



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

Diseño de guías de onda rectangulares de bajo peso  
mediante fabricación aditiva

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación

AUTOR/A: Rovira Giménez, Marta

Tutor/a: Esteban González, Héctor

Cotutor/a: Herraiz Zanón, David

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



## Resumen

Este TFG con título “Guía de onda rectangular perforada” tiene como objetivo la creación de un prototipo de guía de onda rectangular perforada y su fabricación a través de impresión 3D. A través del software CST, se creará un modelo de guía de onda que intentará reducir el peso de la estructura de la guía, manteniendo sus propiedades o respuesta eléctrica en comparación con una guía de onda tradicional. Para la obtención de esto, se realizarán diversos barridos paramétricos para evaluar los parámetros que afectan más a la respuesta eléctrica de la guía de onda.

El trabajo comienza con un estudio de diferentes diseños de guía de onda perforados, con su estudio previo y selección del diseño final.

Además, se va a crear una optimización multiobjetivo a través de *Matlab*, capaz de encontrar el diseño óptimo correspondiente a los prototipos realizados, con el fin de obtener un resultado preciso.

Y finalmente, mediante la empresa Desktop Metal, se fabricarán los prototipos diseñados por nosotros, para un posterior análisis de los resultados, con el fin de compararlos, estudiarlos y validarlos con los simulados mediante CST, con el fin de encontrar un prototipo válido.



## Resum

Aquest TFG amb títol “Guia d'ona rectangular perforada” té com a objectiu la creació d'un prototip de guia d'ona rectangular perforada i la seua fabricació a través d'impressió 3D. A través del programa CST, es crearà un model de guia d'ona que intentarà reduir el pes de l'estructura de la guia, mantenint les seues propietats o resposta elèctrica en comparació amb una guia d'ona tradicional. Per a l'obtenció d'aquest, es realitzaran diversos escombratges paramètrics per a avaluar els paràmetres que afecten més la resposta elèctrica de la guia d'ona.

El treball comença amb un estudi de diferents dissenys de guia d'ona perforats, amb el seu estudi previ i selecció del disseny final.

A més, es crearà una optimització multiobjectiu a través de *Matlab*, capaç de trobar el disseny òptim corresponent als prototips realitzats, amb la finalitat d'obtindre un resultat precís.

I finalment, mitjançant l'empresa Desktop Metall, es fabricaran els prototips dissenyats per nosaltres, per a una posterior anàlisi dels resultats, amb la finalitat de comparar-los, estudiar-los i validar-los amb els simulats mitjançant CST, amb la finalitat de trobar un prototip vàlid.



## Abstract

This TFG with the title "Perforated rectangular waveguide" aims to create a prototype of a perforated rectangular waveguide and its fabrication through 3D printing. Through CST software, a waveguide model will be created that will try to reduce the weight of the waveguide structure while maintaining its properties or electrical response compared to a traditional waveguide. In order to obtain this, several parametric sweeps will be performed to evaluate the parameters that most affect the electrical response of the waveguide.

The work starts with a study of different perforated waveguide designs, with their pre-study and selection of the final design.

In addition, a multi-objective optimization is going to be created through *Matlab*, capable of finding the optimal design corresponding to the prototypes made, in order to obtain an accurate result.

And finally, through the company Desktop Metal, the prototypes designed by us will be manufactured, for a later analysis of the results, in order to compare, study and validate them with those simulated by CST, in order to find a valid prototype.





## Índice

Capítulo 1.	Introducción.....	6
1.1	Antecedentes .....	6
1.2	Objetivos .....	8
1.3	Metodología .....	8
1.4	Estructura .....	9
Capítulo 2.	Guía de onda rectangular.....	10
2.1	Definición.....	10
Capítulo 3.	Impresión 3D en microondas .....	17
3.1	Tipos de impresión.....	17
3.2	Aplicación de las técnicas de impresión 3D al campo de las microondas .....	27
3.3	Técnica de impresión utilizada .....	29
Capítulo 4.	Optimización multiobjetivo.....	32
4.1	Conceptos de Optimización Multiobjetivo .....	32
4.2	Algoritmos de optimización.....	33
4.3	Optimización Multiobjetivo .....	34
Capítulo 5.	Simulación Electromagnética.....	36
Capítulo 6.	Diseño de la guía 3D perforada.....	42
6.1	Estructura de la guía perforada .....	42
6.1.1	Planteamiento de un primer diseño.....	42
6.1.2	Diseño final de la guía rectangular con perforaciones.....	44
6.2	Análisis paramétrico y evaluación de resultados .....	49
6.3	Optimización multiobjetivo y selección del diseño final.....	58
Capítulo 7.	Fabricación y medidas.....	61
7.1	Fabricación de los primeros dispositivos .....	61
7.2	Medidas .....	67
Capítulo 8.	Conclusiones .....	75
Capítulo 9.	Líneas Futuras .....	76
Capítulo 10.	Bibliografía.....	77
Capítulo 11.	Anexo .....	79

## Índice de Figuras

Figura 1. Clasificación de satélites según su peso [2].	6
Figura 2. Clasificación de estructuras de guía de onda [4].	10
Figura 3. Geometría de guía de onda rectangular [7].	11
Figura 4. Estructura de una Línea Microstrip [8].	11
Figura 5. Constante de atenuación (Np/m) en el modo fundamental <b>TE<sub>10</sub></b> , para diferentes valores de anchuras y alturas [9].	15
Figura 6. Clasificación de las técnicas de impresión 3D dependiendo del material.	18
Figura 7. Proceso de fabricación con técnica de deposición fundida (FDM) [12].	18
Figura 8. Proceso de una pieza con técnica SLA [13].	19
Figura 9. Método DLP [13].	20
Figura 10. Proceso de galvanizado [14].	21
Figura 11. Sistema de pulverización catódica [15].	22
Figura 12. Impresora de técnica de Fusión por láser SLM [17].	23
Figura 13. Impresora de técnica de fabricación por sinterización laser de metal directo DMLS [17].	23
Figura 14. Impresora de técnica de fusión por haz de electrones EBM [18].	24
Figura 15. Filtros de microondas a partir de técnica de fusión selectiva por láser [20].	27
Figura 16. Bocina metalizada a partir de técnica de impresión de polímero [21].	27
Figura 17. Estructura de la guía de onda rectangular con perforaciones rectangulares [22].	28
Figura 18. Fabricación guía de onda rectangular con agujeros de 1.44 mm de lado [22].	28
Figura 19. Filtro fabricado sin malla y filtro fabricado mallado [22].	29
Figura 20. Datos extraídos de las medidas de los filtros (Figura anterior) diseñados [22].	29
Figura 21. Comparativa entre proceso de técnica MIM y de proceso BMD [23].	30
Figura 22. Impresora Studio System [23].	30
Figura 23. Ejemplo de una región de optimización [24].	32
Figura 24. Clasificación de algoritmos de optimización.	33
Figura 25. Región permitida en el espacio de las funciones objetivo [24].	34
Figura 26. Ejemplo de puntos no inferiores [24].	35
Figura 27. Ejemplo de diseño guía de onda en CST.	36
Figura 28. Aplicaciones de diseño en el área de microondas y óptica [25].	38
Figura 29. Pestaña de "Home" en CST.	38
Figura 30. Pestaña de modelado de CST.	38
Figura 31. Pestaña de simulación en CST.	39



Figura 32. Comandos de post procesamiento en CST.....	39
Figura 33. Pestaña de “View” en CST. ....	39
Figura 34. Pestaña de “Navigation Tree” en CST.....	39
Figura 35. Carpeta de parámetros S de CST. ....	40
Figura 36. Resultado módulo S11 con valor de $N_x=6$ y $N_x=8$ representados en verde y rojo respectivamente. ....	40
Figura 37. Resultado módulo S21 con valor de $N_x=6$ y $N_x=8$ representados en verde y rojo respectivamente. ....	40
Figura 38. Carpeta de resultados 2D/3D de CST. ....	41
Figura 39. Resultado de distribución de campo eléctrico 2D/3D en el puerto 2.....	41
Figura 40. Parámetros de diseño de primer prototipo de guía de onda perforada.....	42
Figura 41. Primer diseño de la guía de onda rectangular con separación de 6 mm entre las perforaciones. ....	43
Figura 42. Diseño de la guía con problema en las perforaciones.....	43
Figura 43. Primeros pasos de la creación de celda unidad con hilos.....	44
Figura 44. Bloque de vaciado.....	45
Figura 45. Bloque principal replicado “Nz” veces.....	45
Figura 46. Definiciones y fórmulas para calcular Ratio de CST.....	48
Figura 47. Diseño de una guía rectangular con perforaciones. ....	49
Figura 48. Diseño de una guía rectangular sin perforaciones.....	49
Figura 49. Ratio para diferentes valores de $N_x$ , con $D=1$ y variando valor de $g$ . ....	50
Figura 50. Módulo de S11 para diferentes valores de $N_x$ , con $D=1$ y variando valor de $g$ . ....	51
Figura 51. Módulo de S21 para diferentes valores de $N_x$ , con $D=1$ y variando valor de $g$ . ....	52
Figura 52. Fase simulada e ideal del parámetro S21 para diferentes valores de $N_x$ , con $D=1$ y variando valor de $g$ . ....	53
Figura 53. Ratio para diferentes valores de $N_x$ , con $g=1$ y variando valor de $D$ . ....	54
Figura 54. Módulo de S11 para diferentes valores de $N_x$ , con $g=1$ y variando valor de $D$ . ....	55
Figura 55. Módulo de S21 para diferentes valores de $N_x$ , con $g=1$ y variando valor de $D$ . ....	56
Figura 56. Gráfica del parámetro fase de S21 con valor fijo de $g=1$ , $h=1.5$ , y variando valor de $D$ . ....	57
Figura 57. Esquema con los pasos a seguir para realizar la optimización multiobjetivo. ....	59
Figura 58. Interfaz de Desktop Metal con guía perforada apoyada de forma horizontal en la cara estrecha de la guía.....	61
Figura 59. Dimensiones de la transición de guía coaxial [26].....	62
Figura 60. Diseño de la guía de onda perforada con Flanges.....	62
Figura 61. Tendencia a deformarse el prototipo a fabricar.....	62
Figura 62. Soportes realizados en los prototipos de guía de onda.....	63



Figura 63. Soportes realizados en los prototipos de guía de onda.....	63
Figura 64. Interfaz de Desktop Metal con guía perforada apoyada de forma vertical. ....	64
Figura 65. Interfaz de Desktop Metal con guía perforada apoyada de forma horizontal en la cara ancha de la guía. ....	64
Figura 66. Máquina de Desktop Metal en la primera etapa de impresión 3D.....	65
Figura 67. Prototipo de guía perforada después de la primera etapa de impresión 3D.....	65
Figura 68. Pieza final de guía de onda perforada con $N_x=6$ . ....	66
Figura 69. Pieza final de guía de onda de referencia (cara ancha de la guía).....	66
Figura 70. Pieza final de guía de onda perforada con $N_x=8$ . ....	66
Figura 71. Flange y nervios de una pieza final impresa. ....	67
Figura 72. VNA utilizado para la realización de las medidas de las guías.....	67
Figura 73. Flange lijado de guía de onda de referencia.....	68
Figura 74. Los tres prototipos de guía de onda impresos junto con sus conectores.....	68
Figura 75. Realización de medida de guía de onda de perforada de $N_x=6$ . ....	69
Figura 76. Comparativa del parámetro $S_{11}$ medido y simulado de guía de referencia oxidada y sin oxidar. ....	69
Figura 77. Comparativa del parámetro $S_{21}$ medido y simulado de guía de referencia oxidada y sin oxidar. ....	70
Figura 78. Comparativa del parámetro $S_{11}$ medido y simulado de las guías perforadas de “ $N_x=6$ ” y “ $N_x=8$ ”. ....	70
Figura 79. Comparativa del parámetro $S_{21}$ medido y simulado de las guías perforadas de “ $N_x=6$ ” y “ $N_x=8$ ”. ....	71
Figura 80. Comparativa del parámetro $S_{11}$ medido de todas las guías de onda impresas. ....	71
Figura 81. Comparativa del parámetro $S_{21}$ medido de todas las guías de onda impresas.....	72



## Índice de Tablas

Tabla 1. Diferencias entre diversas técnicas de impresión con plástico.....	20
Tabla 2. Comparativa entre técnicas de polímeros y de metales.....	26
Tabla 3. Modelos de diseño en CST [25].....	38
Tabla 4. Parámetros de un ejemplo de diseño de guía de onda rectangular.....	46
Tabla 5. Parámetros del diseño de la guía de onda rectangular.....	48
Tabla 6. Resultados del parámetro Ratio para diferentes valores de $N_x$ , con $D=1$ y variando valor de $g$ . ....	51
Tabla 7. Resultados del parámetro módulo de $S_{11}$ para diferentes valores de $N_x$ , con $D=1$ y variando valor de $g$ . ....	51
Tabla 8. Resultados del parámetro módulo de $S_{21}$ para diferentes valores de $N_x$ , con $D=1$ y variando valor de $g$ . ....	52
Tabla 9. Resultados de la diferencia del parámetro fase simulada e ideal de $S_{21}$ para diferentes valores de $N_x$ , con $D=1$ y variando valor de $g$ . ....	53
Tabla 10. Resultados del parámetro Ratio para diferentes valores de $N_x$ , con $g=1$ y variando valor de $D$ . ....	54
Tabla 11. Resultados del parámetro módulo de $S_{11}$ para diferentes valores de $N_x$ , con $g=1$ y variando valor de $D$ . ....	55
Tabla 12. Resultados del parámetro módulo de $S_{21}$ para diferentes valores de $N_x$ , con $g=1$ y variando valor de $D$ . ....	56
Tabla 13. Resultados de la diferencia del parámetro fase de $S_{21}$ con valor fijo de $g=1$ , $h=1.5$ , y variando valor de $D$ . ....	57
Tabla 14. Tabla de resultados tanto medidos como simulados de las guías de onda fabricadas.	73

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes

Sobre la tierra, más concreto sobre la atmósfera terrestre, orbitan los llamados satélites artificiales creados por los seres humanos con el fin de poder transmitir o recibir información. Es decir, estos satélites están relacionados con el sector de las Telecomunicaciones, telefonía, Internet... y otras funciones fuera de este sector. El primer satélite lanzado a órbita fue el Sputnik I por Rusia, en 1957 [1]. Podemos clasificar los satélites según su peso, donde los grandes satélites pueden llegar a pesar toneladas y los satélites medianos pueden tener un peso desde 500 Kg a más de 1000 Kg. Convencionalmente, se lanzaban estos satélites de grandes dimensiones, lo que producía un elevado tiempo de desarrollo y coste económico.

Por ello, fue necesario un cambio de tendencia, en el que se lanzaban satélites de pequeñas dimensiones para cubrir las necesidades de nuevas aplicaciones futuras, que se conoce como New Space. Estos satélites, llamados Minisatélites o microsateélites, se refiere al conjunto de pequeños satélites que presentan una masa inferior a 600Kg (minisatélites entre 100 y 500 Kg, y microsateélites de 10 a 100Kg), situados en órbitas bajas (LEO) y con niveles de potencia reducidos. Su principal ventaja respecto a los de grandes dimensiones es que presentan un bajo peso, por lo que los costes de fabricación y producción se reducen notablemente en comparación con los satélites tradicionales. Algunas funciones de estos son misiones de constelaciones de satélites para observar la Tierra o facilitar el acceso a Internet global. Pero la tecnología sigue avanzando hasta el punto de crear los llamados nanosatélites o picosatélites, que podemos clasificarlos con los pequeños satélites, pero con un peso inferior a los nombrados anteriormente, entre 10 Kg y menos de 1 Kg. En la siguiente Figura 1, podemos observar una clasificación de menor a mayor masa [2].



Figura 1. Clasificación de satélites según su peso [2].

Un nanosatélite, como hemos comentado anteriormente, es un tipo de satélite de poco peso, de 1,1-10 Kg, que realiza funciones parecidas a los satélites convencionales de grandes dimensiones, pero, con la ventaja de su forma, tamaño y peso. Algunos ejemplos de nanosatélites que han lanzado al espacio son por ejemplo Lingque 1A (Laboratorio ZeroG), Criocubo (NASA KSC) o Pony Express 1 (Tyvak) [1]. Tienen grandes funciones dentro del sector e industria de las telecomunicaciones:

- Recopilación de datos e interpretación de estos observando la tierra, para analizar y gestionar los recursos naturales y el impacto humano en la Tierra, para un posterior desarrollo de una economía sostenible.
- Comunicaciones con diferentes zonas sin cobertura terrestre.
- Geolocalización y logística: monotorización de diferentes grupos activos (barcos, aviones, vehículos...) desde cualquier parte del mundo.
- Control de las señales de radio de la Tierra para obtener información importante en caso de algún desastre en el mundo.
- Investigación científica para observación o misiones espacial, pruebas científicas, desarrollo de programas espaciales, etc [3].

Convencionalmente las cargas útiles de estos satélites pueden utilizar dos tecnologías importantes. Una de ellas, la tecnología planar o PCB y la otra, tecnología de guía de onda. La tecnología planar (circuitos impresos) ha ido evolucionando a lo largo del tiempo, convirtiéndose en el método primordial de fabricación de dispositivos electrónicos. Esta tecnología se caracteriza por que tiene bajo peso y poco volumen, pudiendo crear dispositivos muy pequeños, pero con una desventaja mayor, las grandes pérdidas que se obtienen debido a que la señal se propaga a través de un dieléctrico. En cambio, la tecnología de guía de onda, son estructuras o superficies donde se propagan las ondas electromagnéticas confinadas a lo largo de la dirección de la propia guía. Se parte de un bloque de material, como puede ser aluminio o cobre, donde a partir de técnicas sustractivas, se realiza esta estructura.

En conclusión, estas estructuras tienen la desventaja de su geometría voluminosa y su gran peso en aplicaciones espacio, añadiendo que la gran cantidad de material requerida en comparación con la tecnología planar haciendo que sean costosos de fabricar. Las principales ventajas frente a la tecnología planar son que, la tecnología de guía de onda tiene buenas prestaciones en pérdidas, lo que provoca que sea una opción para dispositivos donde se necesita que sean muy robustos, como aplicaciones militares; además, la onda queda confinada en las 4 paredes de su estructura por lo que evitamos posibles interferencias electromagnéticas.

En la actualidad, las tecnologías convencionales están dando paso a nuevas tecnologías y estructuras que presentan un menor peso y son ideales para satélites de pequeñas dimensiones, ya que como hemos mencionado anteriormente, la guía de onda convencional se caracteriza por un peso excesivo [4].

Esto ha provocado, la necesidad de investigar y utilizar nuevas técnicas de reducción de peso como integrar una guía de onda en un substrato (SIW) [5], surgida a finales de 1993 y principios de 1994, que consiste en integrar una guía de onda dentro de un substrato dieléctrico utilizando vías metálicas, las nuevas técnicas de manufacturación aditiva que permiten realizar prototipados rápidos, así como en ocasiones aligerar el peso de los dispositivos.

Las técnicas de impresión 3D son un método prometedor para diseñar estructuras ligeras para aplicaciones de radiofrecuencia (RF) que se caracterizan por ser aditivas, pudiendo realizar formas o geometrías muy diversas y complejas que con las anteriores técnicas sustractivas convencionales no era posible plantear o era muy compleja su fabricación. Añadiendo además el ahorro de material, ya que al ser aditivas gasta menos material que al ser sustractivas, quedando sin utilizar el material sobrante.

A través de las técnicas de impresión 3D, se puede realizar un diseño perforando la guía de onda, reduciendo así su peso, y manteniendo las propiedades eléctricas, que es la temática principal de este trabajo [6].



## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado (TFG) es el diseño de una guía de onda rectangular perforada y su fabricación utilizando una técnica de impresión 3D. A través de la geometría o dimensiones de las perforaciones, se buscará reducir el peso, afectando lo menos posible a su respuesta eléctrica. Además, se fabricarán unos primeros prototipos de la guía de onda perforada, y se validará su respuesta comparando simulación con medidas. Dentro de este objetivo principal, podemos desglosarlo en pequeños objetivos, donde los más importantes a tomar en cuenta serán:

- La relación de volumen de guía de onda sin perforar y guía de onda perforada, requiriendo que sea lo menor posible, buscando un tamaño eléctrico ideal de los agujeros de la guía perforada, pero intentando reducir el peso al máximo sin sacrificar la respuesta eléctrica de la guía de onda.
- El factor de reflexión en el puerto 1, módulo  $S_{11}$ , debe ser lo mínimo posible, dentro de los valores -30 y -40 dB.
- El factor de transmisión, módulo  $S_{21}$  o  $S_{12}$ , debe ser lo mínimo posible, cercano a 0 dB, para que las pérdidas de transmisión sean mínimas en nuestra guía de onda.
- Búsqueda de un diseño fabricable teniendo en cuenta las limitaciones existentes en la técnica utilizada para la fabricación.
- Aprendizaje del manejo de un simulador electromagnético para realizar el diseño de guía de onda perforada.

Para la obtención de las dimensiones físicas de la guía perforada, se realizarán diversos barridos paramétricos con el fin de evaluar aquellos parámetros que afectan más a su respuesta eléctrica, y se desarrollará y aplicará un algoritmo de optimización buscando las dimensiones de las perforaciones que cumplan los objetivos marcados.

## 1.3 Metodología

El objetivo de este TFG es desarrollar una guía de onda rectangular perforada. Para ello, se siguieron una serie de pautas para su organización y desarrollo.

La primera tarea establecida, fue la investigación y estudio de diferentes artículos científicos sobre este tema expuesto, proporcionados por los tutores de este trabajo. Seguidamente, se empezó con el manejo y estudio del programa a utilizar para el diseño y análisis de resultados.

Este diseño de guía de onda se va a realizar haciendo uso de CST (Computer Simulation Technology), un software de análisis Electromagnético 3D que realiza diseños, análisis y optimizaciones de componentes y sistemas electromagnéticos.

A partir de esto, se introdujeron por los tutores varios ejercicios sobre estructuras perforadas para el aprendizaje y conocimiento de las funciones de este programa CST. A continuación, se empezaron unos primeros diseños de guía de onda perforada en CST, así como una toma de contacto de manera conceptual con la optimización multiobjetivo. Más tarde, fue realizado un



análisis paramétrico de las dimensiones físicas más importantes del diseño, analizando sus resultados con el fin de evaluar que parámetros afectaban más a su respuesta.

A continuación, se empezó una toma de contacto con la implementación de la optimización multiobjetivo, a través de una función creada en *Matlab*, esencial para determinar las dimensiones físicas más adecuadas, donde se proporcionará de manera gráfica la relación existente entre los parámetros geométricos y la respuesta eléctrica obtenida. De esta manera, se podrá determinar que diseño/s son los que presentan mejores prestaciones.

Mientras se implementaba esta función multiobjetivo, se fueron manteniendo reuniones periódicas con el fabricante teniendo en cuenta su experiencia en este campo con el fin de obtener un diseño fabricable y, se fue redactando la memoria.

Finalmente, se fabricarán diversos prototipos de guías de onda perforadas y se validarán midiendo sus características más importantes.

## 1.4 Estructura

La documentación de este trabajo de fin de grado se ha estructurado en ocho capítulos. Como extensión a este primer capítulo de introducción, en el segundo capítulo se exponen los conceptos teóricos básicos de una guía de onda rectangular, incluyendo definición y parámetros más importantes, necesarios para evaluar las prestaciones de la guía de onda. En el tercer capítulo, se explica detalladamente la técnica de impresión 3D, introduciendo diferentes tipos de impresión 3D y las técnicas que podemos emplear para nuestro diseño. Además, se añadirá una descripción de los dispositivos que se han realizado en impresión 3D en el campo de microondas y, finalmente, una descripción junto con las ventajas y desventajas de la técnica elegida para el trabajo.

A continuación, en el cuarto capítulo se presentan los conceptos básicos de optimización y algoritmos de optimización, haciendo hincapié en el algoritmo de optimización multiobjetivo que se aplicará más adelante. Posteriormente, en el capítulo número cinco, se introduce el software de la simulación electromagnética el cual nos ha servido para diseñar, simular y validar nuestra guía de onda perforada.

Seguidamente en el sexto capítulo, eje central de la actividad desarrollada en el trabajo de fin de grado, se explica el diseño de guía de onda 3D perforada, la estructura elegida, así como se presentan una serie de resultados, el cual hemos analizado y evaluado para su optimización final haciendo uso del software o aplicación matemática llamada *Matlab*, además de una selección del diseño o diseños finales. En el séptimo capítulo, se presenta la fabricación de unos primeros prototipos, su posterior evaluación del prototipo y de sus medidas.

