 GHz: Fig. 4.8a Distribución de fase 3D a lo largo de la antena de bocina SIW en plano H, Fig. 4.8b Distribución de fase 3D a lo largo de la antena de bocina óptima en plano H diseñada en 2.6 sin zona de colimado, Fig. 4.8c distribución de fase a lo largo del eje Y en la apertura de la antena de bocina.

# Capítulo 5

# Prototipado

## 5.1. Introducción

Diseñadas las láminas finales que conforman la antena compuestas por un conector SMP con una transición GCPW a guía SIW, el cuerpo de la antena y la transición al aire libre, se deben fabricar comercialmente y posteriormente caracterizarse.

## 5.2. Prototipado

En la Fig. 5.1 se muestra el esquema del diseño completo de la antena: alimentación, colimado y transición al aire. En la Fig. 5.2 se muestran los esquemas en detalle de la transición al aire Fig. 5.2a y el conector SMP con transición GCPW a guía SIW Fig. 5.2b.



Figura 5.1: Esquema de la antena.



Figura 5.2: Fig. 5.2a Transición al aire y Fig. 5.2b conector SMP con transición GCPW a guía SIW .

En la Fig. 5.3 se muestra el plano que se ha enviado a fabricar. En la lámina, fuera del cuerpo de la antena, hay 6 agujeros de los cuales los 4 situados en las esquinas sirven sirven como sujeción para poder apilar varias de estas antenas y formar un array, esto se detalla en [8], y los 2 restantes más cercanos a la guía son para el conector.

#### 5.2.1. Extracción de los gerbers

Diseñadas las diferentes láminas que componen la antena con la posición de las vías y los agujeros, el siguiente paso es extraer los *gerbers*. Los *gerbers* son ficheros que contienen la información necesaria para fabricar comercialmente circuitos impresos en PCB.



Figura 5.3: *Gerbers*: Fig. 5.3a Vista Top, Fig. 5.3b vista Bottom y Fig. 5.3c vista conjunta con las perforaciones de aire en color rojo.

## 5.3. Prototipo y proceso de caracterización.

Una vez generados los ficheros de fabricación, se envían a un fabricante comercial para la realización del prototipo. En concreto, se han fabricado 8

antenas. Recibidas las antenas, se montan y caracterizan en la cámara anecoica del Laboratorio Singular de Comunicaciones 5G del CITIC-UGR. Las antenas han sido caracterizadas en parámetro de reflexión, diagramas de radiación para frecuencias de interés y ganancia real obtenida, posteriormente estos resultados han sido comparados con las simulaciones (véase Cap. 6). En la Fig. 5.4 se muestra una imagen de la antena fabricada.



Figura 5.4: Antena fabricada.

#### 5.3.1. Entorno

El laboratorio dispone de una cámara anecoica y una zona de montaje, así como de todos los materiales necesarios, conectores y tornillería para realizar el montaje que se muestra en la Fig. 5.5.

Para la realización del montaje la antena se acopla al banco de pruebas de la cámara anecoica y se conecta al analizador de redes (VNA) modelo ZVA-67 de Rohde & Schwarz. Previamente se han calibrado los conectores y cables con los tres procesos OPEN (O), SHORT (S) y LOAD (L). En O se conecta un abierto eléctrico al cable, en S un corto eléctrico y en L una carga adaptada. Este proceso de calibración habilita la obtención de los parámetros  $|S_{11}|$  desde la referencia calibrada, permitiendo eliminar errores por reflexiones en puertos, cables o conectores. Para la caracterización de los diagramas de radiación y ganancia se han utilizado dos puertos (uno de transmisión y otro de recepción) del VNA y el banco de medida donde se ha alineado la antena mediante láser, véase Fig. 5.5b. Dicho banco dispone de



Figura 5.5: Procesos en la cámara anecoica: Fig. 5.5a Cámara anecoica y Fig. 5.5b alineación por láser y Fig. 5.5c proceso de medida de diagramas

un sistema esférico conformado por: un montor de giro horizontal y otro de rotación de la antena. A través del movimiento de cada uno de los motores se obtienen los diversos cortes que marcan los diagramas principales, expresado de otro modo, cómo la energía radiada se reparte para cada configuración espacial.