En el último capítulo, octavo capítulo, se exponen las conclusiones de este TFG, así como las posibles líneas futuras del trabajo pensando en la fabricación de dispositivos utilizando esta guía de onda perforada.

## Capítulo 2. Guía de onda rectangular

### 2.1 Definición

En este segundo capítulo de la memoria, se pretende hacer una introducción teórica de lo que es una guía de onda e introducir sus parámetros y características más relevantes.

Una guía de onda es un medio físico que permite guiar las ondas electromagnéticas en una dirección o varias direcciones [7]. La guía de onda confina las señales a transmitir, por lo que se reducen las pérdidas por propagación y, por ello, son estructuras óptimas para la transmisión de señales de altas frecuencias.

Las guías de onda tienen forma de manguera metálica, siendo hueco su interior, pudiendo tener ciertas simetrías. Dos de los ejemplos más destacados son la estructura rectangular y la estructura circular, pudiendo ver la diferencia entre guía de onda plana, guía de onda rectangular y guía de onda circular en la Figura 2.

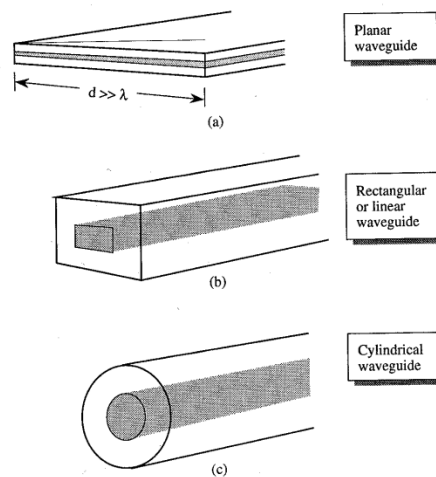


Figura 2. Clasificación de estructuras de guía de onda [4].

Las guías de onda rectangulares fueron las primeras estructuras utilizadas para la transmisión de señales de microondas de altas frecuencias y potencias. Estas guías de onda rectangulares están formadas por un tubo hueco rectangular con paredes conductoras, quedando la onda confinada dentro de ella. Son utilizadas, en general, a frecuencias superiores de 3 GHz. La geometría de la guía de onda rectangular se ilustra en la Figura 3 [4].

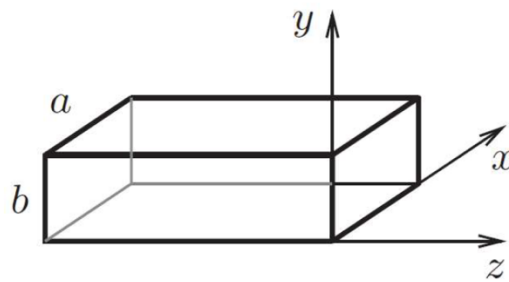


Figura 3. Geometría de guía de onda rectangular [7].

Aunque la tecnología avanza y, por ello, surgieron tecnologías como las líneas microstrips o líneas coaxiales.

Las líneas microstrip (PCB) surgieron de la mano de Robert Barret, en la década de los años 30, donde se planteó utilizar placas de un material aislante, que más tarde serían recubiertas por cobre. Una vez se tenía la placa principal, se irían superponiendo a esta, el patrón de circuito impreso. De esta forma, el cobre no cubierto, se eliminaría a través de un procedimiento químico.

Una línea Microstrip consiste en una franja de un material conductor separada, por un material dieléctrico, de un plano de tierra. Podemos observar su estructura en la Figura 4.

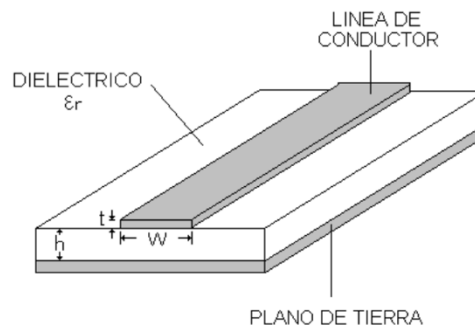


Figura 4. Estructura de una Línea Microstrip [8].

Las líneas microstrips o las líneas coaxiales (cable de dos conductores, uno central de núcleo de cobre y una malla metálica trenzada alrededor del núcleo, recubriendo todo por una gruesa capa aislante) tienen la ventaja de que son más baratos que la tecnología tradicional de guía de onda, además de más ligeros y compactos. Pero tienen la desventaja de que, aunque sean medios guiados, en comparación con las guías de onda, tienen mayores pérdidas y bajas capacidades de manejo de potencia; además, las líneas microstrip, al ser unas estructuras no cerradas, pueden tender a captar más cantidad de ruido [8].

Sin embargo, la tecnología de guía de onda sigue siendo utilizada por sus fuertes características mencionadas como sus pocas pérdidas y sus potencias altas, comparándolas con las otras tecnologías explicadas.

Por lo general, los campos que se propagan por una estructura arbitraria se pueden denotar como la suma de distintos modos:

- Modo Transversal Eléctrico (*TE*), donde poseen un campo eléctrico nulo en la dirección de propagación ( $E_z = 0$ ).
- Modo Transversal Magnético (*TM*), donde poseen un campo magnético nulo en la dirección de propagación ( $H_z = 0$ ).

- Modo Transversal Electromagnético (TEM), donde poseen un campo eléctrico nulo ( $E_z = 0$ ) y un campo magnético nulo ( $H_z = 0$ ).

La tecnología de guía de onda rectangular puede trabajar con infinitos modos de propagación. La solución obtenida, es una solución basada en modos  $TE_{mn}$  (Transversal Eléctrico) y  $TM_{mn}$  (Transversal Magnético), donde  $m$  y  $n$  es el orden del modo, y por lo que pueden tomar valores desde 0 o 1, hasta infinito. El modo TEM (transversal electromagnético) necesita de dos conductores o más, separados entre sí, para que se propague la onda y para el caso de guía de onda rectangular, solo existe un conductor, por lo que no se propagan los modos TEM [7].

A partir de aquí, vamos a obtener las ecuaciones tanto para el modo TM como el TE de una guía de onda rectangular partiendo de las ecuaciones de Maxwell

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\mu\vec{E} \quad (2.4)$$

se obtiene:

$$E_x = \frac{-j}{k_c^2} \left( \beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (2.5)$$

$$E_y = \frac{j}{k_c^2} \left( -\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2.6)$$

$$H_x = \frac{-j}{k_c^2} \left( \beta \frac{\partial H_z}{\partial x} - \omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (2.7)$$

$$H_y = \frac{j}{k_c^2} \left( -\beta \frac{\partial H_z}{\partial y} - \omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2.8)$$

En base a los ejes de la figura 3, teniendo en cuenta que la onda se propaga en dirección  $z$ , el número de onda de corte es

$$k_c^2 = k_x^2 + k_y^2 \quad (2.9)$$

$E_z$  y  $H_z$  son las componentes del campo eléctrico y magnético en la dirección de propagación. A partir de estas ecuaciones de onda, se intenta cumplir las condiciones de contorno en la región del problema a resolver.

$$(\nabla_t^2 + k_c^2) \cdot H_z = 0 \quad (2.10)$$

$$(\nabla_t^2 + k_c^2) \cdot E_z = 0 \quad (2.11)$$

Resolviendo la ecuación diferencial (2.11) teniendo en cuenta la geometría de la estructura, se obtiene a siguiente ecuación genérica que sirve tanto para los modos TE, como los modos TM

$$A_z = [B \sin(k_x x) + A \cos(k_x x)][C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y)] \quad (2.12)$$

Para calcular los modos  $TM_{mn}$  ( $H_z = 0, E_z \neq 0$ ) se aplica las condiciones de contorno en las cuatro paredes metálicas de la guía ( $x=0, x=a, y=0, y=b$ ) donde  $E_z$  queda

$$E_z(y) = 0; \quad y = \{0, b\} \quad (2.13)$$

$$E_z(x) = 0; \quad x = \{0, a\} \quad (2.14)$$

A partir de esta ecuación, se vuelven a aplicar condiciones de contorno y se obtiene  $E_z$

$$E_z = A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (2.15)$$

donde  $A_{mn}$  es una constante y  $m, n=1, 2, 3, \dots$  son valores enteros. El número de onda de corte y la frecuencia de corte son

$$k_{c,mn}^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (2.16)$$

$$f_{c,mn} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2.17)$$

Para calcular el modo  $TE_{mn}$  ( $E_z = 0, H_z \neq 0$ ) se aplica la condición de contorno de pared eléctrica ( $\frac{\partial H_z}{\partial n} = 0$ ) en las cuatro paredes metálicas de la guía ( $x=0, x=a, y=0, y=b$ ) obteniendo  $H_z$  a partir de ecuación (2.12)

$$H_z = B_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (2.18)$$

donde  $B_{mn}$  es una constante y  $m, n=0, 1, 2, 3, \dots$  son valores enteros y  $(m, n) \neq (0, 0)$ . El número de onda de corte y la frecuencia son las ecuaciones (2.16) y (2.17).

Las guías de onda son medios dispersivos, es decir, presentan dispersión, porque presentan una frecuencia de corte no nula. Esto se explica a que la velocidad de propagación depende de la constante de propagación y esta a su vez, depende de la frecuencia de corte y la frecuencia de operación. Siempre va a existir una dispersión intramodal, es decir, ya solo por sus características lo presenta.

También presentan la dispersión intermodal, que se produce cuando existen varios modos propagándose a la frecuencia de operación. Para evitar la dispersión intermodal, se trabaja en el

rango monomodo. Por lo tanto, es interesante que solamente se propague un único modo para una transferencia de potencia mayor, evitando el efecto de distorsión entre modos.

El modo fundamental en una guía de onda es aquel que posee una frecuencia de corte más baja. La frecuencia de corte depende de la anchura de guía  $a$  y la altura  $b$ . Si la guía de onda presenta una anchura  $a$ , superior a la altura  $b$ ,  $a > b$ , el modo que presenta una menor frecuencia de corte es el modo fundamental  $TE_{10}$ .

Los siguientes modos que se propagan después del modo  $TE_{10}$  con las condiciones de anchura  $a$  y altura  $b = \left(\frac{a}{2}\right)$  son el  $TE_{20}$  y el  $TE_{01}$ .

Los campos eléctricos y magnéticos obtenidos para el modo dominante  $TE_{10}$  ( $m=1$  y  $n=0$ ) son

$$H_z = B_{10} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (2.19)$$

$$H_x = \frac{j\beta a}{\pi} B_{10} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (2.20)$$

$$E_x = \frac{-j\omega\mu a}{\pi} B_{10} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (2.21)$$

Normalmente en la práctica se utilizan un rango de frecuencias específico para que solo se propague el modo fundamental, siendo  $1,25f_{c1} < f < 0,95f_{c2}$  donde  $f_{c1}$  es la frecuencia de corte del modo fundamental y  $f_{c2}$  la frecuencia de corte del modo siguiente. Para nuestro modo fundamental  $TE_{10}$ , la frecuencia de corte y el número de onda de corte dependen de la anchura de guía  $a$ .

$$f_{c_{TE_{10}}} = \frac{c}{2a} \quad (2.22)$$

$$\beta_{TE_{10}} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \quad (2.23)$$

$$k_{c_{TE_{10}}} = \frac{\pi}{a} \quad (2.24)$$

En el caso de este TFG, se utilizará una guía de onda de anchura  $a = 19.05$  mm y la altura  $b = \left(\frac{a}{2}\right) = 9,525$  mm que corresponde con la guía estándar WR75, cuyas frecuencias de corte son  $f_{c_{TE_{10}}} = 7.869$  GHz y  $f_{c_{TE_{20}}} = 15.737$  GHz. Por lo que nosotros trabajaremos en el rango comprendido entre 8 y 12 GHz, rango habitual en muchas aplicaciones del espacio cumpliéndose la propagación monomodo.

Pueden existir pérdidas debidas a los dieléctricos y al conductor. En nuestro caso como solo tenemos un material conductor, nos centramos en la atenuación, influyendo en la resistencia superficial de nuestra guía de onda. Para los modos TE puede expresarse su constante de atenuación debida a los conductores en función de  $H_z$  [7].

La potencia transmitida en una guía es

$$P_T = \frac{\eta_2}{2Z_{TE}} \left(\frac{f}{f_c}\right)^2 \iint_S |H_Z|^2 dS \quad (2.25)$$

Y la potencia perdida por unidad de longitud es

$$P_{LC} = \frac{R_s}{2} \oint_C |\vec{J}_s|^2 dl \quad (2.26)$$

Donde  $J_s$  es la densidad de corriente y  $R_s$  la resistencia superficial. La constante de atenuación del modo TE es

$$\alpha_c = \frac{P_{LC}}{2P_T} = \frac{\frac{R_s}{2} \oint_C |\vec{J}_s|^2 dl}{2 \cdot \frac{\eta_2}{2Z_{TE}} \left(\frac{f}{f_c}\right)^2 \iint_S |H_Z|^2 dS} \quad (2.27)$$

Particularizando para el modo fundamental  $TE_{10}$  tenemos

$$\alpha_c = \frac{R_s}{b\eta \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \left[ 1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{f_c}{f}\right)^2 \right] \quad (2.28)$$

Donde  $a$  y  $b$  es la anchura y la altura de la guía. Podemos ver en la Figura 5 la atenuación en diferentes frecuencias [9].

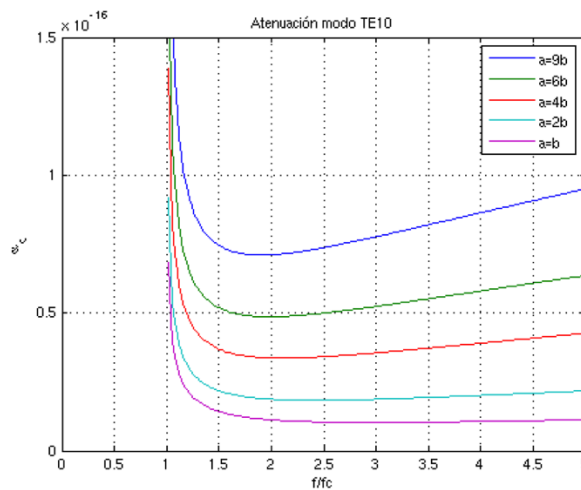


Figura 5. Constante de atenuación (Np/m) en el modo fundamental  $TE_{10}$ , para diferentes valores de anchuras y alturas [9].



Para concluir, haremos un resumen de las diferentes características más importantes de este modo fundamental  $TE_{10}$

1. Para la guía normalizada  $b = \left(\frac{a}{2}\right)$ , la atenuación debida a los conductores es más baja en comparación con hacer la altura más pequeña.
2. La frecuencia de corte del siguiente modo superior al  $TE_{10}$ , es el doble de su frecuencia de corte.
3. La frecuencia de corte  $f_{c_{TE_{10}}} = \frac{c}{2a}$  solo depende de la anchura de la guía.
4. En toda la guía, la polarización del campo eléctrico es fija.
5. La excitación del modo  $TE_{10}$  es muy sencilla, puesto que el campo eléctrico es vertical lineal.



## Capítulo 3. Impresión 3D en microondas

### 3.1 Tipos de impresión

La historia de la impresión 3D surge en 1981 cuando Hideo Kodama inventó un método de impresión 3D a partir de plástico, pero, no fue hasta 1984 cuando se creó el modelo por capas de fabricación 3D [6]. Esta técnica es muy parecida a la de la actualidad, la cual consistía en crear un objeto 3D añadiendo capas. En esta época ya existían los modelos con archivos de extensión STL (Stereolithography), que se siguen utilizando en la actualidad, siendo el más usado hoy en día. Ya en 1992, fue cuando se empezaron a vender los primeros prototipos de impresoras 3D que se basaban en la técnica capa por capa, usando como material un polímero de plástico.

A lo largo de los años, se ha ido expandiendo la impresión 3D, hasta llegar a la actualidad, donde podemos diferenciar muchas técnicas de fabricación y el uso de diferentes materiales. La industria de las telecomunicaciones no se ha quedado atrás, y en los últimos años, se ha podido crear nuevas técnicas de fabricación 3D que permiten, por ejemplo, crear prototipos geoméricamente complejos a la frecuencia de microondas; y es un gran avance para la sociedad, ya que, en ocasiones, con las antiguas técnicas no se podía llegar a estos dispositivos complejos.

La impresión 3D es, en concepto general, el conjunto de tecnologías de fabricación aditiva (Additive Manufacturing (AM) en inglés) capaz de generar prototipos tridimensionales mediante procesos aditivos, creando así objetos de manera rápida y sencilla. Además de ser una técnica de gran rapidez, destaca también por ser sencilla, de bajo peso y económica; donde antes se realizaba trabajo en días o semanas de manera artesanal, ahora se puede realizar en pocas horas y con poco esfuerzo.

Las tecnologías de impresión 3D son muy diversas, y no existe una sola tecnología que permita fabricar todos los dispositivos. En función de la precisión que se requiera, del material a utilizar en la fabricación y de la aplicación de este, se deberá seleccionar la tecnología más adecuada. En nuestro proyecto TFG, nos hemos centrado en las diferentes técnicas de fabricación 3D dependiendo de los materiales para la familia de las microondas. A partir de materiales como los plásticos, metales o materiales cerámicos podemos crear objetos de distintos tamaños, formas o colores, con diferentes propiedades físicas [10].

En la Figura 6 se muestra una breve descripción de las técnicas de manufacturación aditiva divididas entre las técnicas que utilizan un polímero (plástico) como material base y las que utilizan metal.

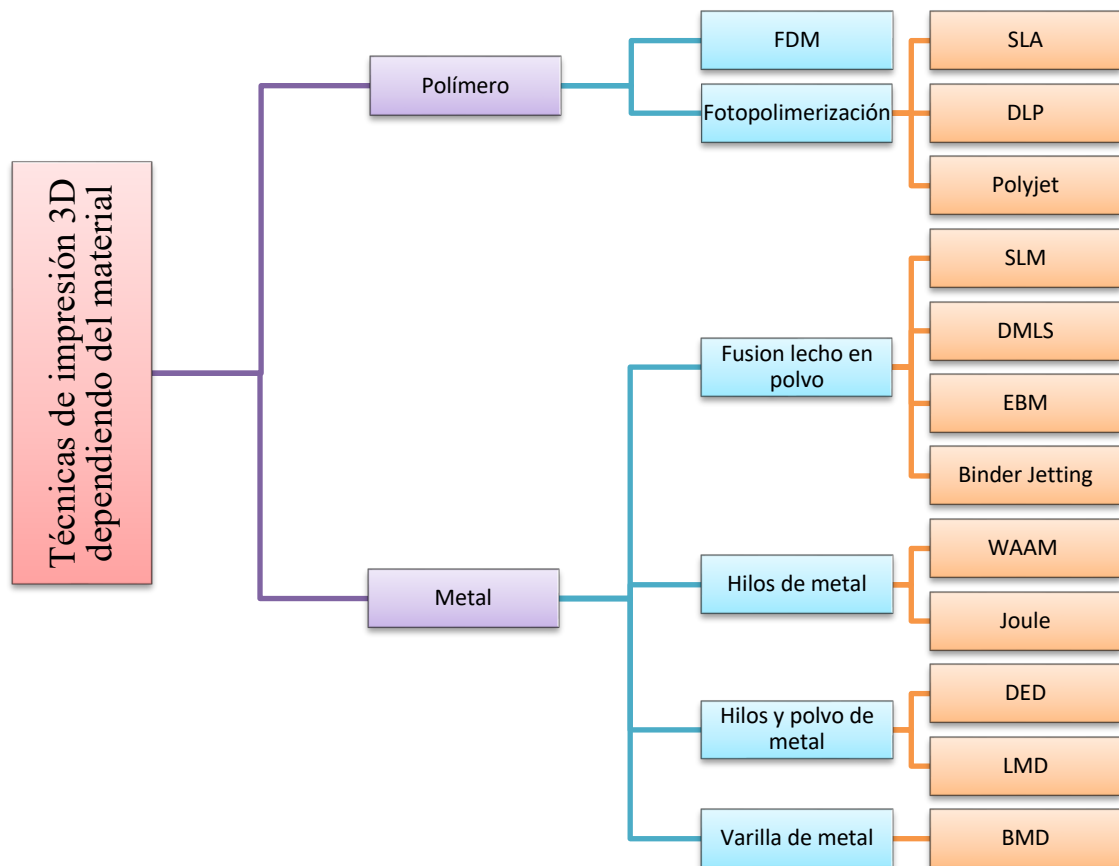


Figura 6. Clasificación de las técnicas de impresión 3D dependiendo del material.

A continuación, se hará un breve resumen de algunas de las técnicas más utilizadas en la actualidad. En la familia de la tecnología de impresión 3D como material base el polímero, podemos destacar estos tipos de tecnologías

- Técnica de deposición fundida o FDM (Inyección de material): la tecnología FDM es el método más habitual para la impresión 3D [11]. Está basada en el uso de un cabezal, donde extruye filamentos de material termoplástico a una cierta temperatura, almacenados en bobinas de material, generando el prototipo capa por capa de forma precisa sobre una plataforma. El proceso de fabricación podemos observarlo en la Figura 7, explicado de manera visual [12].

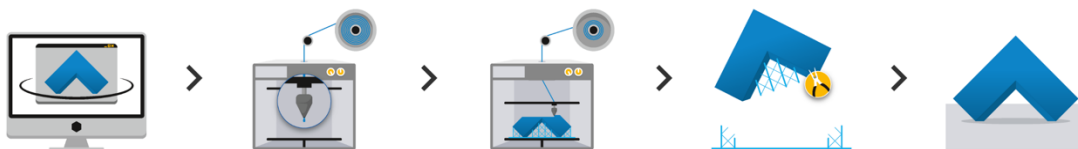


Figura 7. Proceso de fabricación con técnica de deposición fundida (FDM) [12].

Empieza con el diseño del prototipo a través de software. A continuación, se inicia la impresión de abajo hacia arriba, pudiendo ser necesario algunas estructuras de soporte para aquellas partes

que lo necesiten. Una vez terminada la pieza, se retira de la plataforma, se extraen los soportes de la pieza principal y se termina esta parte del proceso.

Esta técnica tiene una precisión excelente, pudiendo imprimir objetos con estructuras complicadas y volúmenes pequeños, gracias a la temperatura que permite fundir el material y poder moldearlo con precisión. También permite fabricar piezas funcionales, duraderas y estables. Otra ventaja destacable son los materiales utilizados, pudiendo utilizar componentes estandarizados y persistentes, con unas calidades buenas y estables a lo largo del tiempo. Algunos de ellos pueden ser el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), ABS-ESD7, PC, Ultem 9085, PLA (Ácido poliláctico)...

- Tecnología de Fotopolimerización: este método 3D se basa en la creación de dispositivos mediante diversos métodos y a partir de un material llamado polímero fotoreactivo. Normalmente este material suele ser resina, siendo flexibles y fáciles de manejar para la fabricación, que se van endureciendo poco a poco. Según los métodos de aplicación podemos clasificar esta tecnología en
  - SLA o Estereolitografía: esta técnica de fabricación, siendo la más antigua de todas, consiste en la proyección de un láser ultravioleta (UV) en una resina líquida. El rayo láser produce que la resina se endurezca y se solidifique hasta crear una forma. Esta tecnología también superpone capa sobre capa, pero esta vez, sobre este material líquido. En la Figura 8 se puede ver el proceso de la solidificación de la resina líquida sobre una plataforma de fabricación. Para finalizar, se mete el prototipo en un disolvente y, además, se puede introducir en un horno UV para terminar el objeto. Comparando esta técnica con FDM, conseguimos una pieza más consolidada, lisa y precisa, gracias al punto óptimo del rayo láser y a que no se emplea presión en fabricación.

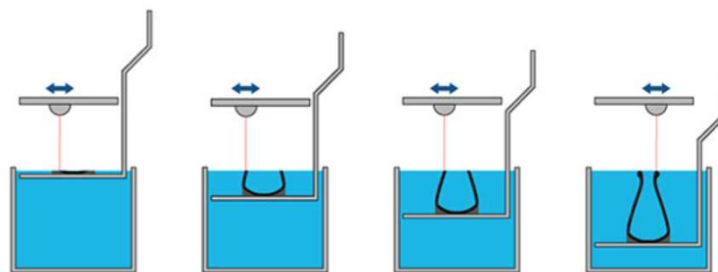


Figura 8. Proceso de una pieza con técnica SLA [13].

- DLP o procesamiento de luz digital: este método 3D es muy similar a SLA pero con la diferencia de que este se basa en un proyector de luz formado por múltiples espejos reducidos provocando que la resina se endurezca redirigiendo la luz a través del material. Esta técnica es más rápida que la anterior, ya que es capaz de crear las capas a gran velocidad con una precisión innovadora. Podemos observar este proceso de manera visual en la Figura 9.

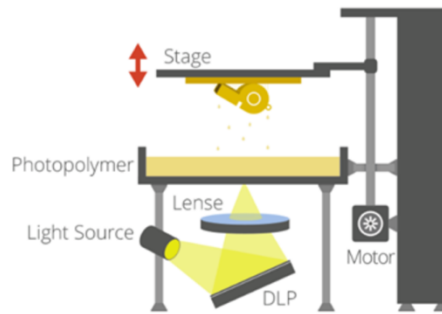


Figura 9. Método DLP [13].

- Polyjet: esta tecnología de impresión similar a SLA consiste en impresoras por inyección, pero con la particularidad de que se rocían con resina líquida fotosensible, capaz de crear una pieza secándose al instante con un rayo láser UV. Esta tecnología es capaz de crear las capas de las piezas muy finas y precisas. Además, se caracteriza por que utiliza soportes pulverizando por las boquillas, eliminándose con la aplicación de agua [11].

Para terminar con las técnicas de impresión 3D con plástico, vamos a hacer una tabla para comparar las diferentes técnicas nombradas con sus ventajas y desventajas.

Técnicas	Enormes detalles	Gran precisión	Durable y Resistente	Versátil
FDM	✗	✗	✓	✗
SLA	✓	✓	✓	✓
DLP	✓	✓	✓	✓
Polyjet	✓	✓	✓	✓

Tabla 1. Diferencias entre diversas técnicas de impresión con plástico.

Como vemos en la tabla anterior, las nuevas técnicas de resina son las más convenientes para la fabricación de objetos con más calidad en la actualidad.

Las técnicas expuestas anteriormente, permiten obtener una pieza de plástico (polímero), la cual, debido a sus características, no permite realizar ningún dispositivo de microondas, puesto que no dispone de ninguna pared conductora. Por ello, para conseguir confinar las ondas, es necesario aplicar técnicas y/o procesos que permitan depositar una capa de metal sobre el polímero. Estos procesos se denominan técnicas o procesos de metalización y, a continuación, se explicarán algunas destacadas.

- Deposición electrolítica o galvanizado: es un proceso electroquímico que consiste en pasar una corriente eléctrica por el objeto creado para que se adhiera metal a la superficie de este. Como hemos comentado, este proceso podemos realizarlo a partir de las técnicas de fabricación a partir de polímero. Pero, el problema es que, el proceso de electrodeposición típico no consigue que se adhiera el metal por todas las partes del dispositivo debido a que los plásticos son un material poco poroso, por lo tanto, es difícil que se adhiera el metal directamente sobre el objeto sin realizar otro proceso. Por ello, para solucionar esto, se suele realizar una capa de pintura previa que realmente es un material conductor junto con un abrasivo para conseguir esa superficie porosa y así que se adhiera el material conductor. Normalmente se usa Plata, pero se puede utilizar Níquel, o Paladio. Más tarde se termina el proceso del galvanizado (ver Figura 10).

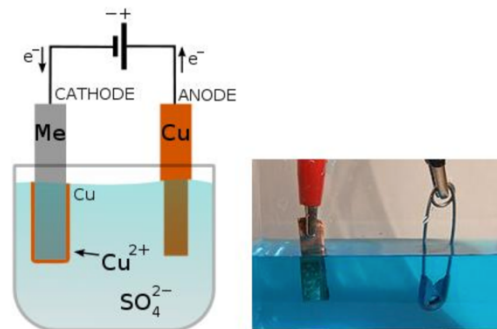


Figura 10. Proceso de galvanizado [14].

- Deposición no electrolítica: esta técnica está basada en una reacción química autocatalítica (aumento de la velocidad de una reacción química) donde se va depositando una capa de metal gruesa y uniforme sobre la superficie del polímero. Se hace uso de la temperatura y/o presión, así como otros elementos químicos, con el fin de conseguir que iones de Cobre se adhieran sobre el material, y así se metalice el polímero. Esta técnica de metalizado es parecida a la anterior, pero con la diferencia de que este proceso no tiene la necesidad de usar corrientes eléctricas para posar el metal, ya que utiliza el proceso de reducción. Y aunque este proceso pueda crear objetos con mucha calidad, se suele utilizar como primera fase para preparar una superficie porosa antes de realizar el proceso de galvanizado [14].
- Pulverización catódica o Sputtering: esta técnica es la más usada en la actualidad para procesos con semiconductores. Este proceso físico, consiste en el bombardeo de iones energéticos o átomos en la superficie del prototipo para que se produzca la vaporización de los átomos del material del objeto. Una vez eliminados estos átomos, se depositan finas capas de metal sobre los huecos creados por la evaporación. Por ello, son usados en la industria de circuitos integrados, ya que este proceso, es capaz de generar capas con espesor muy reducido. Podemos observar el sistema de pulverización catódica en la Figura 11 [15].

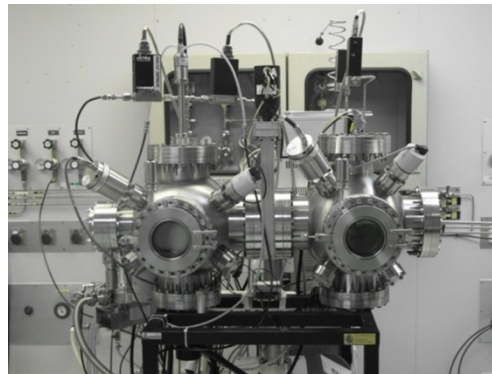


Figura 11. Sistema de pulverización catódica [15].

Todos estos procesos mencionados están relacionados con polímeros y sus respectivas metalizaciones.

Si nos vamos a la familia de los metales, podemos diferenciar otros tipos de técnicas de fabricación 3D. Las técnicas de Fusión de lecho en polvo se pueden clasificar en

- Técnica de Fusión selectiva por láser (SLM): el proceso de fusión selectiva por láser o SLM es una tecnología de impresión 3D que utiliza la técnica de fusión de lecho en polvo de aleaciones de metales. En este proceso de fabricación aditiva se utiliza el calor para fusionar las partículas. Debido a la utilización de altas temperaturas para fusionar las partículas, se utiliza una gran energía, lo que produce crear objetos muy fuertes, resistentes y con pequeños detalles. Este proceso utiliza soportes para reforzar algunas partes de algunas piezas complejas, que son eliminados más tarde una vez enfriada la pieza. El material utilizado en este proceso puede ser acero inoxidable, aluminio, cromo de cobalto, titanio... La técnica SLM utilizada para crear piezas de forma rápida, con diseños complicados y con muchos detalles, ya que con procesos de fabricación tradicionales sería muy difícil conseguir todo esto.
- Técnica de fabricación por sinterización laser de metal directo (DMLS): esta tecnología 3D de metal AM es una de las más destacadas en la actualidad. Consiste en la fabricación de objetos a partir de materiales metálicos en polvo, utilizando láseres de  $CO_2$  sobre las partículas de metal. Una vez se fusionan las partículas adyacentes del láser con las partículas de metal, se crea un enlace entre ellas y se van cubriendo todos los puntos hasta crear la primera capa. Y así funcionan todas las capas hasta crear el prototipado final. Este proceso es similar al SLM pero con algunas diferencias notables. La principal es que en el proceso SLM se utiliza el calor para fusionar las partículas, en comparación con la sinterización (presión + calor) de este proceso [16].

En las figuras 12 y 13 podemos observar diferentes máquinas de impresión 3D utilizadas en estos dos procesos explicados de fabricación con metal.



Figura 12. Impresora de técnica de Fusión por láser SLM [17].



Figura 13. Impresora de técnica de fabricación por sinterización laser de metal directo DMLS [17].

- Técnica de fusión por haz de electrones (EBM): la tecnología EBM también es de la familia de fusión lecho en polvo. A diferencia de la selectiva por láser o la de sinterización laser de metal directo, esta técnica utiliza un haz de electrones fusionando partículas metálicas para así ir creando capa por capa el objeto pensado. Está basada en una pistola de electrones, donde va extrayendo los electrones de un filamento de tungsteno al vacío, y los va proyectando sobre el polvo de metal de la plataforma. Este polvo de metal puede ser almacenado en la propia maquina 3D, y va depositándose en la plataforma en forma de finas capas, donde se fusionarán más tarde por el haz de electrones. Y así, capa por capa, se va creando la pieza 3D completa. Es importante destacar que las piezas hay que realizarlas al vacío para utilizar el haz de electrones correctamente (ver Figura 14). Los materiales utilizados solo pueden ser metales (Aleaciones de titanio, cromo, cobalto...) ya que, al ser un proceso eléctrico, los materiales deben ser conductores, por lo tanto, se quedan fuera los polímeros o materiales cerámicos. Este proceso es utilizado en industrias aeronáuticas o médicas. Por último, es un proceso, en comparación con el SLM, más rápido, pero menos preciso, donde incluso a veces es necesario un calentamiento de la pieza en un horno para un acabado más perfecto.





**Figura 14. Impresora de técnica de fusión por haz de electrones EBM [18].**

- Inyección de aglomerante (Binder Jetting): este proceso, siendo una mezcla entre los procesos de lecho en polvo y inyección de material, consiste en la inyección por un cabezal de líquido aglutinante al polvo de metal, provocando un material de líquido curado y polvo, creando así nuestra pieza 3D. Produce piezas complejas y con gran resolución, pero estos procesos necesitan de un gran coste a nivel de fabricación.

Una vez explicadas las técnicas más importantes de fusión de lecho en polvo, pasamos a explicar tecnologías de metal que usan hilos como materia prima

- WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing): proceso que utiliza como material hilos de metal, que a partir de las altas temperaturas y la soldadura mediante un arco, va creando el objeto capa por capa fundiendo esos hilos mediante el calor. Este proceso tiene un coste bastante medio, siendo buena opción para procesos con poco presupuesto, pero requiere bastante seguridad para su fabricación.
- JOULE: este método es parecido al WAAM pero con la principal diferencia de que utiliza como fuente de calor una corriente eléctrica para la fusión de las partículas de las capas que va creando. Se pasa una corriente a través del alambre de metal con el fin de fundir la punta mediante un calentamiento resistivo (efecto Joule) formando así un circuito eléctrico a través del alambre y la pieza, consiguiendo esa fusión de las partículas. También es un proceso bastante barato y rápido, pero no es capaz de realizar la impresión simultánea de materiales y tiene una limitación respecto al tamaño de las piezas que se puedan crear.

También podemos diferenciar dos métodos donde mezcla la deposición de hilo y polvo de metal

- Deposición directa de energía (DED): es un proceso parecido al SLM o EBM, ya que utiliza o la fusión de laser o el haz de electrones para crear la pieza capa por capa, pero con la principal diferencia de que puede utilizar como forma el material de polvo de metal o hilos de metal.
- Deposición laser de metal (LMD): esta tecnología de impresión 3D utiliza un haz de láser donde inyecta a una alta potencia el polvo de metal, fundiendo la superficie del material para crear la pieza en cuestión. Tiene bastante similitudes con el proceso con SLM, pero este es utilizado para la creación o reparación de herramientas y utensilios de mecánica, ya que es capaz de crear el objeto desde cero o simplemente reparar un trozo en cuestión de la pieza [18].



Por último, en la fabricación 3D con metal, podemos destacar una técnica bastante utilizada en la actualidad donde se tiene como materia prima varillas de metal

- Técnica de fabricación aditiva BMD (Bound Metal Deposition): esta tecnología de fabricación a partir de metal consiste en una técnica basada en extrusión, proceso utilizado para crear objetos 3D de manera transversal. Este método utiliza como material unas varillas de polvo de metal unidas por cera y aglutinante de polímero, en vez de directamente polvo o alambre de metal. Este proceso de fabricación es parecido a la técnica de plástico FDM, ya que consiste en calentar esas varillas y construir el objeto capa por capa. Una vez terminada esta primera etapa, se pasa al desaglutinante del objeto para eliminar el polímero añadido, seguido de una sinterización (temperatura + presión) para obtener el prototipo final [19].

Una vez explicadas varias técnicas de impresión, podemos ver el siguiente esquema (Tabla 2) donde se resume las características más destacadas de las técnicas más importantes de polímeros y metales explicadas.

Tipo de material	Polímero	Polímero	Polímero	Metal	Metal	Metal	Metal
Características	FDM	SLA	DLP	SLM	DMLS	EBM	BMD
Velocidad de impresión	Proceso rápido	Proceso largo	Proceso rápido	Proceso rápido	Proceso rápido	Proceso rápido	Proceso rápido
Volumen de impresión	Volumen Limitado	Volumen grande	Volumen Limitado	Volumen Limitado	Volumen Limitado	Volumen Limitado	Volumen Limitado
Precisión y acabados	Piezas con una precisión y unos acabados bajos	Piezas con precisión y acabados alta	Piezas con precisión y acabados alta	Piezas con precisión y acabados alta	Excelente precisión de los objetos fabricados	Piezas con precisión y acabados alta	Piezas con precisión y acabados alta
Complejidad del diseño	Capaz de crear piezas con complejidad media	Piezas estándar	Piezas estándar	Capaz de crear piezas con complejidad alta	Capaz de crear piezas con complejidad alta	Capaz de crear piezas con complejidad alta	Capaz de crear piezas con complejidad alta
Durabilidad	Piezas duraderas	Piezas duraderas	Piezas duraderas	Piezas muy duraderas	Piezas muy duraderas	Piezas muy duraderas	Piezas duraderas
Seguridad	No necesita de gran seguridad para fabricación	No necesita de gran seguridad para fabricación	No necesita de gran seguridad para fabricación	Necesita de gran seguridad para su fabricación	Necesita de gran seguridad para su fabricación	Necesita de gran seguridad para su fabricación	Necesita de gran seguridad para su fabricación
Método	Inyección de material	Proyección de un láser ultravioleta	Proyección de un láser de luz	Fusión selectiva por láser	Sinterización laser de metal directo	Fusión por haz de electrones	Extrusión de metal

Proceso de metalización	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No
<b>Materiales</b>	ABS, PC, PLA	Gran variedad de polímeros de resina líquida	Gran variedad de polímeros de resina líquida	Lecho en polvo de acero inoxidable, aluminio, cromo de cobalto, titanio...	Materiales metálicos en polvo	Lecho en polvo de aleaciones de titanio, cromo, cobalto...	Varillas de polvo de metal unidas por cera y aglutinante de polímero
<b>Funcionalidad</b>	Sector médico, industria aeroespacial, sector alimentario ...	Moldes de joyería, sector médico y dental	Moldes de joyería, sector médico y dental	Prototipos funcionales, sector aeroespacial y aeronáutico, canalizaciones, insertos para herramientas y moldes con canales internos de refrigeración ...	Prototipos funcionales y capaz de soportar altas temperaturas, instrumentos médicos, implantes quirúrgicos y sector aeroespacial y automotriz...	Industrias aeronáuticas o médicas	Prototipos funcionales, industrias aeronáuticas o médicas...

Tabla 2. Comparativa entre técnicas de polímeros y de metales.

Como podemos observar en la Tabla 2 de comparativa expuesta, las técnicas de plástico son buenas para crear objetos a una escala grande de producción, con complejidad media/alta y capaz de crear objetos con excelente resolución y precisión. En cambio, las técnicas de metal permiten crear prototipos con complejidad, precisión y acabados excelentes, con muchos detalles y siendo la mayoría para crear objetos a poca escala de volumen de producción. En las dos familias de impresión 3D obtenemos unos buenos acabados, pero la principal diferencia son las aplicaciones. En muchas aplicaciones, simplemente se necesita un objeto con una forma y con eso basta, ya que son necesarios para una función simple, por ello, la impresión a partir de polímero es buena en esos casos. En cambio, los procesos de metalización que necesitan las técnicas de polímeros son, en general, peores que directamente fabricar en metal, ya que, nos hacen perder un tiempo valioso de la producción, causa problemas debido al revestimiento de metal sobre el plástico porque es muy poroso, y el acabado no es de todo perfecto, ya que algunas estructuras son complejas y no se puede acceder correctamente a algunas partes para su metalización. Por el contrario, si se realiza directamente en metal, nos ahorramos este problema de metalizar el polímero y sus desventajas.

Por este motivo, hemos decidido que, para nuestro proyecto de TFG basado en la creación de una guía de onda rectangular, la mejor opción era utilizar una técnica de fabricación 3D directamente en metal.

### 3.2 Aplicación de las técnicas de impresión 3D al campo de las microondas

Todas las técnicas y/o métodos explicados tanto de polímeros como de metales son una gran tecnología clave para las aplicaciones de microondas y ondas milimétricas. Anteriormente hemos explicado que es la fabricación aditiva y sus diferentes tipos, además de cómo ha ido evolucionando a la largo de los años. Estas nuevas tecnologías han abierto un mundo para nuevas perspectivas para ingenieros de RF y los circuitos de microondas. Las tecnologías AM han permitido desarrollar aplicaciones de ingeniería basados en tecnologías con lecho en polvo como aplicaciones de sistemas de comunicación inalámbrica de ondas milimétricas, sensores portátiles, sistemas de imágenes de alta resolución y comunicaciones satelitales. Además, las tecnologías de impresión 3D han provocado la fabricación de componentes de ondas milimétricas que funcionan a frecuencias de gigahercios (incluso por encima de 100 GHz). Algunas otras aplicaciones de microondas son la creación de filtros de microondas construidos a partir de, por ejemplo, la técnica de fusión selectiva por láser, como podemos ver en la Figura 15. También permite realizar estructuras ligeras de guía de onda, bocinas metálicas o bocinas de material dieléctrico a partir de técnicas de metalización de polímero como podemos ver en la Figura 16 [20].

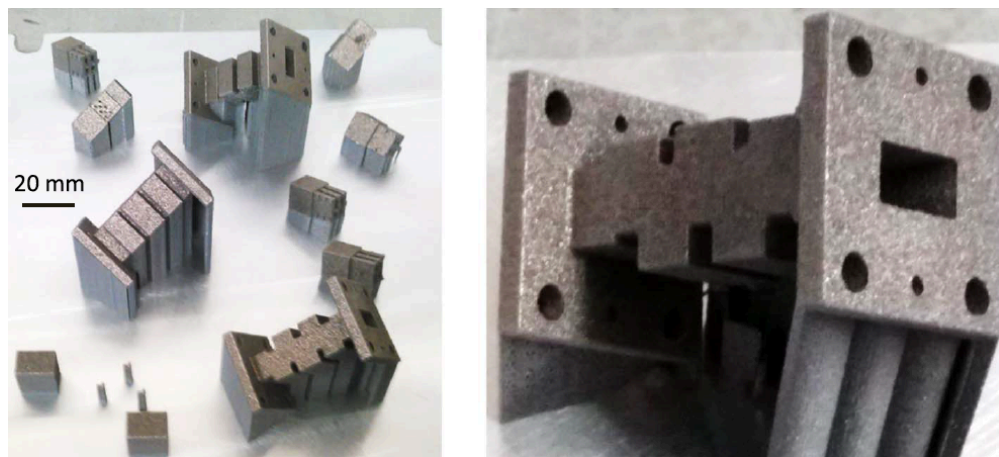


Figura 15. Filtros de microondas a partir de técnica de fusión selectiva por láser [20].

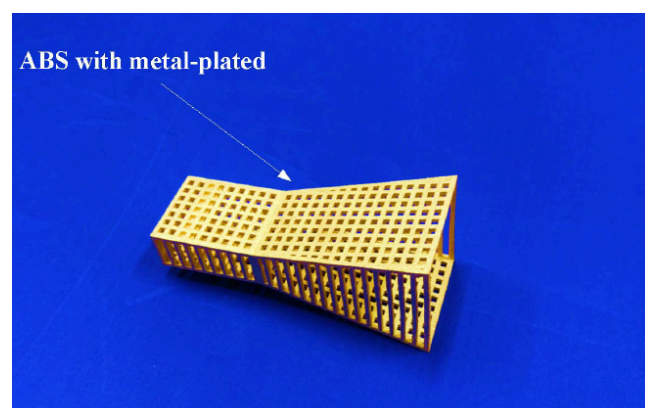


Figura 16. Bocina metalizada a partir de técnica de impresión de polímero [21].

La tecnología aditiva (AM) también ha podido fabricar circuitos y antenas de microondas con resultados mejores que las técnicas tradicionales. Además, también se han desarrollado estructuras de guía de onda rectangular mallada reduciendo su peso, para aplicaciones de alta

potencia con pérdidas reducidas. Gracias a esta estructura, se ha podido reducir el peso y el material utilizado hasta un 22% respecto a la estructura sin agujeros, logrando incluso unos resultados de hasta un aumento de solo el 5% en la constante de atenuación. En la Figura 17, podemos observar un ejemplo de esta.

Como vemos en la Figura 17, contiene unos términos definidos como “ $m_a$ ” y “ $m_b$ ”, que son las dimensiones de los agujeros cuadrados de las paredes de la guía, y la dimensión entre los cuadrados, respectivamente. En este ejemplo miden  $m_a = 1.44 \text{ mm}$  y  $m_b = 1.56 \text{ mm}$ . Podemos observar una foto de esta estructura fabricada con  $m_a = 1.44 \text{ mm}$  de lado en la Figura 18 de longitud 25,26 mm.

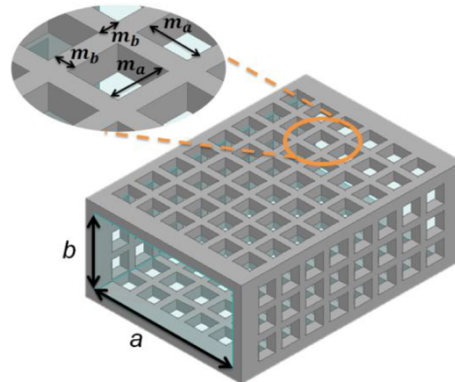


Figura 17. Estructura de la guía de onda rectangular con perforaciones rectangulares [22].

Esta estructura será muy parecida a la que diseñaremos para nuestro trabajo, con dimensiones y características diferentes.

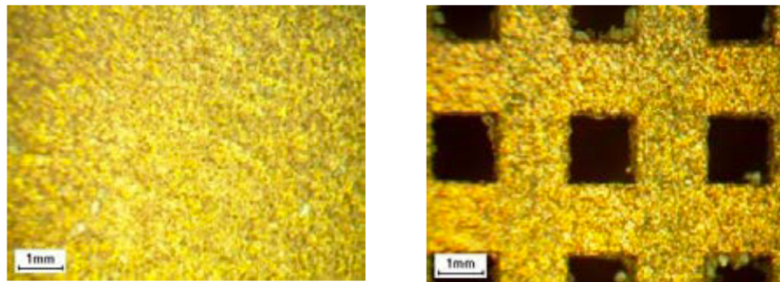


Figura 18. Fabricación guía de onda rectangular con agujeros de 1.44 mm de lado [22].

Otro ejemplo a raíz de esta guía de onda anterior es un filtro de Chebyshev con una frecuencia de 16,5 GHz y un ancho de banda de 700 MHz, como vemos fabricado en la Figura 19. Comparan las dos guías de onda rectangulares sin mallar y mallada, para comparar los resultados y saber si esta estructura se puede utilizar para diseñar componentes. La Figura 20, contiene todos los datos extraídos de las medidas, donde se puede observar que, reduciendo el peso de la guía a través de los agujeros, consiguen un efecto casi insignificante para el rendimiento en alta frecuencia [22].

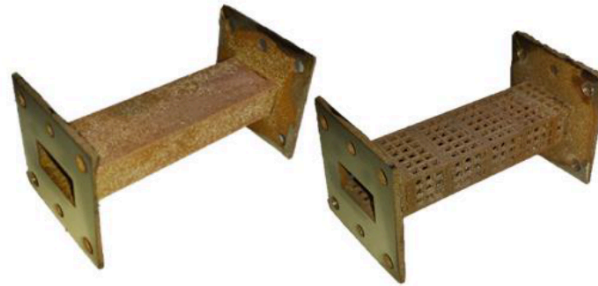


Figura 19. Filtro fabricado sin malla y filtro fabricado mallado [22].