## Capítulo 6

# Medidas y validación

Una vez completado el proceso de diseño desarrollado en los capítulos Cap. 3 y Cap. 4, y recibida la antena por parte del fabricante se procede a la comprobación empírica de los resultados obtenidos en las simulaciones.

## 6.1. Problemática r = 0.1 mm

A la hora de la construcción de la antena sucede un problema de fabricación y no es posible realizar perforaciones de radio r = 0.1 mm por ser demasiado pequeñas. Con la intención de comprobar el efecto de este ligero cambio se realizan las simulaciones pertinentes, véase Fig. 6.1 y Fig. 6.2.



Figura 6.1: Comparación de parámetros S entre el prototipo de antena con radios de tamaño r = 0.1 mm y sin ellos.

Tal y como se observa en la Fig. 6.1 y la Fig. 6.2 las diferencias entre el prototipo que incluye los radios y el que no los incluye son mínimas y además se manifiestan altas frecuencias fuera de la banda de trabajo. Es-



Figura 6.2: Comparación de la ganancia simulada en función de la frecuencia para el prototipo de antena con radios de tamaño r = 0.1 mm y sin ellos.

te comportamiento era el que se esperaba puesto que la contribución a la modificación del frente de onda por radios de tamaño r = 0.1 mm es escasa debido a que la proporción aire-dieléctrico en la celda unidad asociada a un radio de perforación r = 0.1 mm es muy pequeña.

### 6.2. Caracterización

Una vez solucionado el problema de los radios r = 0.1 mm se procede a comparar la antena fabricada y medida en el laboratorio con dos diseños: antena tipo bocina basada en colimado de campo en tecnología SIW (diseño final de este proyecto) y antena de bocina óptima en tecnología SIW sin zona de colimado (la diseñada en Sec. 2.6).

#### 6.2.1. Ganancia en frecuencia

La ganancia en frecuencia de la antena de bocina propuesta en este trabajo se muestra en la Fig. 6.3. En esta figura también se incluyen los resultados de simulación de la antena de bocina en plano H sin zona de colimado así como los resultados de simulación del prototipo enviado a fabricar. Los valores de ganancia representados se corresponden con la dirección de máxima radiación ( $\phi$ ,  $\theta$ ) que se obtiene para: ( $\phi$ ,  $\theta$ ) = (0°, 0°). Resulta evidente la mejora introducida por la zona de colimado con respecto al modelo de antena de bocina óptima sin zona de colimado, hay un aumento de ganancia de 2.8*dBi* de media, para más detalle en la Fig. 6.4 se representan los diagramas de radiación 3-D a una frecuencia f = 40 GHz (frecuencia central de la banda de trabajo) de la antena de bocina en plano H con zona de colimado y sin zona de colimado. En relación con la antena medida en el laboratorio y su homóloga en simulación (antena de tipo bocina en plano H basada en colimado de campo en tecnología SIW para milimétricas), se observan unos resultados mínimamente mejores en simulación a los finalmente obtenidos en el laboratorio, estas pequeñas diferencias se deben a las condiciones no ideales de la realidad frente a la simulación por lo que es posible afirmar que en términos de ganancia la zona de colimado tiene un desempeño superlativo.



Figura 6.3: Comparación de la ganancia en frecuencia entre: antena fabricada, antena con zona de colimado y antena sin zona de colimado.



Figura 6.4: Diagramas de radiación 3-D con modelo incluido: Fig. 6.4a antena de tipo bocina en plano H con zona de colimado y Fig. 6.4b antena de tipo bocina en plano H sin zona de colimado.

En la Fig. 6.4 se observa lo representando para todo el ancho de banda en la Fig. 6.3: la antena basada en colimado presenta un lóbulo más estrecho y por tanto es más directiva que su homóloga sin colimado.