	Filter	$f_0$ (GHz)	3 dB BW (GHz)	Min. IL (dB)	Max. RL (dB)
Simulated	Solid	16.52	0.69	0.84	35
	Meshed $m_a = 1.8$ mm $m_b = 1$ mm	16.35	0.67	1.23	27
Measured	Solid	16.13	0.59	1.15	14.2
	Meshed $m_a = 2.17$ mm $m_b = 0.63$ mm Density= 0.59	15.91	0.62	1.59	8.11

Figura 20. Datos extraídos de las medidas de los filtros (Figura anterior) diseñados [22].

### 3.3 Técnica de impresión utilizada

Debido a los motivos expuestos anteriormente, en nuestro proyecto se ha seleccionado las técnicas de manufacturación aditiva directamente en metal. De todas las técnicas expuestas previamente, se utilizará la técnica BMD, que es la que se dispone en nuestras instalaciones. A continuación, se explicará con mayor detalle la técnica utilizada.

A partir del software en la nube de Desktop Metal [23], se pueden crear piezas perfectas con una complejidad altísima. Desktop Metal da servicio a empresas de manufactura e ingeniería, haciendo fácil imprimir piezas de manera sencilla y rápida. Esta técnica está basada en la técnica BMD explicada anteriormente.

Como hemos visto, consiste en la extrusión de material para crear el objeto 3D. Utiliza como material unas barras de polvo de metal unidas por cera y aglutinante de polímero. El proceso consiste en calentar esas varillas e ir creando el objeto capa por capa como primera etapa. Como segunda etapa, tendríamos el desaglutinante para eliminar esa cera y polímero utilizado en las varillas. Y como última etapa, una sinterización del prototipo final.



## MIM vs. Bound Metal Deposition™ (with the Studio System™)

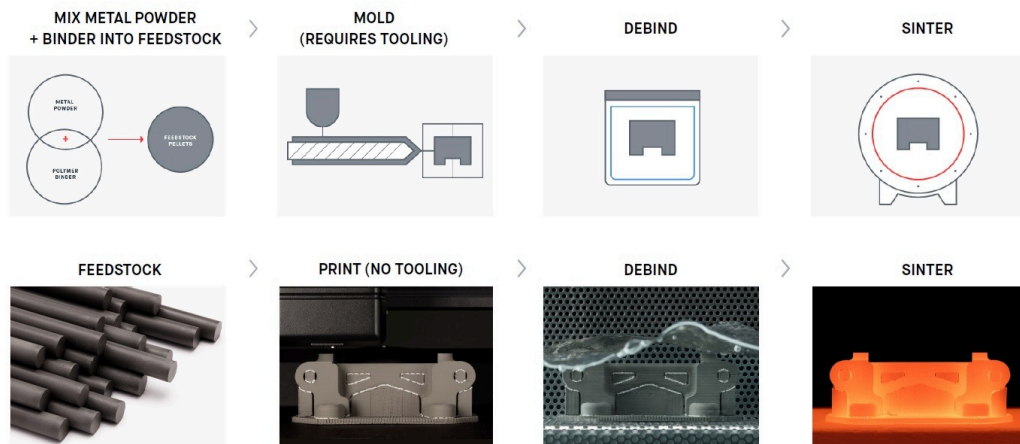


Figura 21. Comparativa entre proceso de técnica MIM y de proceso BMD [23].

Este método de deposición de metal ligado es un sistema que automatiza la impresión 3D en metal a partir de estos tres pasos (ver Figura 21) explicados a continuación.

La técnica MIM (Moldeo por inyección de metales) tiene muchas similitudes con BMD, pero con la diferencia de que en la primera fase “Print” de producción, el objeto en MIM se crea a partir de un molde de acero, y en BMD se construye en la impresora capa por capa.

### 1. Etapa de impresión “Print”

Este método seleccionado utiliza la impresora Studio System (ver Figura 22). El proceso llamado Bound Metal Deposition o BMD es muy similar a la técnica de filamento fundido FDM para plástico. Además, BMD también es muy diferente a procesos como el de sinterizado laser directo sobre metal (DMLS) ya que este utiliza un láser para sinterizar el polvo de metal y depositarlo en la placa de impresión. El proceso de impresión es bastante sencillo. El material empleado son unas barras de polvo de metal que se mantiene unidas a través de cera y polímero. Estas varillas se calientan y a partir de un extrusor caliente se va creando el objeto 3D capa por capa y se va depositando en una placa de construcción. Para evitar que el objeto se quede pegado a la plataforma, se deposita una capa de cerámica entre ellos para así evitarlo. Así, se crea el prototipo impreso línea por línea. Esta parte inicial se denomina “pieza verde”.



Figura 22. Impresora Studio System [23].



2. Etapa de desaglomerado “Debind”

Una vez elaborada la pieza se pasa por un primer post procesamiento. En primer lugar, la pieza se sumerge en una solución química donde se disuelve y elimina del 30 al 70% del aglutinante primario utilizado para que las varillas quedasen unidas. Este aglutinante ayuda a retener la forma del prototipo, por ello se queda una pequeña cantidad de este material para que la pieza no se desplome. Se prepara así una superficie porosa para la siguiente etapa de sinterización. Por el color que queda, se suele llamar al objeto “Pieza marrón”.

3. Etapa de sinterizado “Sinter”

Una vez terminada las demás etapas, se pasa a la etapa de sinterizado. Este proceso se basa en meter el objeto en un horno donde se calienta casi a temperaturas cercanas a la fusión (puede llegar casi a los 1400° C), donde elimina el aglutinante sobrante, elimina la capa protectora de cerámica, y fusiona las partículas de metal para crear lentamente una pieza compacta y duradera. Y así, termina el proceso de la pieza metálica. Es la etapa más complicada de todas, ya que es donde se le da robustez a la pieza al llevarla cerca del punto de fusión [23].

## Capítulo 4. Optimización multiobjetivo

### 4.1 Conceptos de Optimización Multiobjetivo

En el campo de la ciencia y/o ingeniería en muchas ocasiones se dan problemas y requieren una solución optimizada. Normalmente esos problemas son varios, por lo que no existe una solución simultánea para los objetivos requeridos. Existe un conflicto entre estos objetivos y la mejora de uno de ellos puede producir el empeoramiento del otro y viceversa. Por todo esto, se busca una optimización multiobjetivo capaz de buscar una solución aceptable.

La optimización de un solo objetivo es una técnica que se utiliza para hallar los parámetros de diseños óptimos donde su propósito es minimizar una función objetivo y/o función de error [24]

$$\text{minimizar } x \in R^n f(x), \quad x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (4.1)$$

Donde  $x$  son los parámetros que queremos optimizar.

La función  $f(x)$  está ligada a

$$G_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, m_e \quad (i \in E) \quad (4.2)$$

$$G_i(x) \geq 0 \quad i = m_e + 1, \dots, m \quad (i \in I) \quad (4.3)$$

Donde  $G(x) : R^n \rightarrow R^m$  son las restricciones de igualdad y desigualdad.

Por lo tanto, cualquier valor del vector  $x$  que cumpla dichas restricciones anteriores, se encontrará en la región permitida (ver Figura 23). En esta Figura 23, podemos observar un ejemplo de región de dos parámetros que son  $\phi_1$  y  $\phi_2$ .

Además, el valor de  $f(x)$  se puede hallar mediante simulación o por medida.

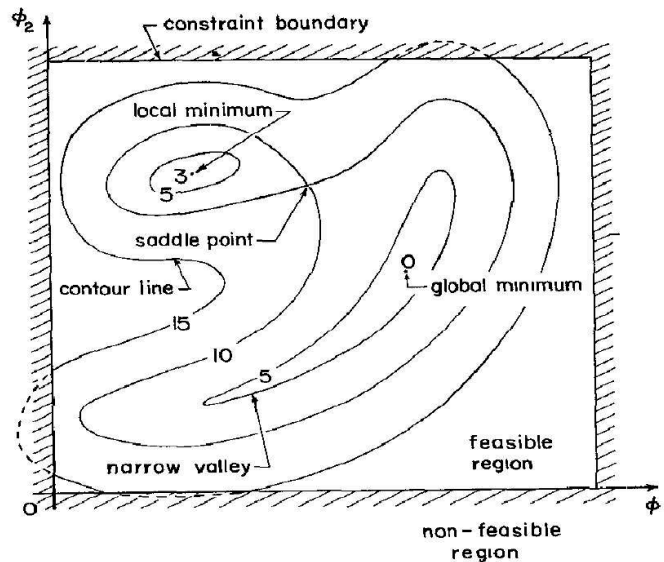


Figura 23. Ejemplo de una región de optimización [24].

Una función objetivo puede ser unimodal, multimodal, convexa o cóncava.



## 4.2 Algoritmos de optimización

Vamos a clasificar los algoritmos de optimización y explicar un breve resumen de cada uno de ellos.

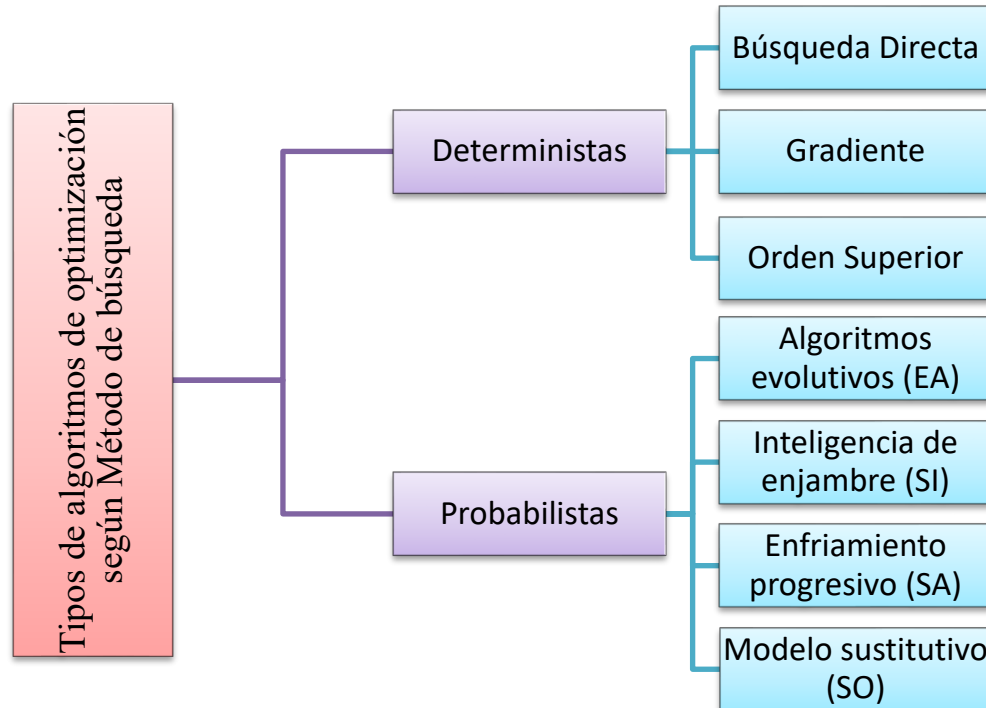


Figura 24. Clasificación de algoritmos de optimización.

Según el método de búsqueda podemos clasificarlos en dos tipos (ver Figura 24)

- Deterministas: este tipo de algoritmo tiene una base matemática y/o estrategia con el mismo comportamiento, capaz de explorar a fondo la información que se dispone para alcanzar el valor óptimo de forma instantánea. Algunos tipos de algoritmos deterministas son
  - Búsqueda directa: algoritmo que evalúa solo la función objetivo y es bastante apropiada si la función es discontinua. Algunos ejemplos pueden ser *One-at-a-time*, rotación de coordenadas, *simplex*...
  - Gradiente: este algoritmo evalúa la función objetivo y sus primeras derivadas. Algún ejemplo es, máximo descenso, *quasi-Newton*, mínimos cuadrados, gradientes conjugados...
  - Orden superior: este algoritmo evalúa la función objetivo, sus primeras derivadas y las segundas derivadas. Un tipo de algoritmo puede ser el método de Newton.
- Probabilistas: este otro tipo de algoritmo de computación natural se basa normalmente en conceptos naturales y aleatorios, que exploran todas las probabilidades existentes convergiendo de forma lenta. Los tipos más importantes pueden ser
  - Algoritmos evolutivos (EA): algoritmo inspirado en la evolución de las especies con ejemplos como el algoritmo genético (GA), la programación o estrategias evolutivas.
  - Inteligencia de enjambre (SI): este algoritmo está inspirado en la evolución colectiva de las colonias de hormigas u especies de aves. Algún tipo puede ser el *Particle Swarm Optimización* (PSO).

- Enfriamiento progresivo (SA): está originada por el enfriamiento progresivo y cristalización de materiales con ejemplos como *Simulated annealing*.
- Modelo sustitutivo (SO): algoritmo que aproxima a partir de funciones base radiales. Un tipo puede ser *Surrogate optimization*.

### 4.3 Optimización Multiobjetivo

Como hemos explicado anteriormente, la finalidad de la optimización multiobjetivo es minimizar una función objetivo, pero a veces, es necesario minimizar simultáneamente varias funciones objetivo

$$F(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_m(x)]^T \quad (4.4)$$

Cuando se quiere optimizar varias funciones objetivo a la vez, en principio no se sabe cuál puede ser la importancia relativa de cada una o simplemente la relación que pueden tener entre sí, aumentando la dificultad de comprenderlos a medida que el número de objetivos crece. En muchos casos, se cree en la propia intuición de la persona responsable del proyecto (en este caso el ingeniero), que es capaz de comprender y priorizar un objetivo u otro. Para comprender las preferencias del diseñador, se formula

$$\text{minimizar}_{x \in \mathbb{R}^n} F(x), \quad x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (4.5)$$

Donde la función  $F(x)$  está ligada a

$$G_i(x) = 0 \quad (i \in E) \quad (4.6)$$

$$G_i(x) \geq 0 \quad (i \in I) \quad (4.7)$$

Como  $F(x)$  es un vector, podemos observar que no va a existir una solución única. Esto se conoce como concepto de no inferioridad (Frente de Pareto), es decir, la mejora de un parámetro  $x$  en un objetivo implica el empeoramiento en otro objetivo y viceversa. A partir de esto, se define una región permitida como observamos en la Figura 25. Un punto  $x$  es no inferior si no existe otro punto de la región permitida que sea capaz de mejorar un objetivo sin la necesidad de empeorar otro.

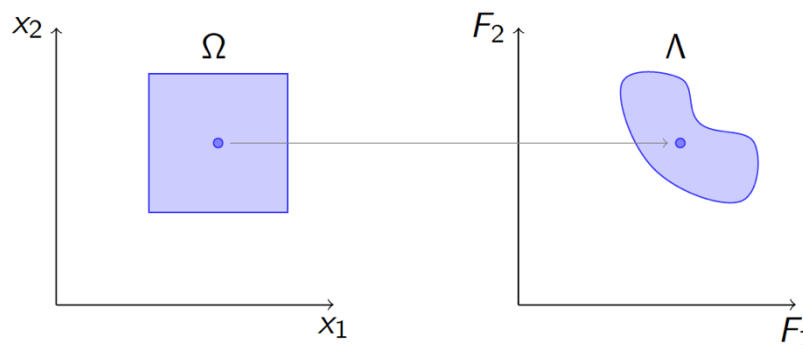


Figura 25. Región permitida en el espacio de las funciones objetivo [24].

La definición de que un punto  $x$  es no inferior, podemos determinarlo como

$$\begin{aligned} &\nexists \Delta x \text{ tal que } (x^* + \Delta x) \in \Omega \\ &F_i(x^* + \Delta x) \leq F_i(x^*), \quad i = 1, \dots, m \end{aligned}$$

$$F_i(x^* + \Delta x) < F_j(x^*), \quad \text{para algún } j$$

La finalidad de esto es conocer los puntos inferiores (ver Figura 26) y elegir cual puede ser el punto más adecuado para el diseño.

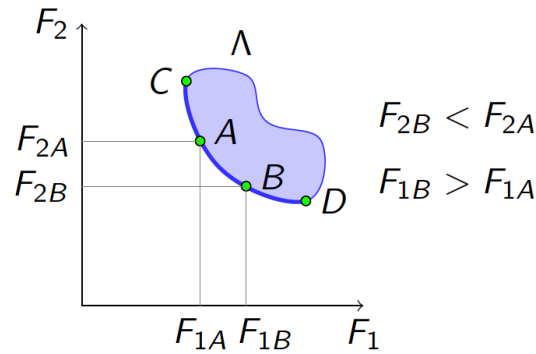


Figura 26. Ejemplo de puntos no inferiores [24].

Podemos tener varias estrategias para poder llegar a este objetivo nombrado, como por ejemplo la suma ponderada que utiliza un algoritmo de un objetivo en repetidas ocasiones o el método de consecución de objetivos, que es similar al de suma ponderada, pero fijando unos valores muy ambiciosos para los objetivos, que consigue encontrar el frente de Pareto incluso para regiones no convexas [24].

En nuestro caso, se obtendrá el Frente de Pareto utilizando el método de consecución de objetivos en CST y *Matlab*, como se especificará en el sexto capítulo.

## Capítulo 5. Simulación Electromagnética

Para la realización del trabajo de fin de grado expuesto, ha sido necesario utilizar un simulador electromagnético capaz calcular los campos electromagnéticos de diversas estructuras.

CST Microwave Studio es un software de simulación electromagnética (EM) capaz de diseñar, analizar y optimizar estructuras tridimensionales, además de estudiar el comportamiento radioeléctrico a frecuencias altas. A partir de este software se pueden crear prototipos con estructuras 3D complejas, con la ventaja de tener una precisión en los cálculos casi perfecta gracias al mallado y con la posibilidad de la exportación de los archivos con los resultados a otros programas o aplicaciones. Este software facilita el diseño y optimización de los componentes, con ciclos de trabajo cortos y unos costes muy reducidos. A continuación, podemos ver un ejemplo de diseño en CST en la Figura 27.

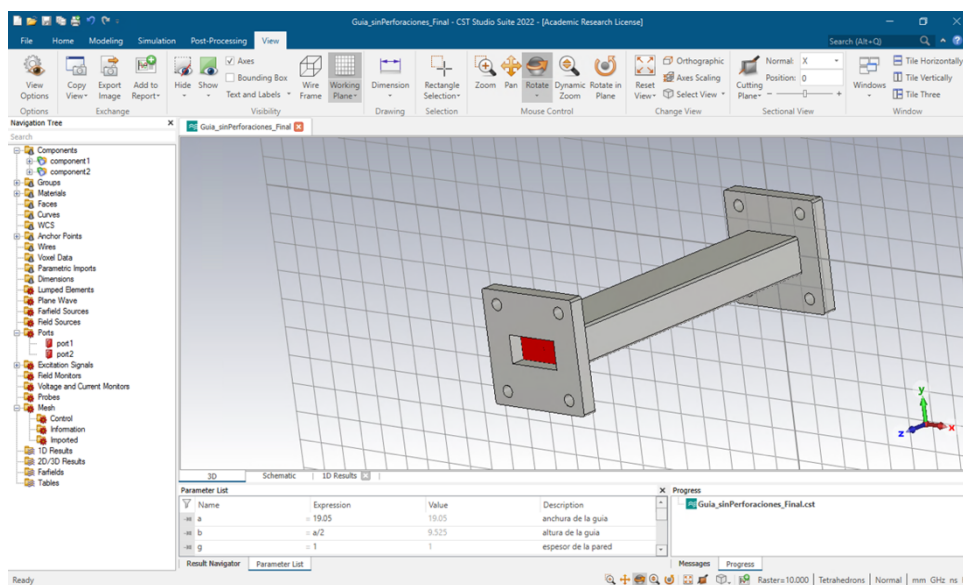


Figura 27. Ejemplo de diseño guía de onda en CST.

A partir de aquí, se explicarán las características fundamentales de CST:

Utiliza los llamados “Solvers”, métodos de elementos finitos (FEM), técnicas de integración finitas (FIT) y una matriz de línea de transmisión (TLM) capaces de otorgarnos las soluciones de las simulaciones a frecuencias elevadas. Además, el método de elementos finitos FEM contiene soluciones para aplicaciones de baja y alta frecuencia como dispositivos electromagnéticos, sensores o transformadores.

La optimización en CST es muy importante. Es capaz de optimizar sistemas y/o dispositivos electromagnéticos, parametrizando las geometrías de los prototipos o parametrizando las propiedades de los materiales. Gracias a esto, se puede estudiar el comportamiento de los dispositivos creados para encontrar una solución óptima y acorde a lo que debe cumplir. CST contiene algoritmos de optimización automáticos tanto locales como globales, para adaptar las propiedades y dimensiones geométricas de una estructura a los parámetros medidos o calculados. Los algoritmos locales son capaces de estudiar y corregir de manera muy rápida a partir de un mínimo local establecido, en cambio los globales, aunque sean más lentos, son más precisos, y seleccionan el valor más correcto analizando más a fondo el problema.

CST utiliza un modelo de sistemas electromagnéticos capaz de gestionar y crear proyectos efectivos de simulación de sistemas electromagnéticos (EM). Una vez creados estos proyectos,

gracias a este modelo y la optimización del software, se puede analizar diferentes factores importantes para un posterior estudio del proyecto, como las corrientes, los campos y/o los parámetros S. Es capaz de compararlos con otros resultados de diferentes solucionadores para un proceso de resolución mucho más rápido y eficiente.

La interfaz de usuario es una de las características más importantes de este software. Este entorno ofrece abundantes opciones relacionadas con los materiales, para poder estudiar fenómenos diversos, efectos plasmónicos y fotónicos, emisiones de electrones secundarios etc, para poder examinar el rendimiento de una pieza y observar sus propiedades de interés. Se ofrece un modelo CAD con estructura interna, campo electromagnético realista y propiedades térmicas, además de un mallado automático.

Se pueden crear diferentes modelos en CST. Podemos diferenciar a algunos en la siguiente tabla (Tabla 3).

<p><b>High Frequency</b></p> 	<p>Esta herramienta es perfecta para modelos EM 3D de simulación de alta frecuencia trabajando en el dominio del tiempo.</p>	<p><b>Cable</b></p> 	<p>Especializada para el análisis de sistemas de cables, interferencias y susceptibilidad electromagnéticas de cables complejos.</p>
<p><b>Low Frequency</b></p> 	<p>Esta dedicada a la simulación 3D de problemas estáticos y de baja frecuencia.</p>	<p><b>Particle</b></p> 	<p>Este módulo es para el análisis de partículas cargadas en campos EM de simulaciones 3D.</p>
<p><b>Thermal &amp; Mechanics</b></p> 	<p>Este modelo es utilizado para tensión térmicas y mecánicas.</p>	<p><b>Schematic</b></p> 	<p>Herramienta para poder crear esquemáticos y simular circuitos con diversos bloques.</p>
<p><b>PCBs &amp; Packages</b></p> 	<p>Esta herramienta de 3D para EM realiza la simulación precisa de PCB.</p>	<p><b>Filter Design</b></p> 	<p>Este método se utiliza para el diseño de diferentes tipos de filtros.</p>
<p><b>Antenna Magus</b></p> 	<p>Es una herramienta para el diseño de antenas y su proceso de modelado.</p>		

Tabla 3. Modelos de diseño en CST [25].

Además, se pueden crear proyectos a partir de unas determinadas áreas de aplicación. Aquí podemos diferenciar las opciones de CST Studio. En la Figura 28, se pueden distinguir todo tipo de aplicaciones del área de las microondas y óptica, que es el área seleccionada para nuestro proyecto. Podemos diseñar prototipos de antenas, circuitos, aplicaciones de radar, aplicaciones biomédicas, aplicaciones ópticas y estructuras periódicas.

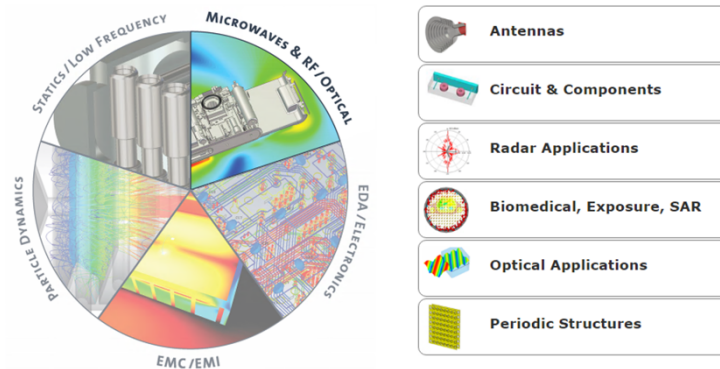


Figura 28. Aplicaciones de diseño en el área de microondas y óptica [25].

Algunas otras áreas importantes que podemos utilizar en CST es la electrónica, compatibilidad electromagnética (EMC) y la interferencia electromagnética (EMI), aplicaciones de partículas cargadas y, aplicaciones de problemas estáticos y piezas de baja frecuencia [25].

Una vez se requiere empezar la pieza a diseñar, se encuentran varias funciones de controles y comandos. Vamos a hacer una breve explicación básica de los comandos más utilizados en nuestro proyecto.

Cuando se empieza el prototipo, la primera pestaña que aparece es la de “Home” (Figura 29). En ella podemos diferenciar varios controles principales de uso como “Unidades”, “Empezar Simulación”, “Historial” y una gran variedad de comandos más.

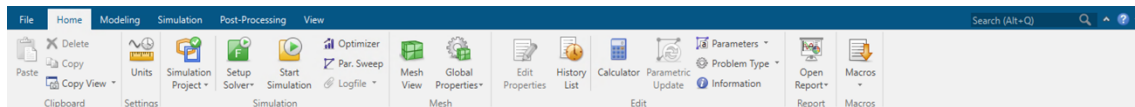


Figura 29. Pestaña de "Home" en CST.

A continuación, podemos observar (Figura 30) el control de “Modeling” en el cual utiliza los comandos de diseño para crear la pieza que deseemos.

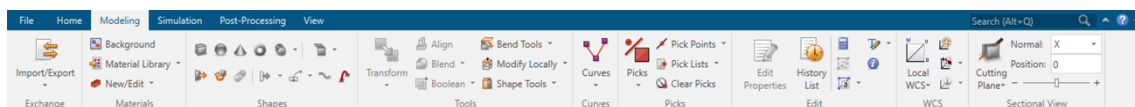


Figura 30. Pestaña de modelado de CST.

El control de “Simulation” contiene el panel de control el cual se dirige la simulación de la pieza creada. Podemos ver en la Figura 31 algunos comandos como

- “Frequency”, herramienta donde se define la frecuencia a la que queremos que simule nuestra pieza.
- “Boundaries” (Condiciones de contorno) donde se fijan los límites de la estructura para el cálculo de las ecuaciones de onda.

- “Waveguide Port” para la creación de puertos que permite alimentar a la estructura y obtener la respuesta del dispositivo.
- “Parameter Sweep” herramienta la cual permite la simulación automática variando un parámetro o varios parámetros entre un rango de límite mínimo y máximo con el paso que se defina. Así se pueden realizar barridos y simular de manera más rápida.

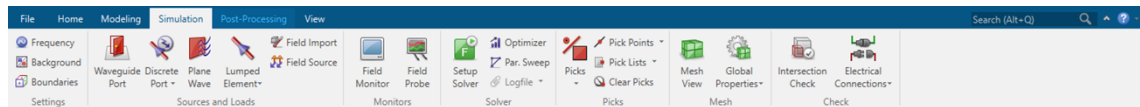


Figura 31. Pestaña de simulación en CST.

Cuando se realiza la simulación, aparece el comando de “Post-Processing” que se encarga del control de los resultados obtenidos (ver Figura 32).

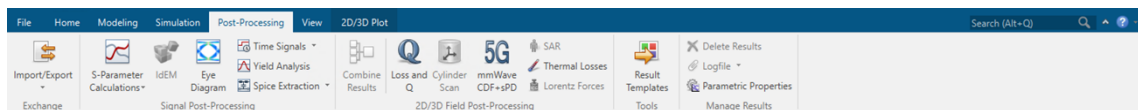


Figura 32. Comandos de post procesamiento en CST.

Por último, podemos observar comandos como “View” (Figura 33), que se encarga de las opciones para poder ver y manejar la pieza creada.

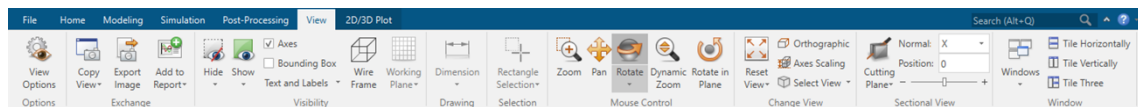


Figura 33. Pestaña de “View” en CST.

Otros controles importantes son el de “Navigation Tree” (Figura 34), opción donde se encuentran todas las pestañas de las piezas diseñadas, materiales elegidos, puertos, de resultados (como resultados 1D (Parámetros S), resultados 2D/3D, tablas de resultados...).

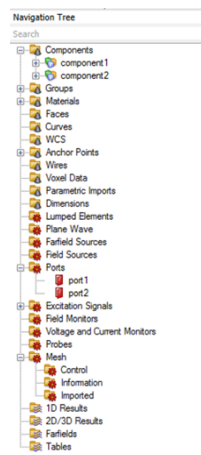


Figura 34. Pestaña de “Navigation Tree” en CST.



Una de las pestañas más usadas para realizar nuestro proyecto, fue la pestaña de “*ID results*”, donde se mostraban los parámetros S que necesitábamos analizar para llegar a un resultado óptimo. Para llegar a ella, dentro de “*Navigation Tree*”, se encuentra la carpeta “*ID results*”, que a su vez se encuentran todas las carpetas de la Figura 35. En “*S-Parameters*” ya se ubican los parámetros S de interés.

Algunos ejemplos de gráficas capturadas durante algunas simulaciones han sido (ver Figura 36 y 37).

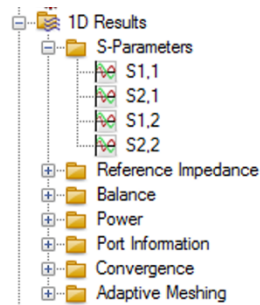


Figura 35. Carpeta de parámetros S de CST.

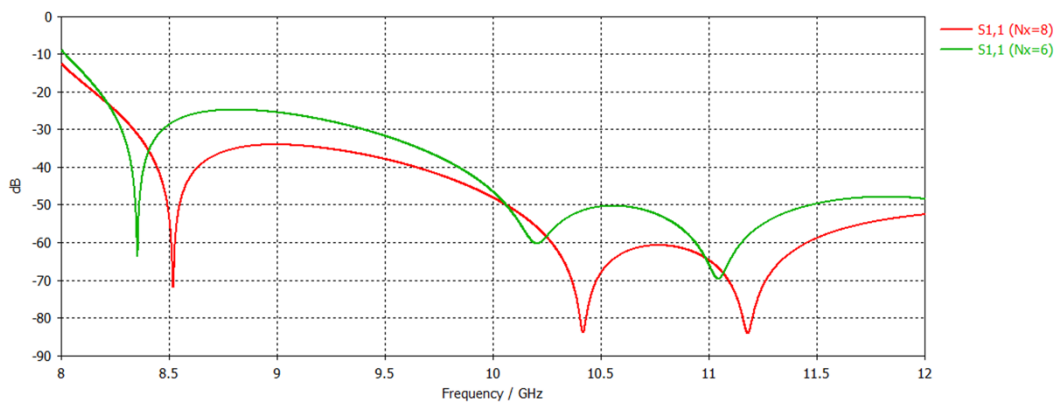


Figura 36. Resultado módulo S11 con valor de  $N_x=6$  y  $N_x=8$  representados en verde y rojo respectivamente.

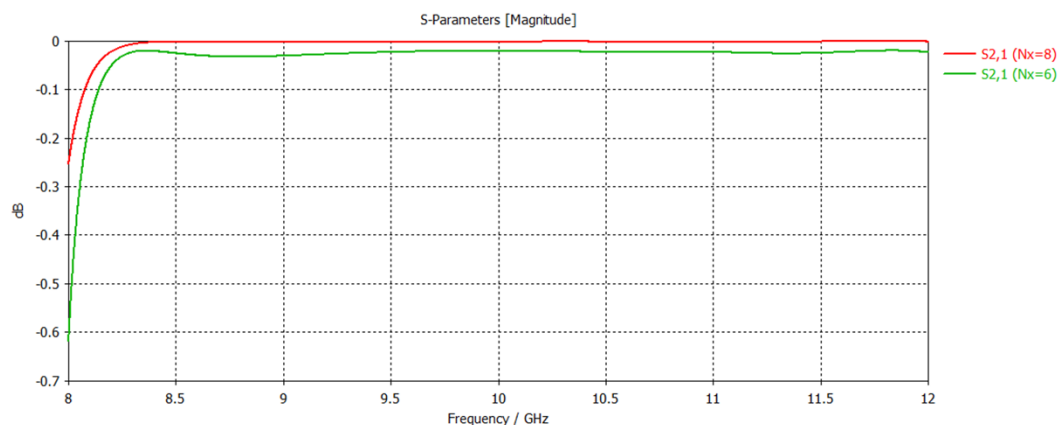


Figura 37. Resultado módulo S21 con valor de  $N_x=6$  y  $N_x=8$  representados en verde y rojo respectivamente.



También podemos mostrar la distribución de campo eléctrico a lo largo de la guía de onda, sacado de la pestaña “2D/3D results” (ver Figura 38 y 39).

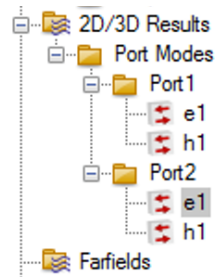


Figura 38. Carpeta de resultados 2D/3D de CST.

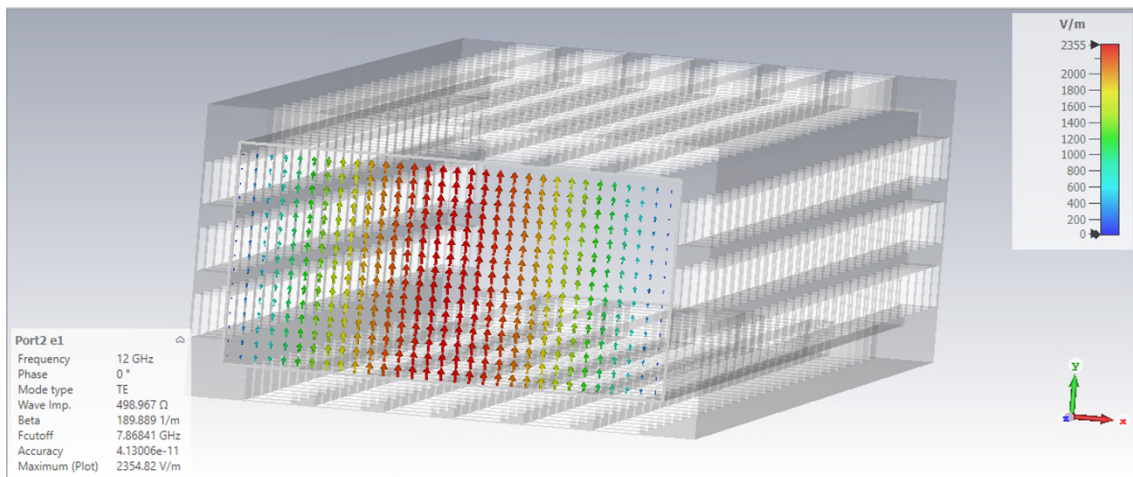


Figura 39. Resultado de distribución de campo eléctrico 2D/3D en el puerto 2.

## Capítulo 6. Diseño de la guía 3D perforada

En este capítulo del trabajo se va a abordar el diseño de la guía de onda rectangular perforada. Además, se va a mostrar la geometría de las diferentes estructuras que se han propuesto, así como sus parámetros físicos más importantes y el porqué de la elección de un diseño u otro. A través de los análisis paramétricos de las diferentes dimensiones físicas, se va a evaluar que parámetros afectan en mayor o menor medida a la respuesta eléctrica del prototipo. Es importante destacar que también se abordara la implementación de la optimización multiobjetivo explicada anteriormente, y su aplicación al diseño final escogido.

### 6.1 Estructura de la guía perforada

Para el diseño de nuestra guía de onda rectangular con perforaciones se realizó un estudio de cómo se podía diseñar de la mejor manera y de forma sencilla.

#### 6.1.1 Planteamiento de un primer diseño

Se empezó con un primer planteamiento del diseño basado en una estructura de cuatro paredes rectangular y hueca, con un espesor de las paredes “t” y, con una anchura “w”, una altura “al” y una longitud “z” específicos. Una vez se tenía esta estructura rectangular hueca con sus respectivas medidas, se procedió a realizar las perforaciones. Estos orificios se realizaron con una forma cuadrada y/o rectangular, dependiendo del valor que especificásemos de sus lados. Además, el número de perforaciones se calculó a partir de los parámetros de separación entre ellos “px” y “pz”, teniendo más agujeros cuanto menos era la separación entre ellos. El número de agujeros o perforaciones “nx” y “nz” estaban ligados a la siguiente expresión

$$n_x = \text{round} \left( \frac{\frac{w}{p_x}}{2} - 1 \right) \quad (6.1.1)$$

$$n_z = \text{round} \left( \frac{\frac{z}{p_z}}{2} - 1 \right) \quad (6.1.2)$$

Estas perforaciones se realizaron en las 4 paredes de la estructura de la guía. También se añadió una sección de guía de onda rectangular de entrada y salida con una medida específica “lin” para así acceder a las perforaciones y aislar el efecto de éstas del puerto de entrada. Como observamos en la Figura 41, así queda el primer planteamiento del diseño del trabajo, donde se puede observar que obtenemos tres agujeros en el eje X y nueve en el eje Z en los lados más anchos del rectángulo, y un agujero en el eje X y nueve en el eje Z en los laterales del rectángulo, como se observa en los parámetros de “nx” y “nz” en CST. En la Figura 40, podemos ver los parámetros de diseño de manera más visual.

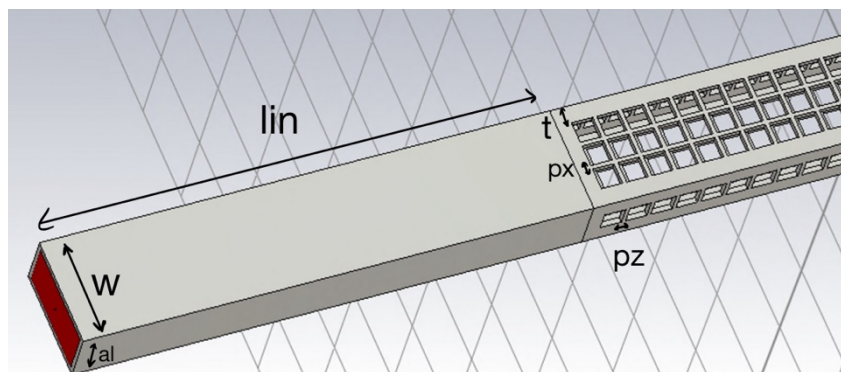
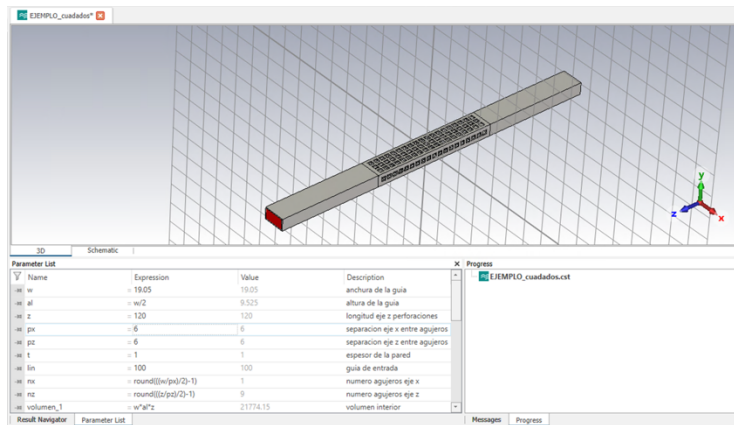
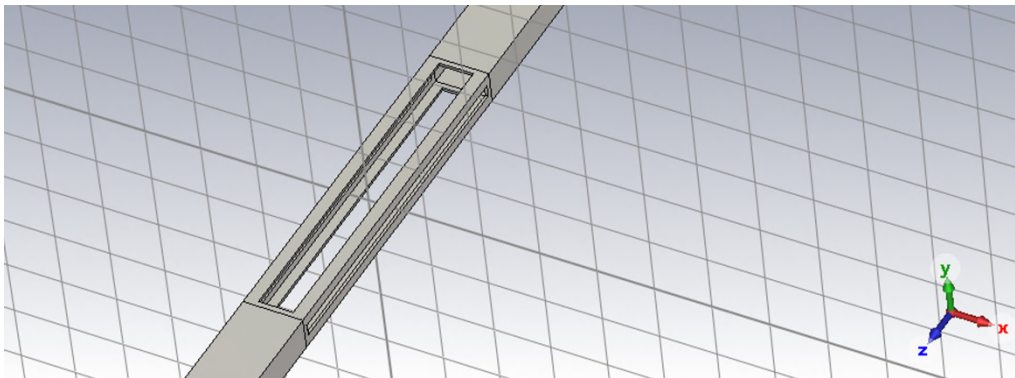


Figura 40. Parámetros de diseño de primer prototipo de guía de onda perforada



**Figura 41. Primer diseño de la guía de onda rectangular con separación de 6 mm entre las perforaciones.**

Pero este diseño tenía un problema, y es que como se podía controlar el tamaño de los agujeros y la separación entre ellos de centro a centro, se podían llegar a generar estructuras que únicamente estuviesen formadas por un agujero muy grande con una separación casi inexistente, llegando a crear una guía totalmente vacía (ver Figura 42), siendo un problema para superar los objetivos propuestos.



**Figura 42. Diseño de la guía con problema en las perforaciones.**

Por este problema, ya que controlar el número de perforaciones y el tamaño de los hilos era un error y debíamos solucionarlo cambiando la definición de los parámetros, se procedió a realizar otro diseño más robusto.

Además, se llegó a la conclusión de que no era necesario añadir un tramo de longitud inicial y final a la guía, ya que no afectaba finalmente a su respuesta

### 6.1.2 Diseño final de la guía rectangular con perforaciones

Para el diseño de la guía de onda rectangular con perforaciones se ha basado en el diseño a partir de un patrón (hilos), típico de diseños para impresión 3D. Para este diseño, se empieza con el diseño de un bloque de celda unidad, basado en un rectángulo de dimensiones “ $g$ ” (tamaño/espesor de los hilos), “ $b+2h$ ” y “ $a+2h$ ”, donde “ $b$ ” es la altura de la guía, “ $a$ ” es el ancho de la guía. Esta celda unidad aparte de contener el rectángulo de las dimensiones explicadas, está unido a unas tiras, tanto en los lados del rectángulo más anchos como en los laterales, con forma de rectángulo de dimensiones “ $dz$ ” (separación entre hilos en el eje  $z$ , dirección de propagación), “ $g$  y “ $h$ ” (el espesor de estas tiras), colocadas unas al lado de las otras separadas “ $dx$ ” (separación entre tiras en el eje  $x$ ) o “ $dy$ ” (separación entre tiras en el eje  $y$ ). Para que quede claro la diferencia entre “ $g$ ” y “ $h$ ”, el parámetro “ $g$ ” es el tamaño de los hilos, es decir, en las paredes horizontales (superior e inferior) de la guía de onda corresponderá con la anchura del hilo, y en las paredes verticales (derecha e izquierda) de la guía de onda corresponderá con la altura; en cambio “ $h$ ” es el espesor de las paredes y es un valor fijo de 1,5 mm para asegurarnos que la estructura no tenga paredes finas y se rompa en el proceso de fabricación. El parámetro “ $N_x$ ” es el número de perforaciones que vamos a repetir en los lados de arriba y abajo, por lo tanto, se repetirán las tiras “ $N_x$ ” veces. Como hemos explicado, en los laterales también se colocan estas tiras con las mismas dimensiones, pero separadas “ $dy$ ” y repetidas “ $N_y$ ” veces. A continuación, en la Figura 43, se observa un boceto a modo de explicación más visual de este primer paso, con sus respectivas dimensiones.

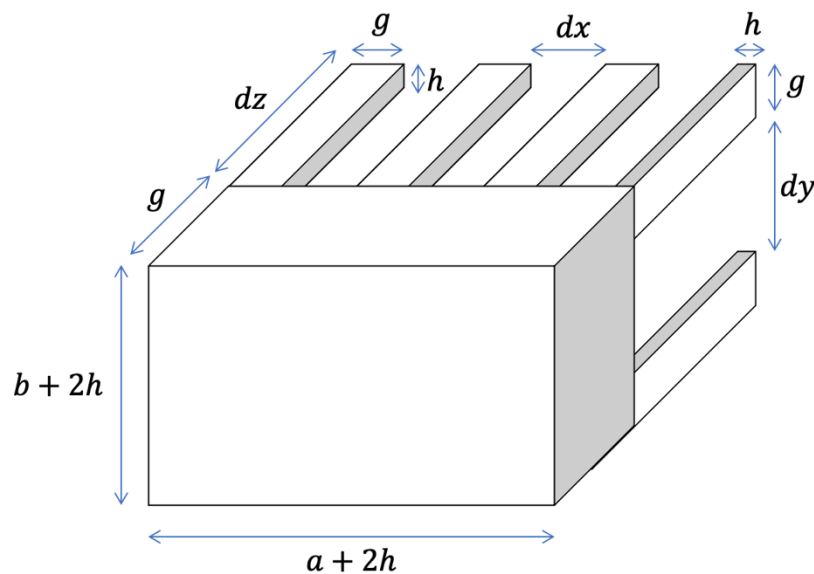


Figura 43. Primeros pasos de la creación de celda unidad con hilos.

Una vez creado el bloque principal con los hilos en las 4 paredes, se agujerea el rectángulo principal con un bloque de vaciado de dimensiones “ $dz+g$ ”, “ $a$ ” y “ $b$ ” (ver Figura 44) que corresponde con el tamaño de la sección transversal de la guía de onda.

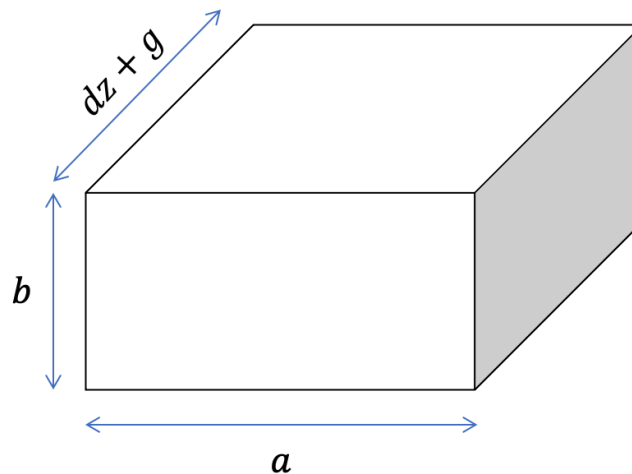


Figura 44. Bloque de vaciado.

Una vez creado el bloque principal, con sus respectivos hilos y su vaciado, se va replicando (ver Figura 45) cada “dz+g”, donde aplicando una longitud total de la zona de agujeros llamada “L” (con una  $L_{deseado} \approx L$ ), sacamos “Nz” que serán los agujeros que caben en nuestra longitud de la guía

$$N_z = \text{ceil}\left(\frac{L}{dz+g}\right) \quad (6.1)$$

Cuando se selecciona el número de agujeros en el eje Z dependiendo de los parámetros explicados, se coloca un último bloque rectangular para que quede simétrico en la zona de entrada y salida de la guía (ver Figura 45).

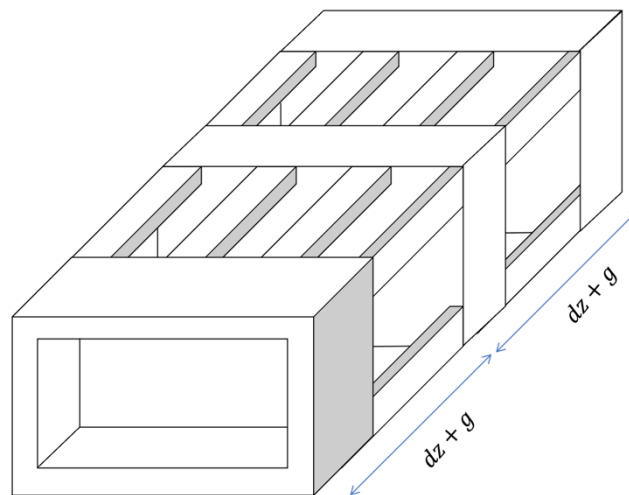


Figura 45. Bloque principal replicado “Nz” veces.