#### **6.2.2.Parámetros**S

En la Fig. 6.5 se muestra el parámetro  $|S_{11}|$  de la antena fabricada frente a la simulación. El parámetro  $|S_{11}|$  resulta bastante similar, un poco mejor para la antena medida en el laboratorio. La banda en ambos casos se encuentra entre los 34 GHz y 44 GHz, por tanto, se ha conseguido un ancho de banda de 10 GHz tal y como se planteó en el Cap. 3. Para el cálculo del ancho de banda se ha tomado como frecuencia inferior aquella a partir de la cual el resto de frecuencias hasta la frecuencia de superior presentan un parámetro  $|S_{11}| < 10 \, dB$ , y como frecuencia superior aquella que tras la frecuencia inferior provoca un parámetros  $|S_{11}| > 10 \, dB$ .



Figura 6.5: Parámetro  $|S_{11}|$  de la antena de bocina en plano H basada en colimado de campo (simulado y medido). En línea negra discontinua el límite habitual que marca el valor de este parámetro como admisible:  $|S_{11}| = -10 \, dB$ .

#### 6.2.3. Diagramas de radiación

Aprovechando al máximo la infraestructura existente en el Laboratorio 5G, se han analizado las características de radiación de la antena. En particular, se muestran las características de radiación plano H de las frecuencias  $f_1 = 36 GHz$ ,  $f_2 = 40 GHz$  y  $f_3 = 44 GHz$  que representan la frecuencia inferior, frecuencia mediana y frecuencia superior del ancho de banda, respectivamente.

En la Fig. 6.6, se muestran los diagramas de radiación plano H en 2-D, en todos ellos se observa una alta directividad en comparación con el diseño de antena de bocina óptima sin zona de colimado.



Figura 6.6: Diagrama de radiación en 2-D en plano H para la antena medida en el laboratorio, la antena de bocina en plano H con zona de colimado simulada y la antena de bocina sin zona de colimado simulada a diferentes frecuencias:  $f_1 = 36 \, GHz$  Fig. 6.6a,  $f_2 = 40 \, GHz$  Fig. 6.6b y  $f_3 = 44 \, GHz$  Fig. 6.6c.



Figura 6.7: Diagrama de radiación en 3-D para la antena medida en el laboratorio a las frecuencias: Fig. 6.7a  $f_1 = 36 \, GHz$ , Fig. 6.7b  $f_2 = 40 \, GHz$  y Fig. 6.7c  $f_3 = 44 \, GHz$ .
# Capítulo 7

# Planificación y costes

En este capítulo se detalla la estructura del trabajo seguida en el proyecto y el presupuesto del prototipo. En primer lugar, se hace referencia a los recursos utilizados, incluyendo recursos humanos como recursos software y hardware. Para detallar la planificación temporal se hará uso de un diagrama de Gantt.

## 7.1. Recursos

Dentro de recursos distinguimos principalmente dos tipos: personal o recursos humanos y recursos software o hardware.

#### 7.1.1. Recursos humanos

Los recursos humanos involucran a todas las personas que han participado de forma directa en el proyecto y por tanto incurren en costes por sus salarios, estos salarios depende del tiempo dedicado, el puesto o cargo y el nivel de titulación que se ostenta. Las personas involucradas en el contexto de este trabajo han sido: Pablo Padilla de la Torre, como tutor del proyecto, Cleofás Segura Gómez, como cotutor del proyecto, y Andrés Biedma Pérez como ejecutor del mismo. Pablo Padilla de la Torre es profesor del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada y Cleofás Segura Gómez investigador predoctoral (FPU) del Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones del Compartamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada. Andrés Biedma Pérez es alumno del Grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y Telecomunicaciones (ETSIIT) de la Universidad de Granada. Con una retribución de ingenierio junior.

#### 7.1.2. Recursos de hardware y software

El recurso hardware más utilizado en el proyecto es un ordenador portátil de la compañía HP cuvo modelo es HP Pavilion - 15 - cx0054ns con sistema operativo Windows 10 - Home y procesador i5-8300H que trabaja a  $2.30 \, GHz$ , memoria RAM  $20 \, GB$  y memorias de almacenamiento HDD de 1TB y SDD 512 GB. Su valor de mercado en 2018 era de 660  $\in$ , con una vida útil de 7 años. Esta computadora de alta potencia se ha usado para poder utilizar el software de simulación CST STUDIO implicado en el proyecto. El recurso software no incluido con el hardware es CST STUDIO 2020 que pertenece a la compañía 3DS (Dassault Systems) y la licencia educativa se estima en 800 € anuales. Para el post-procesado de datos, cálculos y redacción de entregas para el correcto ciclo del proyecto y redacción de la memoria se han utilizado programas de software libres y gratuitos en red cuyo costo a nivel de usuario es cero como LibreOffice u Overleaf, así mismo se ha hecho uso de una licencia de estudiante del software MatLab con un coste aproximado de 37 €. El último recurso utilizado es el Laboratorio Singular de comunicaciones 5G del CITIC-UGR el cual tiene un coste aproximado de 1.820.915 €, estimado con proyectos de infraestructura recibidos para la construcción del mismo. Para este proyecto se han utilizado 24 horas de los recursos del laboratorio como cámara anecoica y herramientas para el montaje, por lo que hay que computar estas 24 horas sobre la amortización del precio del laboratorio (a 10 años, 1720 horas anuales laborables).

### 7.2. Planificación

Para la correcta ejecución del proyecto ha sido necesario asignar las tareas y establecer su duración temporal. En el caso de que por alguna circunstancia no se hubiera cumplido con el plazo asignado se ha realizado un reajuste del proyecto. Estos reajustes han tenido consecuencias tales como aumento de inversión en recursos tanto humanos como de *software* y *hardware*. Las fases establecidas fueron:

- **Tarea 1 Trabajo inicial**: Consiste en todo el trabajo previo que hay que realizar relativo al estudio del arte, comprobación de errores y ventajas de trabajos previos.
- Tarea 2 Diseño de antena de bocina óptima en plano H con tecnología SIW: Se diseña una antena de bocina óptima en plano H con el objetivo de familiarizarse con la aplicación de los conceptos estudiados durante el grado y el *software* CST.
- Tarea 3 Diseño de la zona de colimado y perforaciones: Consiste en todo lo relativo al cálculo y procesamiento de datos obtenidos a partir de los resultados de simulación de la celda unidad, solución

geométrica del problema y cálculo de la dimensiones de los radios de perforación.

- Tarea 4 Transición al aire y alimentación: Trabajo asociado al diseño y simulación de la transición al aire y alimentación de la antena.
- **Tarea 5 Simulaciones finales**: Simular los diferentes prototipos con sus requisitos.
- **Tarea 6 Prototipado y medidas**: Todas las tareas relacionadas con el prototipado y la caracterización del diseño final.
- Tarea 7 Escritura del proyecto: Escritura de la memoria final.

El plazo temporal del proyecto ha sido desde septiembre de 2021 hasta julio de 2022. Las horas dedicadas por Andrés Biedma Pérez han ido variando a medida que avanzaba el proyecto. Desde septiembre de 2021 hasta febrero de 2022 dedicación de 12 horas semanales (6 meses), desde marzo de 2022 hasta mayo de 2022 dedicación de 16 horas semanales (3 meses), desde junio de 2022 hasta julio de 2022 dedicación de 8 horas semanales (2 meses). Lo que suma un total de 544 horas de dedicación totales al proyecto. Para el tutor, Pablo Padilla de la Torre, se estima que la dedicación ha sido un 15% de las horas totales, lo que da lugar a 81.6 horas, mientras que para el cotutor, Cleofás Segura Gómez, se estima un 5% de las horas totales dando lugar a 27.2 horas dedicadas al proyecto.

### 7.2.1. Diagrama de Gantt

Las diferentes fases del proyecto se establecen temporalmente de acuerdo a la Fig. 7.1.

Tareas \ Meses	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.
Trabajo Inicial	Estudio del arte.	Estudio del arte.									
Diseño de antena de bocina óptima en plano H con SIW		Familiarización con CST.	Diseño de antena.								
Celda unidad, zona de colimado y perforaciones				Solución geométrica del problema	Simulaciones celda unidad.	Procesado de datos.					
Transición al aire y alimentación						Diseño transición al aire	Diseño alimentación				
Simulaciones finales								Simulaciones finales			
Prototipado y medidas								Envío al fabricante	Medidas en el laboratorio		
Escritura del proyecto			Escritura del proyecto		Escritura del proyecto		Escritura del proyecto			Escritura del proyecto	Escritura del proyecto

Figura 7.1: Diagrama de Gantt.