La Tabla 4, muestra los parámetros geométricos que se han ido mencionado anteriormente, con sus respectivas definiciones del “Parameter List” de CST.

Los parámetros más importantes a tomar en cuenta en nuestro diseño es el espesor de los hilos “g”,  $D = \frac{d_z}{d_x}$  (relación entre separación hilos eje z y eje x), ratio (relación entre la masa de la guía

de onda con agujeros y sin agujeros) y los agujeros en el eje x “Nx”, siendo los agujeros del eje y “Ny” (Ny=Nx/2).

Name	Expression	Value	Description
g	= 0.25	0.25	espesor de la pared
D	= 2	2	dz/dx
ratio	= masa/masa_sin	0.261346239854781	ratio
a	= 19.05	19.05	anchura de la guía
b	= a/2	9.525	altura de la guía
h	= 1.5	1.5	altura de la pared
dx	= ((a-(Nx+1)*g)/Nx)	2.88333333333333	tamaño agujero en anchura
Nx	= 6	6	agujeros en eje x (ancho)
dy	= ((b-(Ny+1)*g)/Ny)	2.84166666666667	tamaño agujero en altura
Ny	= Nx/2	3	agujeros en eje y (alto)
dz	= D*dx	5.76666666666666	tamaño agujero en longitud
Nxmax	= round((a+2*h)/(g+dx)-1)	6	agujeros eje x maximo
L	= Nz*(dz+g)	102.283333333333	
Nz	= round(Ldeseado/(dz+g))	17	agujeros en eje z longitud
Ldeseado	= 100	100	
lin	= 80	80	largo de entrada y salida
V_hueco	= a*b*(dimension_eje_z)	19696.5331875	Volumen del hueco
V_1agujero	= dx*dz*h	24.9408333333333	volumen de un agujero
V_agujeros	= V_1agu_x*Agu_to_x+V_1agu_...	7595.1325	volumen de los agujeros
agu_to	= Agu_to_x+Agu_to_y	306	agujeros totales de la guía
V_to	= V_sin-V_agujeros	2687.26625	VOLUMEN TOTAL GUIA
masa	= V_to*den_cobre	24.0779056	masa con agujeros
den_cobre	= 8.96*10^-3	0.00896	densidad del cobre
masa_sin	= V_sin*den_cobre	92.1302928	masa sin agujeros
dimension_eje_z	= (Nz+1)*dz+(Nz+2)*g	108.55	dimension del eje Z de la guía
V_entero	= (a+2*h)*(b+2*h)*(dimension_...	29978.9319375	Volumen guía sin hueco
V_sin	= V_entero-V_hueco	10282.39875	volumen de guía sin agujeros
Af	= 38.30	38.30	Anchura flange
Wfv	= 14.25*2	28.5	altura agujeros flange
Wfh	= 13.21*2	26.42	anchura agujeros flange
día_f	= 4.085	4.085	diametro agujeros flange
t	= 5	5	espesor flange
Agu_to_x	= Nx*Nz*2	204	agujeros totales eje x
Agu_to_y	= Ny*Nz*2	102	agujeros totales eje y
V_1agu_x	= dx*dz*h	24.9408333333333	volumen 1 agujero eje x
V_1agu_y	= dy*dz*h	24.5804166666667	volumen 1 agujero eje y

Tabla 4. Parámetros de un ejemplo de diseño de guía de onda rectangular.

La siguiente ecuación muestra la expresión utilizada para calcular el ratio:

$$ratio = \frac{masa}{masa\_sin} \quad (6.2)$$

Donde “masa” corresponde a la masa de la guía de onda con perforaciones y la “masa\_sin” a la masa de la guía de onda de igual dimensiones, pero sin perforar. Las masas las podemos calcular utilizando el volumen correspondiente a la guía de onda con o sin perforaciones y la densidad del material seleccionado, siendo este el cobre debido a que lo utilizaremos para la impresión 3D de las guías, utilizando la siguiente ecuación

$$masa = V \cdot den\_cobre \quad (6.3)$$

La masa con perforaciones se calculó:

$$masa = V_{to} \cdot den\_cobre \quad (6.4)$$



Y la masa sin perforaciones

$$masa_{sin} = V_{sin} \cdot den\_cobre \quad (6.5)$$

Siendo  $V_{to}$  el volumen total de la guía (Volumen sin agujeros de la guía menos el volumen con agujeros de la guía, como podemos ver en la ecuación 6.6) y cómo podemos ver en la Tabla 4,  $V_{sin}$  es el volumen sin perforaciones total (Volumen de la pieza entera menos el volumen del bloque de vaciado, como vemos en la ecuación 6.7), y “den\_cobre” la densidad del cobre.  $V_{agujeros}$ , es el volumen de los agujeros del eje x por el número de agujeros total de ese eje x, más el volumen de los agujeros del eje y por el número de agujeros total del eje y (podemos ver su ecuación en 6.8)

$$V_{to} = V_{sin} - V_{agujeros} \quad (6.6)$$

$$V_{sin} = V_{entero} - V_{hueco} \quad (6.7)$$

$$V_{agujeros} = V_{1agu_ejex} \cdot Agu_{to_ejex} + V_{1agu_ejey} \cdot Agu_{to_ejey} \quad (6.8)$$

Vamos a explicar más detalladamente cada parte de las ecuaciones anteriores 6.7 y 6.8.

$V_{entero}$  es el volumen de la pieza entera sin ningún tipo de hueco:

$$V_{entero} = (a + 2h) \cdot (b + 2h) \cdot (dimensión_{ejez}) \quad (6.9)$$

Siendo  $dimensión_{ejez} = (N_z + 1) \cdot dz + (N_z + 2) \cdot g \quad (6.10)$

la dimensión del eje z de la guía y  $V_{hueco}$  :

$$V_{hueco} = a \cdot b \cdot dimensión_{ejez} \quad (6.11)$$

Donde  $a$  corresponde con la anchura y  $b$  con la altura de la guía de onda, y  $dimensión_{ejez}$  con la longitud en el eje z.

La ecuación 6.8 parte de el volumen de cada agujero del eje correspondiente x ó y, siendo

$$V_{1agu_ejex} = dx \cdot dz \cdot h \quad (6.12)$$

$$V_{1agu_ejey} = dy \cdot dz \cdot h \quad (6.13)$$

dónde  $dx$ ,  $dy$  y  $dz$  son los tamaños de los agujeros en cada eje, y  $h$  es el espesor de las paredes. Y los agujeros totales del eje x y eje y puede calcularse como

$$Agu_{to_ejex} = N_x \cdot N_z \cdot 2 \quad (6.14)$$

$$Agu_{to_ejey} = N_y \cdot N_z \cdot 2 \quad (6.15)$$

Donde, “Nx” es el número de perforaciones en el eje x, “Ny” en el eje y, y “Nz” en el eje z. El número de agujeros se multiplica por 2, ya que hay dos paredes verticales y 2 horizontales.

Podemos ver las diferentes fórmulas enumeradas anteriormente en la Figura 46.

V_hueco	= a*b*(dimension_eje_z)	19696.5331875	Volumen del hueco
V_1agujero	= dx*dz*h	24.94083333333333	volumen de un agujero
V_agujeros	= V_1agu_x*Agu_to_x+V_1agu_...	7595.1325	volumen de los agujeros
agu_to	= Agu_to_x+Agu_to_y	306	agujeros totales de la guía
V_to	= V_sin-V_agujeros	2687.26625	VOLUMEN TOTAL GUIA
masa	= V_to*den_cobre	24.0779056	masa con agujeros
den_cobre	= 8.96*10^-3	0.00896	densidad del cobre
masa_sin	= V_sin*den_cobre	92.1302928	masa sin agujeros
dimension_eje_z	= (Nz+1)*dz+(Nz+2)*g	108.55	dimension del eje Z de la guía
V_entero	= (a+2*h)*(b+2*h)*(dimension_...	29978.9319375	Volumen guía sin hueco
V_sin	= V_entero-V_hueco	10282.39875	volumen de guía sin agujeros
Agu_to_x	= Nx*Nz*2	204	agujeros totales eje x
Agu_to_y	= Ny*Nz*2	102	agujeros totales eje y
V_1agu_x	= dx*dz*h	24.94083333333333	volumen 1 agujero eje x
V_1agu_y	= dy*dz*h	24.58041666666667	volumen 1 agujero eje y

Figura 46. Definiciones y fórmulas para calcular Ratio de CST.

Otros parámetros interesantes de explicar son las perforaciones de la cara horizontal “dx” y de la cara vertical “dy” de la guía perforada.

- “dx” se calcula como

$$dx = \frac{(a-(N_x+1) \cdot g)}{N_x} \quad (6.16)$$

Donde “a” es la anchura de la guía, “Nx” el número de perforaciones en el eje x y “g” es el tamaño de los hilos.

- “dy” se calcula como:

$$dy = \frac{(b-(N_y+1) \cdot g)}{N_y} \quad (6.17)$$

Donde “b” es la altura de la guía, “Ny” el número de perforaciones en el eje “Y” y “g” es el tamaño de los hilos.

Un ejemplo de la guía de onda con perforaciones utilizando los datos de la Tabla 5, se puede observar en la Figura 47.

Nx	6
g	1
h	1.5
D	1.25

Tabla 5. Parámetros del diseño de la guía de onda rectangular.



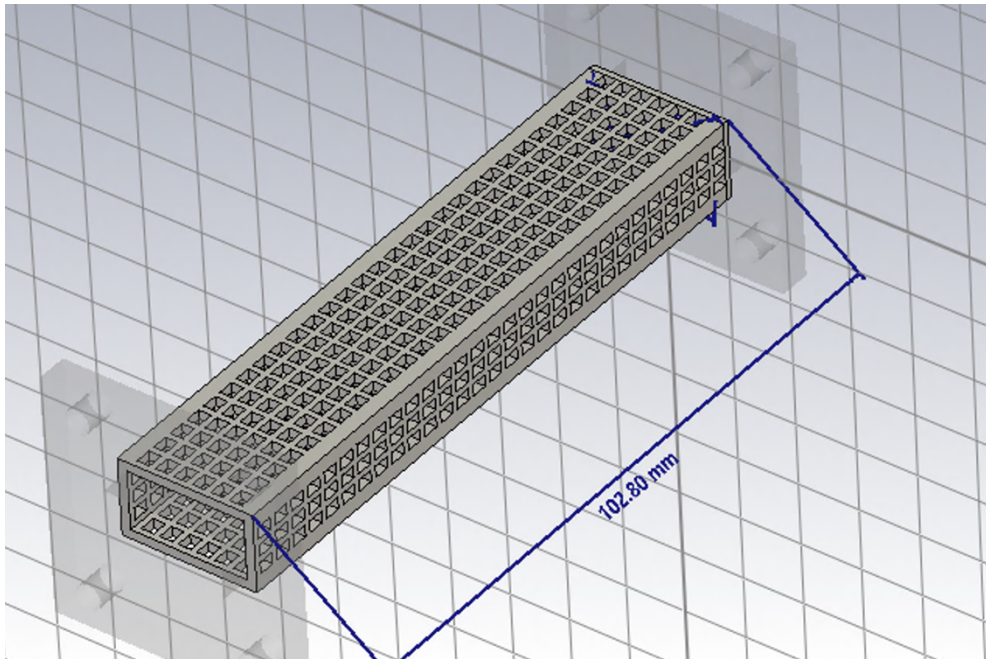


Figura 47. Diseño de una guía rectangular con perforaciones.

Además de diseñar nuestra guía con perforaciones, también se diseñó una guía rectangular ideal, sin perforaciones, para las posteriores pruebas y evaluaciones de resultados (Figura 48).

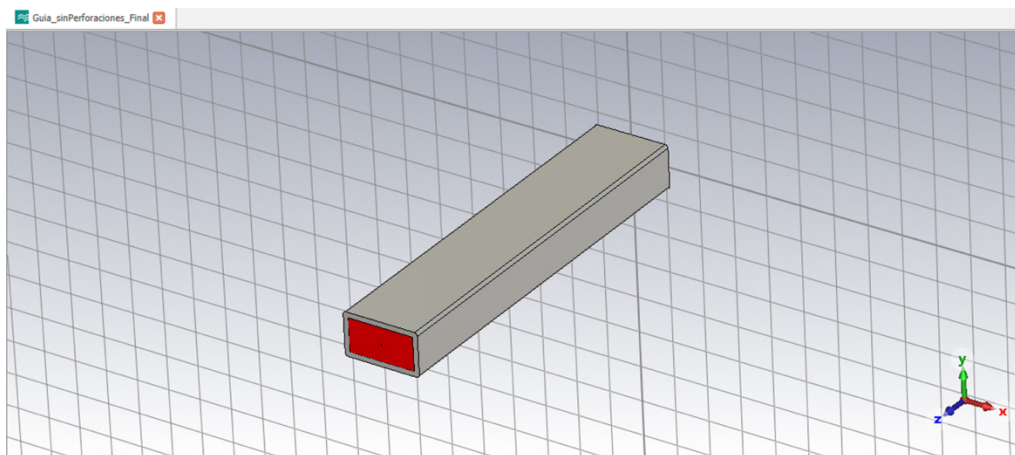


Figura 48. Diseño de una guía rectangular sin perforaciones.

## 6.2 Análisis paramétrico y evaluación de resultados

Una vez creada nuestra guía de onda rectangular, se tiene que observar el efecto de los diferentes parámetros geométricos en su respuesta. La manera más rápida y sencilla de poder hacer un análisis de diferentes valores a la vez y poder ver un resultado, era el análisis paramétrico de CST, una herramienta llamada “Parameter Sweep”, capaz de realizar un análisis del prototipo creado cambiando el valor de diferentes parámetros elegidos por el diseñador.

Los resultados en los que nos vamos a basar para elegir un diseño y realizar el análisis paramétrico son

- La relación de volumen de guía de onda sin perforar y guía de onda perforada (ratio), para que sea lo mínimo posible, cercano a un valor de 0.
- El factor de reflexión en el puerto 1 (módulo  $S_{11}$ ). Tenemos que ver que sea el mínimo posible dentro de unos valores de -30 y -40 dB, puesto que a partir de dichos valores no se obtiene una mejora significativa en reflexión.
- El factor de transmisión (módulo  $S_{21}$  o  $S_{12}$ ). Tenemos que ver que sea también lo mínimo posible para que las pérdidas de transmisión sean mínimas en la guía (0 dB).
- La fase del factor de transmisión ( $S_{21}$  o  $S_{12}$ ), es decir, cuando se desfasa la señal del puerto 1 al puerto 2. Tenemos que observar que esa fase no cambie drásticamente respecto a una guía rectangular ideal (como esta fase es  $fase = \beta \cdot longitud$ , con una longitud de onda igual, la constante de propagación cambia para una misma frecuencia por los agujeros diseñados).

Los parámetros que hemos escogido para el análisis paramétrico son los siguientes

- Espesor de los hilos “g”.
- $D = \frac{d_z}{d_x}$  (relación entre separación hilos eje z y eje x).
- Cantidad de perforaciones en el eje x “Nx”.

Se inició con un análisis paramétrico cambiando la cantidad de agujeros “Nx” en el eje x (de 2 a 12 con un paso de 2) y el espesor de los hilos “g” (de 0,75 a 1,5 con un paso de 0,25), con un valor de D fijo de 1 y un valor fijo de h (siendo “h” el espesor de las paredes y se mantiene fija para todo el diseño). Los resultados obtenidos del análisis son los siguientes

El ratio obtenido, con sus respectivos resultados se pueden observar en la Figura 49 y Tabla 6:

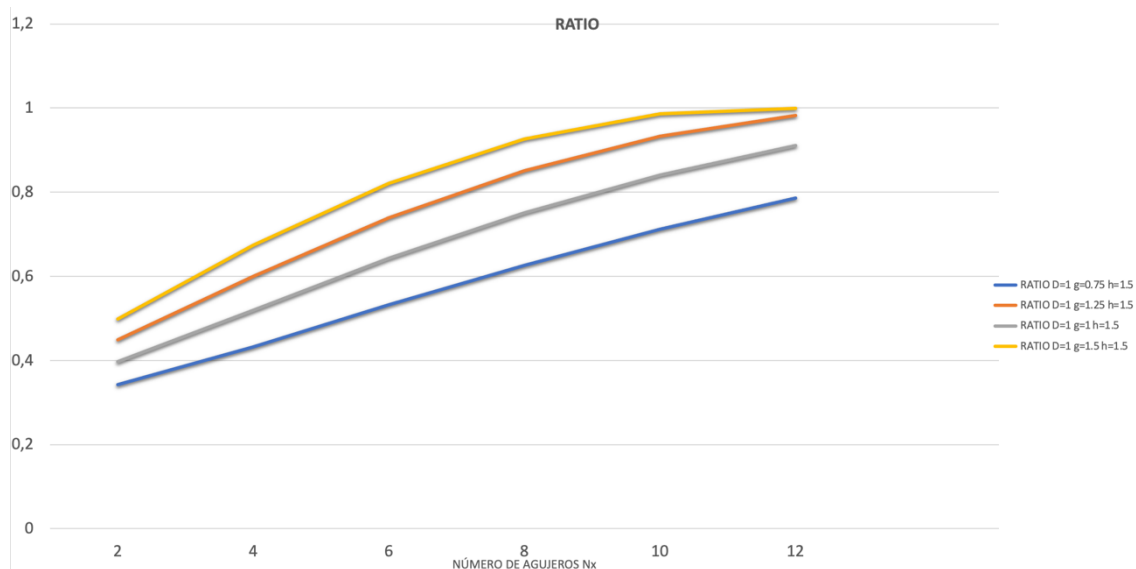


Figura 49. Ratio para diferentes valores de Nx, con D=1 y variando valor de g.

$N_x$	2	4	6	8	10	12
D=1 g=0.75	0,343	0,432	0,532	0,627	0,712	0,786
D=1 g=1	0,397	0,519	0,643	0,715	0,841	0,911
D=1 g=1.25	0,449	0,6	0,739	0,851	0,933	0,983
D=1 g=1.5	0,499	0,674	0,822	0,927	0,986	0,999

Tabla 6. Resultados del parámetro Ratio para diferentes valores de  $N_x$ , con  $D=1$  y variando valor de  $g$ .

Como observamos en la Tabla 6, para un valor de  $D$  constante de 1 mm y variando “ $g$ ”, se observa que según aumenta el valor de “ $g$ ”, el ratio aumenta para todos los diferentes valores de “ $N_x$ ”.

El parámetro módulo  $S_{11}$  obtenido, lo observamos en la Figura 50 y sus respectivos resultados en Tabla 7:

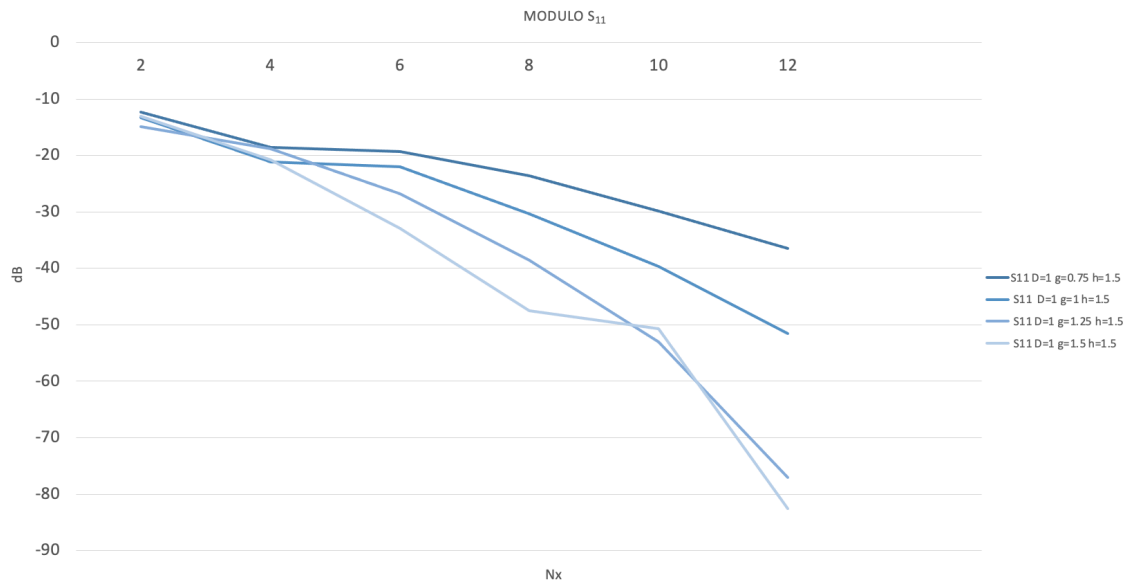


Figura 50. Módulo de  $S_{11}$  para diferentes valores de  $N_x$ , con  $D=1$  y variando valor de  $g$ .

$N_x$	2	4	6	8	10	12
D=1 g=0.75	-12,322	-18,631	-19,321	-23,653	-29,814	-36,513
D=1 g=1	-13,352	-21,166	-22,027	-30,411	-39,683	-51,507
D=1 g=1.25	-14,891	-18,823	-26,762	-38,591	-53,019	-77,034
D=1 g=1.5	-13,091	-20,842	-32,951	-47,544	-50,684	-82,542

Tabla 7. Resultados del parámetro módulo de  $S_{11}$  para diferentes valores de  $N_x$ , con  $D=1$  y variando valor de  $g$ .

Como observamos en la Tabla 7, para un valor de  $D$  constante de 1 mm y variando “ $g$ ”, a medida que aumentamos el valor de “ $g$ ” y aumentamos “ $N_x$ ”, mejora el valor del módulo de  $S_{11}$ .

El parámetro módulo  $S_{21}$  obtenido, lo observamos en la Figura 51 y sus respectivos resultados en Tabla 8:

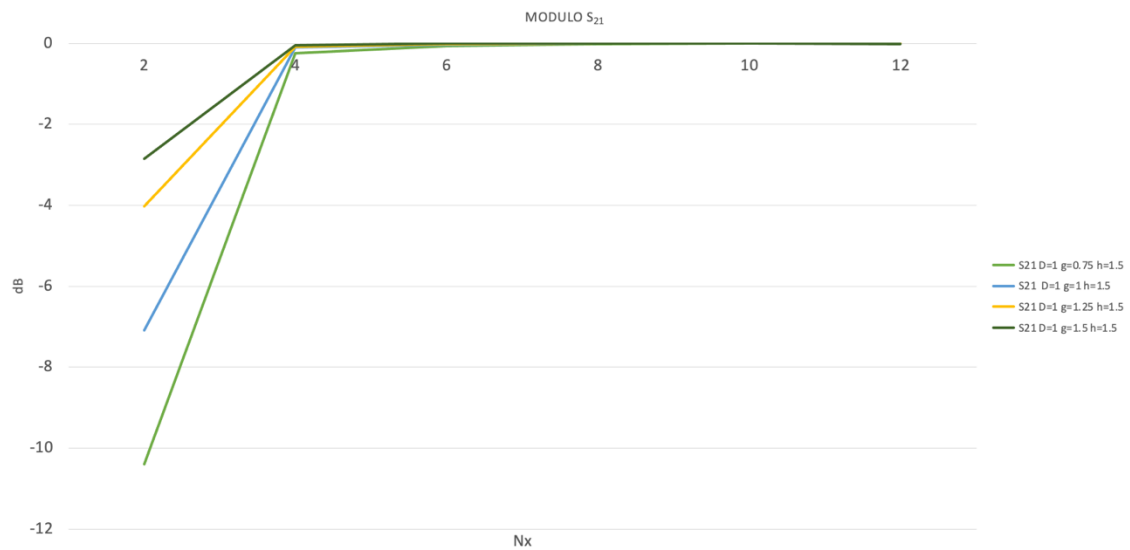


Figura 51. Módulo de  $S_{21}$  para diferentes valores de  $N_x$ , con  $D=1$  y variando valor de  $g$ .

$N_x$	2	4	6	8	10	12
<b>D=1 g=0.75</b>	-10,412	-0,241	-0,058	$-1,92 \cdot 10^{-2}$	$-4,55 \cdot 10^{-3}$	$-9,3 \cdot 10^{-4}$
<b>D=1 g=1</b>	-7,099	-0,103	-0,0289	-0,00398	-0,000466	-0,000033
<b>D=1 g=1.25</b>	-4,031	-0,0854	-0,00961	-0,000611	-0,000483	-0,00661
<b>D=1 g=1.5</b>	-2,855	-0,0468	-0,00222	$-5,7 \cdot 10^{-5}$	$-2,96 \cdot 10^{-6}$	-0,0102

Tabla 8. Resultados del parámetro módulo de  $S_{21}$  para diferentes valores de  $N_x$ , con  $D=1$  y variando valor de  $g$ .