### 7.3. Costes

En esta sección detallan los costes del proyecto en profundidad. En lo que respecta a los **recursos humanos** se establece que para un ingeniero técnico sin experiencia un salario de  $36 \in$  brutos por hora, para un ingeniero superior sin experiencia un salario de  $50 \in$  brutos por hora mientras que un ingeniero superior con doctorado y experiencia un salario de  $75 \in$  brutos por hora. Por tanto, el resultado de los costes de recursos humanos asciende a  $27064 \in$  repartidos en base a la cualificación, titulación y horas dedicadas al proyecto por parte de cada persona (544 horas para el personal técnico sin experiencia, 27.2 horas para el personal superior sin experiencia y 81.6 horas para el personal superior con doctorado y experiencia). Concretamente el autor del proyecto tiene un coste de 19584  $\in$ , el cotutor tiene un coste de 1360  $\in$  y el tutor un coste de 6120  $\in$ .

En cuanto a los **recursos de herramientas** se debe amortizar el valor del hardware y software. Los únicos programas con coste son CST STUDIO que tiene un valor de  $800 \in$  por año de licencia, como el uso ha sido de 544 horas de trabajo sobre las 1720 horas laborables se debería pagar un precio de 253,  $02 \in$  de amortización y MatLab que tiene un valor de 37  $\in$ por año de licencia lo que daría lugar a pagar un precio de 11.47  $\in$  de amortización. El precio del ordenador está amortizado sobre su vida útil, por tanto  $660 \in$  sobre 5 años de vida útil da lugar a pagar un coste de 41, 79  $\in$  de amortización. El uso dado sobre las infraestructuras (24 horas laborables) debe amortizarse,  $1.820.915 \in$  en 10 años laborables da lugar a un coste de 5081,  $62 \in$  de amortización.

Por último, el presupuesto de **fabricación** debe añadirse. La empresa contactada para la fabricación ha sido "KingsBrother Express Manufacturing Services" [30] cuyo coste depende del material y del número de unidades deseadas. Para este proyecto se realizó un pedido de 8 unidades con un medio<sup>1</sup> de 57,32  $\in$ /unidad y un gasto de 80  $\in$  asociado al transporte.

#### 7.3.1. Presupuesto

En la Tab. 7.1 se resume el presupuesto final con todos los costes detallados anteriormente. La suma total del presupuesto de este proyecto asciende a  $32.990,69 \in$ .

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Este coste medio se reduce a medida que se fabrican antenas, el proceso de fabricación tiene unos gastos fijos iniciales por la carga y el diseño de los planos de la antena que se ha incluido en el precio medio de la misma.

Presupuesto	Tipo	Precio	Cantidad	Precio	
Tiesupuesto	ripo	Unitario	Cantilada	Acumulado	
	Ingeniero Superior Doctor	75 €/h	81,6	6.120 €	
Recursos Humanos	Ingeniero Superior sin experiencia	50 €/h	27,2	1.360 €/h	
	Ingeniero Técnico	36 €/h	544	19.584 €	
	Total (Recursos Humanos)			27.064,00 €	
	CST STUDIO	800 €	544 h / 1 año	253,02 €	
	MatLab	37 €	544 h / 1 año	11,70 €	
Herramientas	Ordenador	660 €	544 h / 5 años	41,79 €	
	Infraestructura	1.820.915 €	$24~\mathrm{h}$ / $10~\mathrm{años}$	5.081,62 €	
	Total (Re	5.388,13 €			
	Antena	57,32 €	8	458,56 €	
Prototipado	Transporte	80 €	1	80 €	
	Te	538,56 €			
	32.990,69 €				

Cuadro 7.1: Presupuesto del proyecto.