En la Tabla 8 anterior, para un mismo valor de  $D$  constante de 1 mm y variando “ $g$ ”, a medida que aumentamos el valor de “ $g$ ”, el valor del módulo de  $S_{21}$  se acerca más a 0, por lo tanto mejora.

Y, por último, la fase del parámetro  $S_{21}$  con sus respectivos resultados, en la Figura 52 y Tabla 9 (diferencia entre fase simulada y fase ideal).

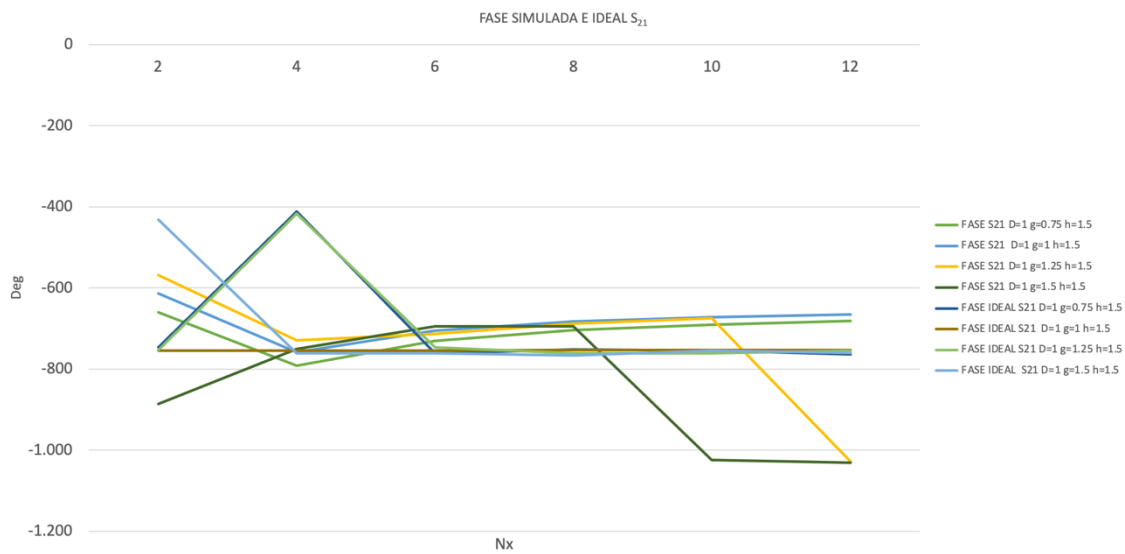


Figura 52. Fase simulada e ideal del parámetro S21 para diferentes valores de  $N_x$ , con  $D=1$  y variando valor de  $g$ .

	$N_x$	2	4	6	8	10	12
DIFERENCIA ENTRE FASE IDEAL Y SIMULADA	D=1 g=0.75	-85,408	379,009	-29,903	-47,463	-112,12	-82,014
	D=1 g=1	-141,386	4,69	-48,313	-69,822	-80,983	-86,672
	D=1 g=1.25	-186,433	312,747	-32,652	-73,243	-86,218	273,432
	D=1 g=1.5	473,027	-11,28	-66,957	-71,459	279,063	271,399

Tabla 9. Resultados de la diferencia del parámetro fase simulada e ideal de S21 para diferentes valores de  $N_x$ , con  $D=1$  y variando valor de  $g$ .

En la Tabla 9 anterior, vemos que, exceptuando algunos casos, la mayoría de veces la fase  $S_{21}$  tiende a estropearse (diferencia entre fase simulada e ideal es mayor) cuanto más grandes son las perforaciones, es decir, a medida que el valor de “ $N_x$ ” es menor, y cuanto más aumentamos el valor de “ $g$ ”.

Otro ejemplo fue el análisis paramétrico cambiando también la cantidad de agujeros “ $N_x$ ” en el eje x (de 2 a 12 con un paso de 2) y el valor de “ $D$ ” (de 0,75 a 1,5 con un paso de 0,25), con un valor de  $g$  fijo de 1 mm y un valor fijo de  $h$ .

El ratio con sus respectivos resultados se pueden observar en la Figura 53 y Tabla 10:

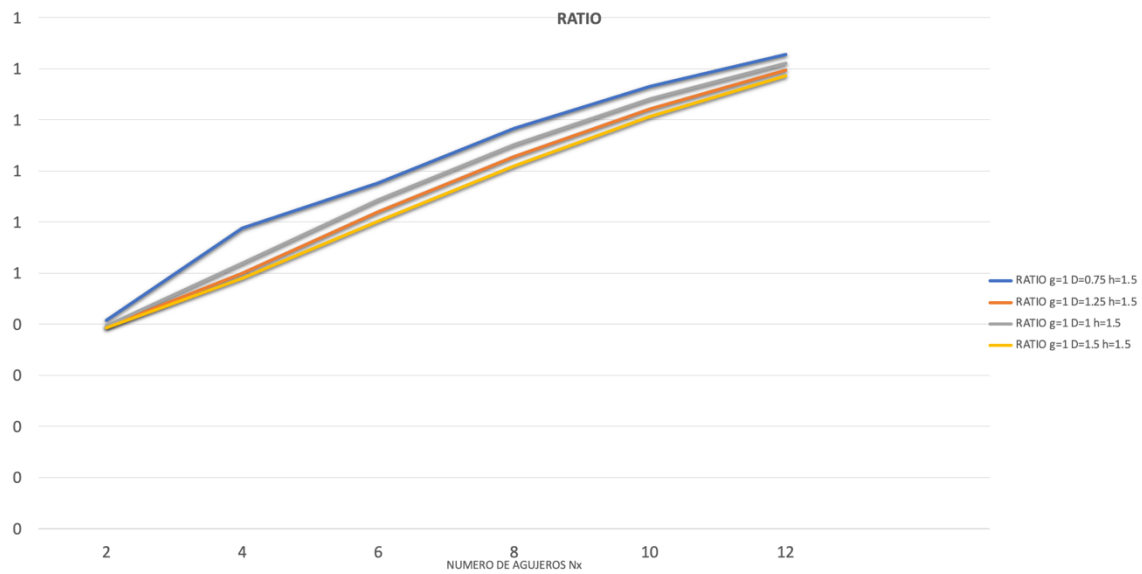


Figura 53. Ratio para diferentes valores de  $N_x$ , con  $g=1$  y variando valor de  $D$ .

$N_x$	2	4	6	8	10	12
$g=1$ $D=0.75$	0,408	0,588	0,676	0,782	0,866	0,927
$g=1$ $D=1$	0,397	0,519	0,643	0,751	0,841	0,911
$g=1$ $D=1.25$	0,394	0,5	0,619	0,728	0,821	0,898
$g=1$ $D=1.5$	0,392	0,489	0,602	0,709	0,806	0,886

Tabla 10. Resultados del parámetro Ratio para diferentes valores de  $N_x$ , con  $g=1$  y variando valor de  $D$ .

Como observamos en la Tabla 10, para un valor de “g” constante de 1 mm y variando  $D$ , se observa que según aumenta el valor de  $D$ , el ratio disminuye para todos los diferentes valores de “ $N_x$ ”.

El parámetro módulo  $S_{11}$  lo podemos observar en la Figura 54 con sus respectivos resultados en Tabla 11:

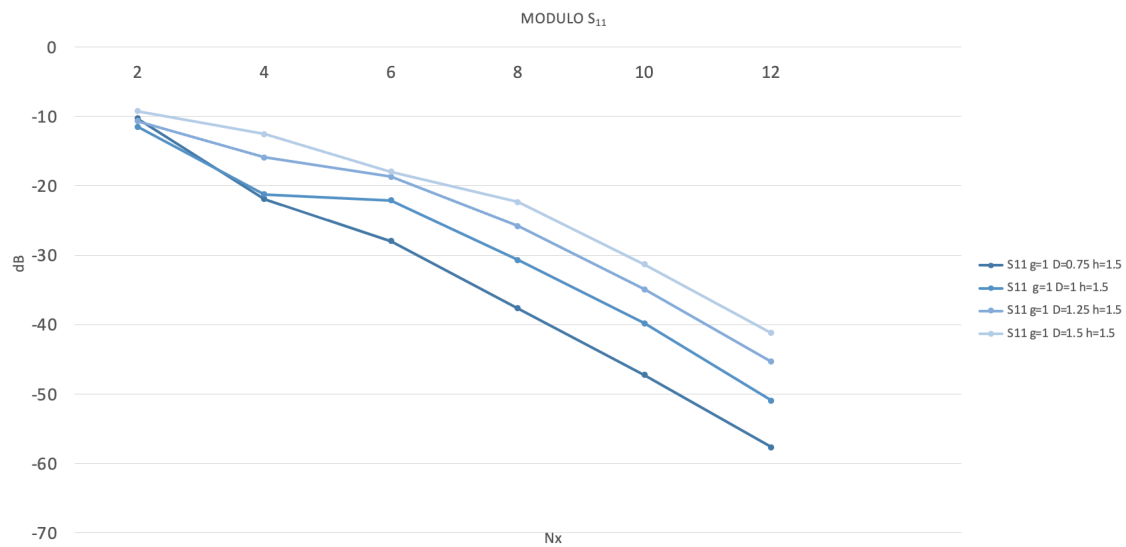


Figura 54. Módulo de S11 para diferentes valores de Nx, con g=1 y variando valor de D.

$N_x$	2	4	6	8	10	12
<b>g=1 D=0.75</b>	-10,309	-21,894	-27,938	-37,636	-47,253	-57,641
<b>g=1 D=1</b>	-11,483	-21,256	-22,109	-30,687	-39,784	-50,941
<b>g=1 D=1.25</b>	-10,681	-15,911	-18,689	-25,822	-34,923	-45,312
<b>g=1 D=1.5</b>	-9,238	-12,551	-17,969	-22,328	-31,323	-41,195

Tabla 11. Resultados del parámetro módulo de S11 para diferentes valores de Nx, con g=1 y variando valor de D.

Como observamos en la Tabla 11, para un valor de “g” constante de 1 mm y variando D, a medida que aumentamos el valor de D y aumentamos “Nx”, empeora el valor del módulo de S11.

El parámetro módulo S21 podemos observarlo en la Figura 55 con sus resultados en Tabla 12:

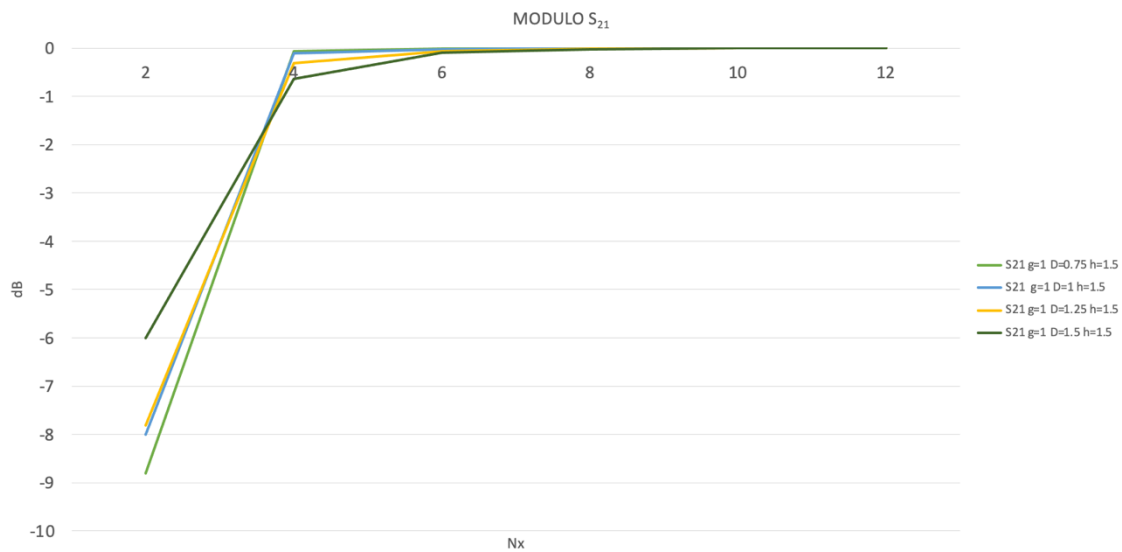


Figura 55. Módulo de S21 para diferentes valores de Nx, con g=1 y variando valor de D.

$N_x$	2	4	6	8	10	12
<b>g=1 D=0.75</b>	-8,812	-0,0659	-0,00707	$-7,51 \cdot 10^{-4}$	$-8,57 \cdot 10^{-5}$	$-4,02 \cdot 10^{-5}$
<b>g=1 D=1</b>	-8,001	-0,105	-0,0284	-0,00375	-0,000453	-0,00279
<b>g=1 D=1.25</b>	-7,812	-0,307	-0,0662	-0,0125	-0,00142	-0,000231
<b>g=1 D=1.5</b>	-6,002	-0,643	-0,0924	-0,0262	-0,00322	-0,00431

Tabla 12. Resultados del parámetro módulo de S21 para diferentes valores de Nx, con g=1 y variando valor de D.

En esta Tabla 12, para un valor de “g” constante de 1 mm, como hemos ido comentando, y variando el valor de D, a medida que aumentamos D, el valor del módulo de S<sub>21</sub> se aleja más a 0, por lo tanto, empeora (menos para el caso de “Nx=2”, que mejora cuando aumentamos el valor de D).

Y, por último, la fase del parámetro S<sub>21</sub> con sus respectivos resultados, en la Figura 56 y Tabla 13 (diferencia entre fase ideal y simulada).



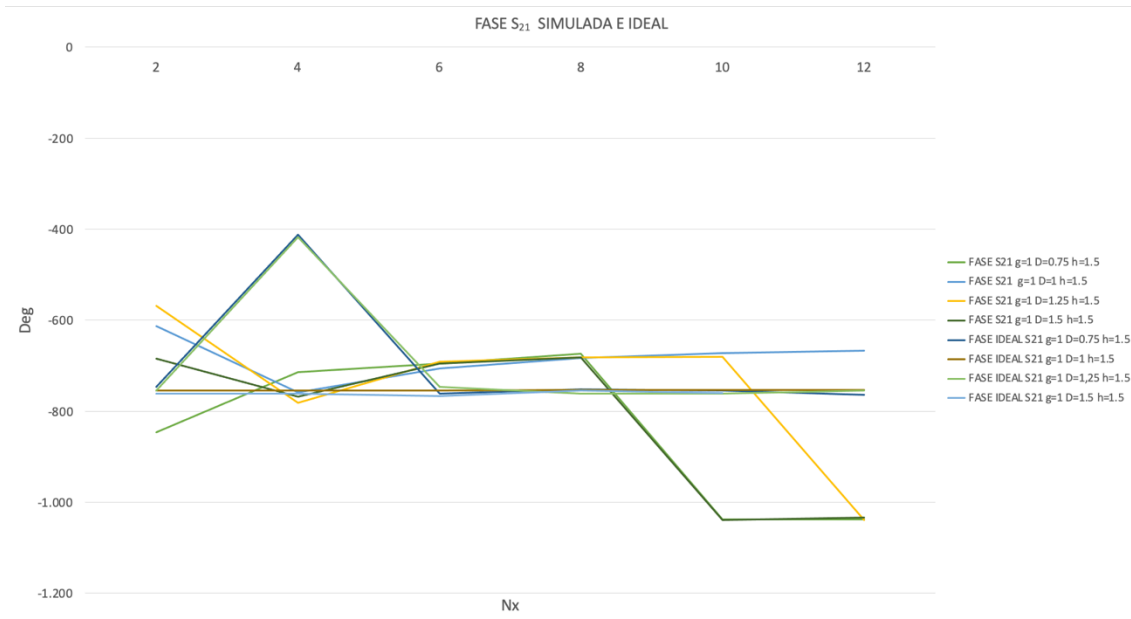


Figura 56. Gráfica del parámetro fase de S21 con valor fijo de  $g=1$ ,  $h=1.5$ , y variando valor de  $D$ .

$N_x$		2	4	6	8	10	12
DIFERENCIA ENTRE FASE IDEAL Y SIMULADA	$g=1$ $D=0.75$	100	302	-65	-79	282	274
	$g=1$ $D=1$	-140	5	-48	-70	-81	-87
	$g=1$ $D=1.25$	-185	364	-56	-79	-81	284
	$g=1$ $D=1.5$	253	7	-66	-85	285	273

Tabla 13. Resultados de la diferencia del parámetro fase de S21 con valor fijo de  $g=1$ ,  $h=1.5$ , y variando valor de  $D$ .

En la Tabla 13 anterior, pasa algo parecido que en la Tabla 9, la mayoría de las veces la fase  $S_{21}$  tiende a estropearse también (diferencia entre fase simulada e ideal es mayor) pero en este caso, destacando los casos de “ $N_x=2$ ” y “ $N_x=10,12$ ”, aunque tienda a estropearse cuanto más grandes son las perforaciones, en este caso también es grande la diferencia en estos dos casos; y cuanto más disminuimos el valor de “ $D$ ”, también la diferencia de fases es mayor.

En los dos ejemplos, tanto con “ $g$ ” constante como con “ $D$ ” constante, podemos observar que los resultados son parecidos. Vamos a explicar primero el ratio.

En los dos casos, el peor ratio lo tenemos para  $N_x=12$  donde  $g$  es el valor más grande y  $D$  el más pequeño. Esto es debido a que la diferencia entre la guía de onda perforada y la guía de onda sin perforar son casi de la misma masa y volumen, por lo tanto, prácticamente el ratio es 1.

A continuación, vamos a explicar el módulo  $S_{11}$ . En los dos casos observamos que cuanto más aumente “ $N_x$ ”, mejor es nuestro resultado de módulo de  $S_{11}$ . Aunque cabe destacar que, si comparamos las Tablas 7 y 11, podemos ver que en la Tabla 7, el valor de  $S_{11}$  mejora al aumentar

el valor de “g”, y en la Tabla 11, el valor de  $S_{11}$  empeora cuando aumentamos el valor de D. Por lo tanto, concluimos que variar “g” y “D” sí afecta a la respuesta. Llega un momento en que a partir de -40 dB el resultado es muy satisfactorio, por lo tanto, podemos llegar a la conclusión de que los mejores valores son “ $N_x=6$ ” y/o “ $N_x=8$ ” para valores altos de “g” y valores bajos de “D”, ya que conseguimos unos resultados de -35 dB a -30 dB, valores que están muy bien.

Respecto al coeficiente de transmisión  $S_{21}$  (modulo  $S_{21}$ ) que son las pérdidas de transmisión del puerto 1 al puerto 2, queremos que sean mínimas. En los dos casos, observamos que a partir de “ $N_x=4$ ” se estabilizan mucho, siendo prácticamente 0, hasta el  $N_x=12$ .

Y, por último, la fase de  $S_{21}$ . Vemos que en los dos casos hay mucha diferencia entre la fase simulada y la fase ideal, debido a que las perforaciones modifican la constante de propagación.

Analizando estos resultados se llega a la conclusión de que, si aumentamos el valor de  $N_x$ , hace que aumente el valor del ratio y los módulos  $S_{11}$  y  $S_{21}$ , pero nuestro objetivo es que el peso disminuya, es decir, que el valor del ratio sea lo más pequeño posible, y teniendo unos agujeros tan pequeños prácticamente se puede considerar ideal y el peso es el mismo. Por ello, hay que buscar un equilibrio entre el número de agujeros “ $N_x$ ”, el peso y el tamaño de los agujeros, además de la respuesta eléctrica obtenida en  $S_{11}$  y  $S_{21}$ . Y aunque los resultados nos hayan llevado a que los mejores casos en la mayoría de los parámetros son los resultados con “ $N_x=6$ ” y/o “ $N_x=8$ ”, no podemos saber con exactitud que valores de “g” y “D” son los más adecuados para conseguir unos resultados con las mejores prestaciones. Se podría utilizar un algoritmo de optimización como *Particle Swarm* o *Simplex* mencionados anteriormente, con el objetivo de reducir el ratio y obtener los mejores resultados en el  $S_{11}$  y  $S_{21}$ , sin embargo, el resultado obtenido podría no ser el mejor, puesto que sacrificando ligeramente la respuesta eléctrica, se podría llegar a conseguir una reducción mucho mayor de peso. Por ello, para obtener la relación entre los diferentes objetivos, así como con sus parámetros físicos, se utilizará una optimización multiobjetivo obteniendo así el *Frente de Pareto*, que nos permitirá tomar una mejor decisión.

### 6.3 Optimización multiobjetivo y selección del diseño final

Como bien hemos comentado en el capítulo 4, se va a realizar la optimización multiobjetivo a través de un programa de programación y cálculo numérico llamado *Matlab*, que se conectará al programa CST para realizar un barrido paramétrico con diversos parámetros escogidos por nosotros y, para calcular la región de Pareto. A partir de este momento, se va a explicar un breve esquema con los pasos que va a realizar *Matlab* con CST para la optimización multiobjetivo. En la Figura 57, podemos ver el esquema con los pasos seguidos para la optimización.

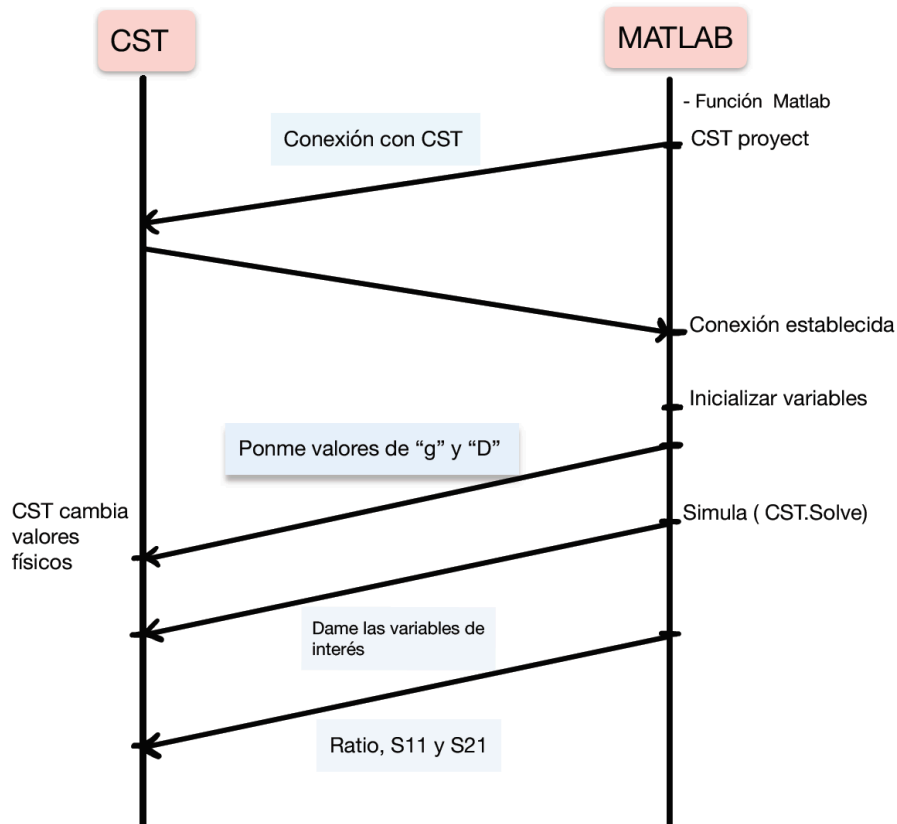


Figura 57. Esquema con los pasos a seguir para realizar la optimización multiobjetivo.