# Capítulo 8

# Conclusiones y lineas futuras

Una vez completado el proyecto se procede a dar una explicación concisa de los resultados obtenidos así como proponer las posibles futuras líneas a seguir para profundizar a raíz de este proyecto.

### 8.1. Conclusiones y principales resultados

Este proyecto ha concluido de forma exitosa puesto que ha sido posible fabricar y medir el diseño completo de la antena de bocina en plano H con zona de colimado en tecnología SIW, obteniendo unos muy buenos resultados en términos de parámetros S, ancho de banda y ganancia.

#### Diseño y simulación

Con el uso de tecnología SIW se comenzó por diseñar una antena de bocina óptima en plano H. Una vez diseñada, se introdujeron las perforaciones y posteriormente la transición al aire y la alimentación CWGP-SIW. En la fase inicial el proyecto se pensó para utilizar solamente 5 ángulos de apertura  $(\theta)$ , los resultados obtenidos en simulación fueron buenos y posteriormente se decidió subdividir dichos ángulos de apertura a partir del momento en el que la celda unidad doblase su tamaño en dirección y, generando a su vez una subdivisión de la zona de colimado. El único inconveniente surgió a la hora de fabricar el diseño, uno de los radios era demasiado pequeño (r = 0.1 mm) y el fabricante no es capaz de realizar dicha perforación, por lo que se tuvieron que volver a realizar las simulaciones para ver como esta variación pudiera afectar al diseño, tal y como se ha detallado en el Cap. 6, estas modificaciones resultaron insignificantes. El diseño de la antena final con las subdivisiones de la zona de colimado y sin las perforaciones de radio r = 0.1 mm se muestra en la Fig. 8.1.



Figura 8.1: Diseño 3D de la antena en plano H con zona de colimado en tecnología SIW.

Tras las simulaciones del prototipo a fabricar se obtuvieron los siguientes resultados:

- Frecuencia Central: 40 GHz
- Ancho de banda: 8.4*GHz*
- Ganancia promedio: 12.3 dBi
- Mejora de ganancia promedio con respecto a la antena de bocina óptima sin zona de colimado: +3.4 dBi

#### Fabricación y caracterización del prototipo

Con el objetivo de medir y caracterizar la antena se procedió a la fabricación. Para ello fue necesario obtener los ficheros *Gerbers* (planos de fabricación) y *Drill* (planos de taladrado). Una vez fabricada y recibida la antena se realizaron las mediciones pertinentes en la cámara anecoica del Laboratorio Singular de Comunicaciones 5G del CITIC-UGR. Los resultados de dichas medidas fueron:

- Frecuencia Central: 38.95 GHz
- Ancho de banda:  $10.5\,GHz$
- Ganancia promedio: 12.9 dBi

Las pequeñas diferencias entre los resultados obtenidos en simulación y los obtenidos en el laboratorio son coherentes. El aumento de ancho de banda

medido en el laboratorio se traduce en una reducción de la ganancia y de la frecuencia central, en cualquier caso tanto los resultados de simulación como las mediciones se encuentran dentro de los márgenes esperados.

En Tab.8.1 se muestra una comparación entre la antena de apertura tipo bocina basada en colimado de campo en tecnología SIW para milimétricas con otras estructuras del estado del arte de corrección de fase integrada.

Ref.	Banda de Frecuencia (GHz)	Tecnología	Aproximación de diseño	Ganancia Media (dBi)
[25]	35.5	SIW	Trazado de rayos	2.3
[27]	$32-38.5\ (18.4\%)$	SIW	Trazado de rayos	2
[31]	26.5 -29.5 (10.71%)	SIW	Optimización y estructuras SW	2.7
Este trabajo	33.7 - 44.2 (27%)	SIW	Trazado de rayos y colimado	2.4

Cuadro 8.1: Comparación entre el diseño propuesto y estructuras del estado del arte con corrección de fase integradas.

## 8.2. Futuras líneas de investigación

La tecnología SIW tiene grandes aplicaciones por las ventajas frente a otras tecnologías ya explicadas en el Cap. 2. Es una tecnología impresa que mediante el uso de sustratos es capaz de proporcionar aumentos de eficiencia manteniendo o implementando guías de onda casi sin pérdidas a través de orificios metálicos sobre dicho sustrato. La antena construida en este proyecto pretendía mejorar las características de radiación una antena de bocina óptima en plano H mediante corrección de fase integrada en tecnología SIW a través de perforaciones metálicas, sin embargo, todavía es posible llegar un poco más lejos y mejorar la característica de radiación en plano E mediante un *array* de antenas, con dicho objetivo en mente se pidieron fabricar 8 antenas y es una tarea que queda para el futuro. Otra línea interesante sería la de plantear el mismo diseño con la salvedad de sustituir las perforaciones metálicas por incrustaciones de metal. El objetivo sería el mismo: corregir la fase de forma integrada en la propia antena.

Como colofón, este trabajo ha dado lugar a una contribución científica al IEE TAP que se encuentra en proceso de revisión en colaboración con: Pablo Padilla de la Torre (tutor), Cleofás Segura Gómez (cotutor) y Ángel Palomares Caballero, a los que quisiera agradecer la oportunidad que me dieron proponiéndome este trabajo, el tiempo que han empleado en enseñarme a investigar en ingeniería y el maravilloso trato que he recibido por su parte.

# Bibliografía y Referencias

- A. P. Mangones, J. Torres, H. Bula, T. P. Di Santis, and N. P. García, "Optimización de un arreglo circular de antenas con distribución continua de corriente de alimentación, utilizando pso (particle swarm optimization)," Univ. Cienc. Tecnol, vol. 20, no. 81, 2017.
- M. Olmo and R. Nave, "Clasificación de la polarización." [Online]. Available: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/ polclas.html
- [3] S. S. Sabri, B. H. Ahmad, and A. R. Othman, "A review of substrate integrated waveguide (siw) bandpass filter based on different method and design," 2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE), pp. 210–215, 2012.
- [4] F. Parment, A. Ghiotto, T.-P. Vuong, J.-M. Duchamp, and K. Wu, "Low-loss air-filled substrate integrated waveguide (siw) band-pass filter with inductive posts," in 2015 European Microwave Conference (EuMC). IEEE, 2015, pp. 761–764.
- [5] M. Camacho, R. C. Mitchell-Thomas, A. P. Hibbins, J. R. Sambles, and O. Quevedo-Teruel, "Mimicking glide symmetry dispersion with coupled slot metasurfaces," *Applied Physics Letters*, vol. 111, no. 12, p. 121603, Sep. 2017.
- [6] Q. Chen, F. Ghasemifard, G. Valerio, and O. Quevedo-Teruel, "Modeling and dispersion analysis of coaxial lines with higher symmetries," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 10, pp. 4338–4345, 2018.
- [7] "Boolean operations," http://www.mweda.com/cst/cst2013/ mergedProjects/CST\_PARTICLE\_STUDIO/common\_overview/ common\_overview\_boolean.htm, accessed: 2022-6-4.
- [8] C. Segura-Gómez, Palomares-Caballero, and P. Padilla, "Efficient design of h-plane siw horn antenna array at mmwaves," in 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2022, pp. 1–4.

- [9] M. Castells and C. Gimeno, La sociedad red, ser. Bibliografía Básica Cátedra Rosarista. Alianza, 2005, no. v. 1. [Online]. Available: https://books.google.de/books?id=hWLkwAEACAAJ
- [10] S. Zuboff, A. Santos, and A. Mosquera, La era del capitalismo de la vigilancia: la lucha por un futuro humano frente a las nuevas fronteras del poder, ser. Estado y Sociedad. Paidós, 2020. [Online]. Available: https://books.google.de/books?id=kBjgzQEACAAJ
- [11] U. Secretariat, "Progress achieved in the activities related to the advance technology alert system : report of the secretariat." UN: The United Nations, New York, Tech. Rep., Mar 1984. [Online]. Available: http://digitallibrary.un.org/record/66680
- [12] V. Nationen, Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development : A/RES/70/1. United Nations, Division for Sustainable Development, 2015. [Online]. Available: https: //books.google.de/books?id=N8l2zQEACAAJ
- [13] H. Friis, "A note on a simple transmission formula," Proceedings of the IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, May 1946.
- [14] A. Aznar, J. Robert, J. Casals, L. Roca, S. Boris, and M. Bataller, Antenas. Universitat Politecnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica, 2004. [Online]. Available: https://books.google.de/books? id=r2sjWIcZhDQC
- [15] C. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design. Wiley, 2016. [Online]. Available: https://books.google.de/books?id=iFEBCgAAQBAJ
- [16] A. Roederer, E. Farr, L. Foged, M. Francis, R. Hansen, R. Haupt, and K. Warnick, "Ieee standard for definitions of terms for antennas," *IEEE Std* 145-2013 (*Revision of IEEE Std* 145-1993), pp. 1–50, 2014.
- [17] H. A. Lorentz, ", "the theorem of poynting concerning the energy in the electromagnetic field and two general propositions concerning the propagation of light,"," *er Akademie der Wetenschappen*, vol. 4, p. 176, 1896.
- [18] J. Kraus, Antennas, ser. Electrical engineering series. McGraw-Hill, 1988. [Online]. Available: https://books.google.de/books?id= JHEbPQAACAAJ
- [19] C.-T. Tai and C. Pereira, "An approximate formula for calculating the directivity of an antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 24, no. 2, pp. 235–236, 1976.

- [20] P.-S. Kildal, E. Alfonso Alos, A. Valero-Nogueira, and E. Rajo-Iglesias, "Local metamaterial-based waveguides in gaps between parallel metal plates," *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, vol. 8, pp. 84 – 87, 02 2009.
- [21] K. Wu, D. Deslandes, and Y. Cassivi, "The substrate integrated circuits - a new concept for high-frequency electronics and optoelectronics," in 6th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, 2003. TELSIKS 2003., vol. 1, 2003, pp. P–III.
- [22] N. Ranjkesh and M. Shahabadi, "Reduction of dielectric losses in substrate integrated waveguide," *Electronics Letters*, vol. 42, pp. 1230 – 1231, 11 2006.
- [23] M. K. T. Al-Nuaimi, W. Hong, and Y. Zhang, "Design of highdirectivity compact-size conical horn lens antenna," *IEEE Antennas* and Wireless Propagation Letters, vol. 13, pp. 467–470, 2014.
- [24] Z. Tao, W. X. Jiang, H. F. Ma, and T. J. Cui, "High-gain and highefficiency grin metamaterial lens antenna with uniform amplitude and phase distributions on aperture," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 1, pp. 16–22, 2018.
- [25] L. Wang, X. Yin, S. Li, H. Zhao, L. Liu, and M. Zhang, "Phase corrected substrate integrated waveguide h-plane horn antenna with embedded metal-via arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 4, pp. 1854–1861, Apr. 2014.
- [26] Yin Zhang, Jing-Ya Deng, Dongquan Sun, Jia-Yuan Yin, and Li-Xin Guo, "Compact slow-wave siw h-plane horn antenna with increased gain for vehicular millimeter wave communication." *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2021.
- [27] L. Wang, M. Esquius-Morote, H. Qi, X. Yin, and J. R. Mosig, "Phase corrected h-plane horn antenna in gap siw technology," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 1, pp. 347–353, Jan. 2017.
- [28] C. Segura-Gómez, Palomares-Caballero, A. Alex-Amor, J. Valenzuela-Valdés, and P. Padilla, "Modular design for a stacked siw antenna array at ka-band," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 158568–158578, 2020.
- [29] L. Wang, M. Garcia-vigueras, M. FOLGUEIRAS, and J. Mosig, "Wideband h-plane dielectric horn antenna," *IET Microwaves, Antennas Propagation*, vol. 11, 04 2017.

- [30] [Online]. Available: https://en.kingbrother.com/302.html
- [31] Y. Zhang, J.-Y. Deng, D. Sun, J.-Y. Yin, and L.-X. Guo, "Compact slow-wave siw h-plane horn antenna with increased gain for vehicular millimeter wave communication," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 7, pp. 7289–7293, 2021.