El primer paso fue conectar CST con *Matlab* haciendo uso de unas funciones y librerías que no habíamos realizamos nosotros, sino extraídas de un tercero. El segundo paso para realizar esta optimización multiobjetivo fue crear una función de *Matlab* capaz de realizarlo de manera sencilla. A través del comando “*CSTProject*”, se pudo elegir el archivo correspondiente y conectarse con CST a través de *Matlab*. En CST vamos a pedirle que realice esta optimización desde 8.5 GHz a 11.5 GHz

Después de conectarse con éxito a CST, se inicializan las variables destacadas. En nuestra función multiobjetivo, tenemos

$$[ F_1(g, D), F_2(g, D) ] \quad (6.3.1)$$

donde **g** y **D** son las variables físicas de nuestro objetivo,  $F_1$  es el valor de ratio y  $F_2$  es el valor de  $S_{21}$  o  $S_{11}$  dependiendo de nuestro objetivo. En este caso elegiremos el parámetro de módulo de  $S_{21}$  y este valor deberá ser normalizarlo para que sea igual a rango de valores que el ratio. La variable *goal* se encargará de minimizar esas funciones objetivo u obtener un valor deseado. Los valores escogidos fueron [0.15,0], siendo el objetivo 0.15 para el ratio (ya que llegar a 0 era imposible) y 0 en el módulo de  $S_{21}$ . La variable *weight* [1,1] hace referencia a los pesos de esas funciones multiobjetivo, es decir,  $F_1$  tiene un peso  $w_1$  y  $F_2$  tiene otro peso  $w_2$ . Para poder obtener el Frente de Pareto, iremos modificando  $w_2$  y dejaremos  $w_1$  constante, así podremos modificar la pendiente. Las demás variables, son los limites inferiores y superiores de las variables físicas  $g$  [0.25, 3] y  $D$  [0.1, 2]. A continuación, seguimos inicializando variables como “lb” que



corresponde a los límites de  $g$  y “ub” los límites de  $D$ . Inicializamos  $g$  y  $D$  a 1, y el límite del peso  $w_2$  a 40.

La variable *vector*, es la variable que te devuelve *Matlab* al ejecutar la función multiobjetivo (valores de  $g$  y  $D$ ) y el *vector\_2* es la evaluación del vector en la función objetivo, es decir,  $F_1$  y  $F_2$ .

Una vez hemos inicializado las variables, pasamos a la función principal, la encargada de sacar cada punto del *Frente de Pareto*. Esto se hace a través del comando *fgoalattain*, llamando a CST y concatenando los valores del *Frente de Pareto* en sus correspondientes vectores.

Con otra función llamada “error”, podemos observar comandos como **CST.ChangeParameter** (“Nombre variable”, valor variable), para que CST vaya cambiando los valores físicos.

Cuando *Matlab* da la orden de que simule CST, esta no sabe dónde ver los resultados, por ello, el ratio se va acumulando en el error (1) directamente de CST con el comando **CST.GetParameterValue(Paramname)**; en el parámetro  $S_{21}$ , hace falta realizar una lectura y obtener los resultados. Para ello, pasamos de complejo a dB, cogemos el valor mínimo de este y se acumula en error (2) su valor absoluto, para que pueda ser comparable con el valor de ratio.

En el Anexo, podremos ver el código correspondiente a esta función de *Matlab*.

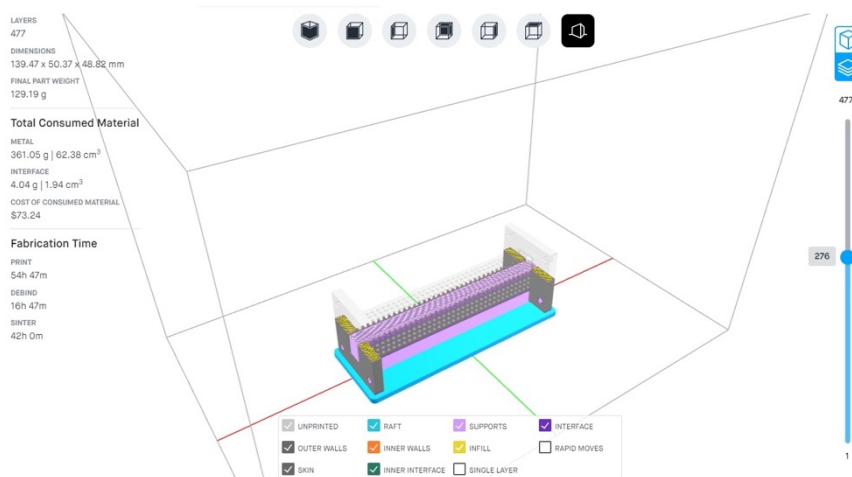
Para este TFG, no ha sido posible terminar la simulación, debido a la falta de tiempo y a la larga espera de las simulaciones, pero se han podido llegar a conclusiones bastante acertadas, aunque no fuese tan exacto como esa aproximación multiobjetivo.

## Capítulo 7. Fabricación y medidas

La fabricación de nuestros prototipos de guía de onda rectangular se llevará a cabo a través del servicio Desktop Metal que utiliza el proceso de impresión en metal BMD explicado en capítulos anteriores. Como indicábamos, tiene tres etapas importantes en el proceso, la etapa de impresión “Print”, etapa de desaglomerado “Debind” y la etapa de sinterizado “Sinter”.

### 7.1 Fabricación de los primeros dispositivos

Este proceso comienza exportando los modelos de las guías de onda en formato “.stl” para incluirlas en Desktop Metal como muestra la Figura 58.

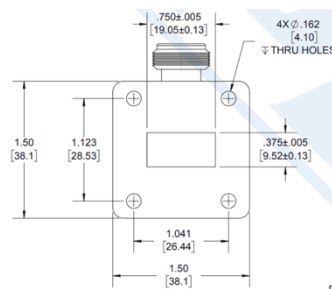


**Figura 58. Interfaz de Desktop Metal con guía perforada apoyada de forma horizontal en la cara estrecha de la guía.**

Por parte de Desktop Metal se tiene que validar la geometría, puesto que como se puede imprimir directamente en metal, la empresa tiene una política de buenas praxis y debe de confirmar que aquello que quieras imprimir no está destinado para un mal uso. Antes de importar estos archivos a la empresa para que se pudieran imprimir, definimos algunas modificaciones respecto a los diseños originales. La impresión de nuestros diseños se realizó en UCLM (Cuenca), y no en nuestra localidad aquí en Valencia, por ello, teníamos un tiempo de espera.

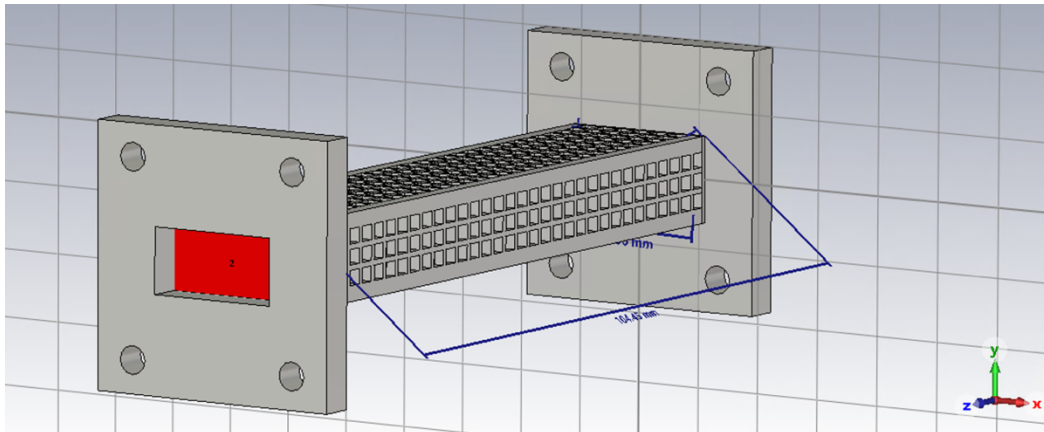
La primera modificación realizada se componía de añadir "Flanges" a cada extremo de nuestros dispositivos, para su posterior medida. Las medidas serán realizadas con un VNA (Vector Network Analyzer o analizador de redes vectorial para obtener la respuesta de nuestra guía de onda) que posee unos puertos de salida de tipo coaxial, por lo que es necesario una transición de guía coaxial a guía de onda rectangular, que es lo que se conoce comercialmente como “Flange”.

La geometría de dicha transición se muestra en la Figura 59, que está formada por las dimensiones de la guía de onda, así como 4 agujeros que permiten unir el “Flange” del VNA con el “Flange” de nuestros dispositivos.



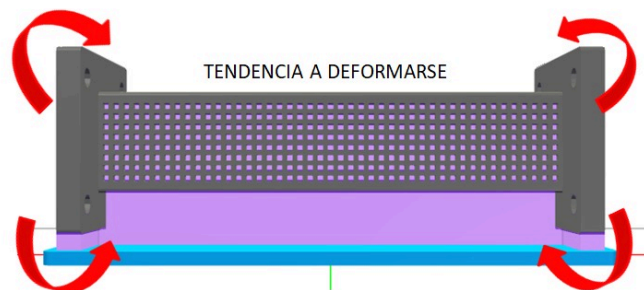
**Figura 59. Dimensiones de la transición de guía coaxial [26].**

En nuestros dispositivos habrá una sección igual a esta, con cuatro agujeros, los cuales permiten conectar el “Flange” del VNA con el “Flange” de nuestra guía mediante una unión por contacto haciendo uso de los cuatro agujeros, tornillos y tuercas que permiten alinear los “Flanges” entre sí y asegurar contacto eléctrico entre ambas partes. La Figura 60 muestra el diseño de la guía de onda con sus respectivos “Flanges”.



**Figura 60. Diseño de la guía de onda perforada con Flanges.**

Además del diseño de estos “Flanges”, al consultar con la empresa Desktop Metal sobre la fabricación de los prototipos, se observó que podría existir cierta deformación en los “Flanges” como indica la Figura 61.



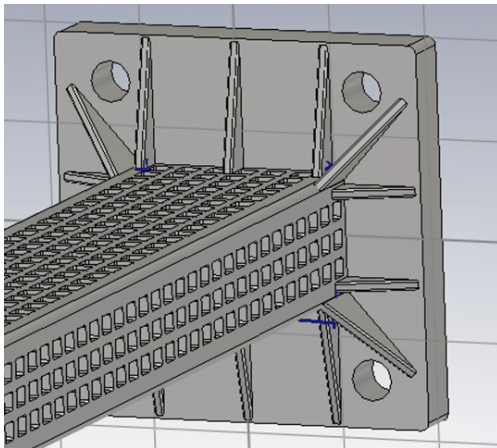
**Figura 61. Tendencia a deformarse el prototipo a fabricar.**

Por lo que, para evitar esta deformación de los “Flanges” en el proceso de fabricación, sobre todo en el proceso de sinterizado, Desktop Metal nos recomendó varias opciones:

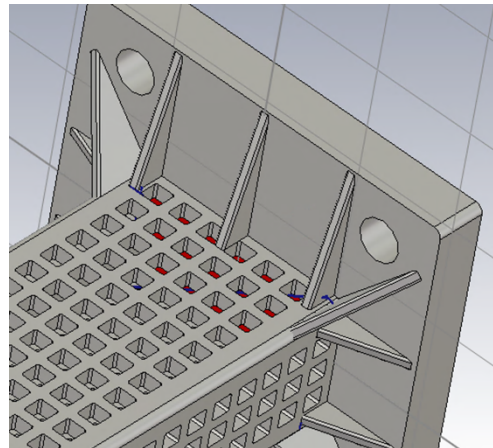
1. Realizar una cúpula en los “Flanges” con el fin de evitar que se deformase la estructura. Esta opción no pudo ser valida, ya que dicha cúpula evitaba que se deformara esta estructura, pero, por el contrario, bloqueaba las perforaciones adyacentes a los “Flanges”, por lo que se descartó esta opción.
2. Añadir nervios/soportes. Se optó por esta opción, ya que, además de que es una práctica habitual en el diseño de piezas mediante impresión 3D, era menos invasiva para nuestra estructura.

Estos soportes se componían de tres en la parte superior de la guía de onda y dos en los laterales, además de uno en todas las esquinas de los “Flanges” para una mayor sujeción.

En el proceso de impresión, las esquinas que presentan un ángulo de  $90^\circ$  generaban tensiones internas que podían hacer que la pieza se deformase, por lo tanto, existía una mala impresión, por lo que se aplicó un redondeo en la mayoría de los lados de la guía y en los soportes, aliviando de esta manera las tensiones internas existentes. Estos soportes podemos observarlos en las Figuras 62 y 63, junto con los lados redondeados.



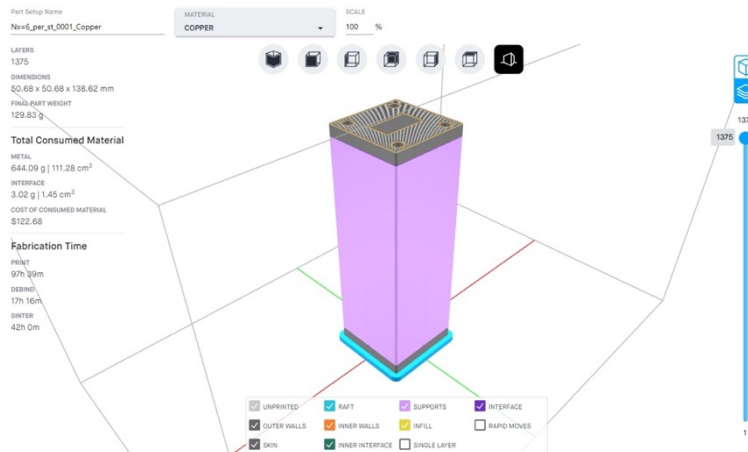
**Figura 62. Soportes realizados en los prototipos de guía de onda.**



**Figura 63. Soportes realizados en los prototipos de guía de onda.**

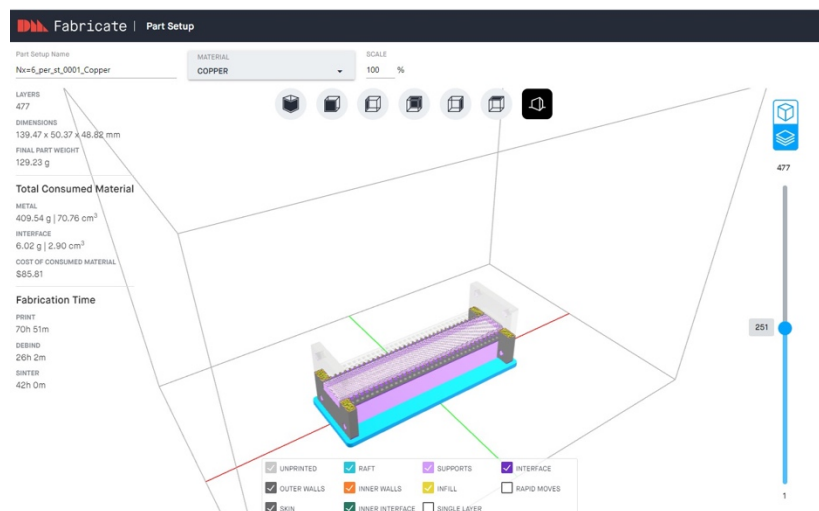
Se podía realizar la impresión de forma vertical o horizontal, donde finalmente se eligió la opción de forma horizontal, ya que la vertical tenía riesgo de imprimirse peor y, además, debíamos agregar algunos soportes más y el diseño se complicaba demasiado. En la Figura 64, podemos ver una captura de Desktop Metal donde podemos ver claramente que en vertical el coste y el tiempo son mayores respecto a la horizontal de la Figura 58.





**Figura 64. Interfaz de Desktop Metal con guía perforada apoyada de forma vertical.**

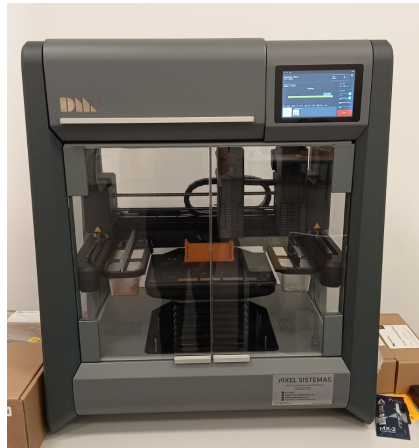
Por estas razones, definimos que la mejor opción era la horizontal, donde además se debía elegir si se imprimía con la cara ancha o con la cara estrecha de la guía de onda. Con la cara ancha se tardaba más (ver Figura 65) y además se desperdiciaba material, por lo tanto, la mejor opción fue utilizar la cara estrecha de la guía (ver Figura 62).



**Figura 65. Interfaz de Desktop Metal con guía perforada apoyada de forma horizontal en la cara ancha de la guía.**

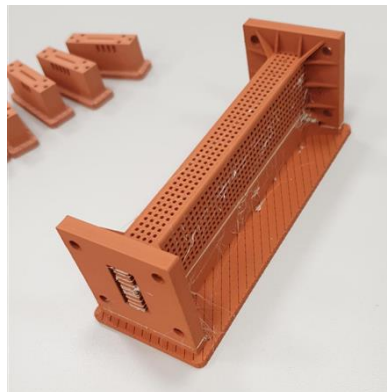
Como indicábamos, empieza con una etapa de impresión directamente en metal, cuya máquina imprimiendo el prototipo podemos ver en la Figura 66.





**Figura 66. Máquina de Desktop Metal en la primera etapa de impresión 3D.**

Esta etapa dura unas 55 horas aproximadamente, siendo el proceso más largo de todos. Se empezó con la guía de onda de referencia, y mientras se iba acabando, se empezaba con las otras dos guías de onda perforadas, para agilizar el proceso. En la Figura 67, podemos ver una las piezas impresas a falta de las dos últimas etapas.



**Figura 67. Prototipo de guía perforada después de la primera etapa de impresión 3D**

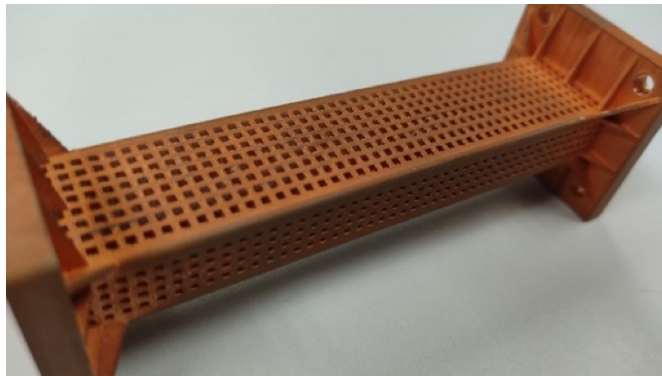
La segunda etapa fue el “Debind” (17 horas aproximadamente), donde se sumergían las piezas sobre solución química para eliminar el aglutinante utilizado para crear los prototipos.

Una vez nuestras tres piezas han pasado por el proceso “Debind”, pasamos al último paso, la etapa de sinterizado (Sinter) que duro 42 horas. En esta etapa simplemente, la pieza se mete dentro de un horno hasta el punto de fusión para que se fusione el metal y quede totalmente compacta.

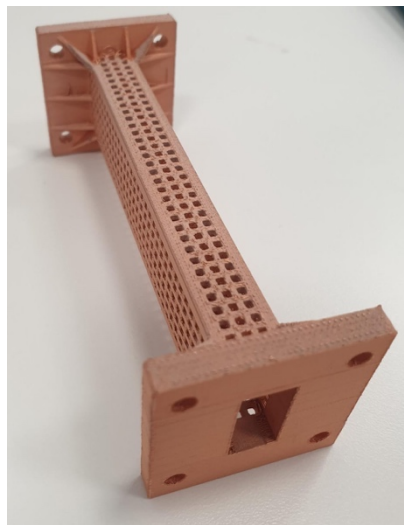
Cuando todas las piezas acaban los tres procesos, están listas para su posterior medida. A continuación, se pueden ver las guías de onda impresas después del último paso de “Sinter”. La Figura 69 es el prototipo de guía de onda de referencia (ideal). La Figura 70 es la guía de onda perforada de “Nx=8”, y por último, la Figura 68 es la guía de onda perforada de “Nx=6”.



**Figura 69. Pieza final de guía de onda de referencia (cara ancha de la guía).**



**Figura 70. Pieza final de guía de onda perforada con  $N_x=8$ .**



**Figura 68. Pieza final de guía de onda perforada con  $N_x=6$ .**

También podemos observar en la Figura 71 un “Flange” y los soportes diseñados de la guía de referencia.

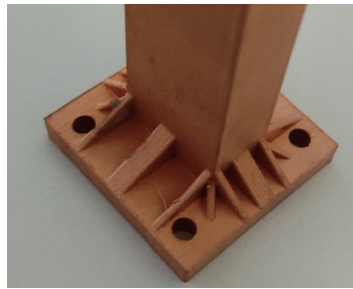


Figura 71. Flange y nervios de una pieza final impresa.

## 7.2 Medidas

Una vez ya tenemos las tres piezas fabricadas y enviadas a nuestras instalaciones, podemos proceder a la medida de los diferentes prototipos y compararlos entre ellos para sacar conclusiones. A continuación, se conectarán nuestras guías de onda al aparato de medida VNA (*Vector Network Analyzer*) o analizador de redes vectorial para obtener las respuestas de las guías correspondientes (ver Figura 72).

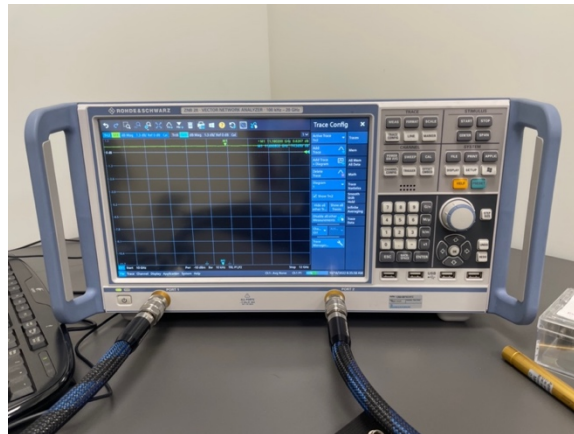
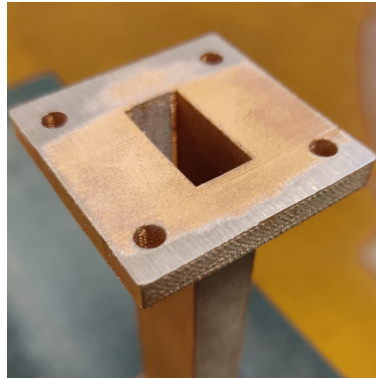


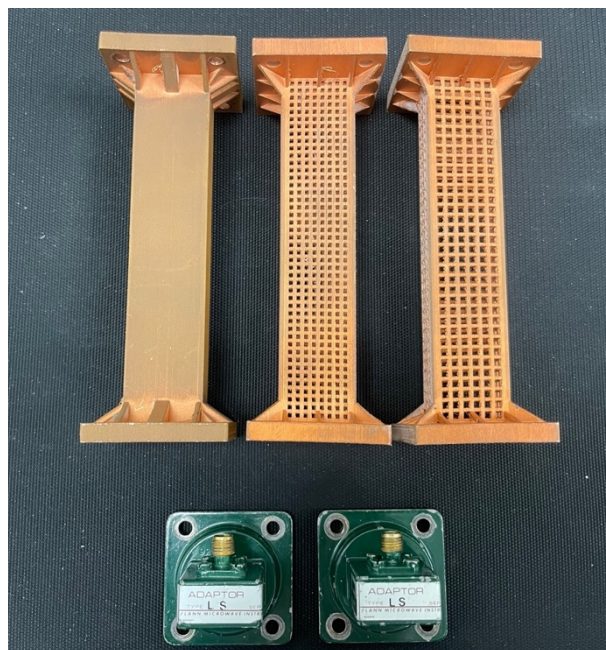
Figura 72. VNA utilizado para la realización de las medidas de las guías.

Antes de empezar con este proceso, tuvimos que revisar las guías en busca de algún posible error de impresión por si dificultaba la unión de los “Flanges” para realizar las medidas, pero las tres piezas estaban impresas correctamente y no se observó ningún defecto visual. Para la primera pieza, nuestra guía de onda de referencia, se realizó un lijado sobre los “Flanges” ya que se observó cierta rugosidad, con el fin de un mejor contacto eléctrico entre los “Flanges” (Ver Figura 73).



**Figura 73. Flange lijado de guía de onda de referencia.**

Antes de empezar a medir y después de haber comprobado que los agujeros de los dos “Flanges” encajaban con el conector de manera correcta y hacían suficiente contacto, se procedió a calibrar el sistema de VNA con un kit de calibración, con el fin de eliminar el efecto de los conectores y los cables del VNA. En la Figura 74 podemos ver las tres guías de onda con sus respectivos conectores.



**Figura 74. Los tres prototipos de guía de onda impresos junto con sus conectores.**

Después de calibrar y configurar el VNA, se hicieron las medidas de las guías como se muestra en la Figura 75 con la guía perforada de “ $N_x=6$ ”, repitiendo el proceso para el resto de los prototipos. De la guía de referencia se realizaron dos medidas, una nada más llegar el prototipo y luego otra tras pasar un tiempo y manipularlo, donde se apreciaba ya cierta oxidación en el cobre.

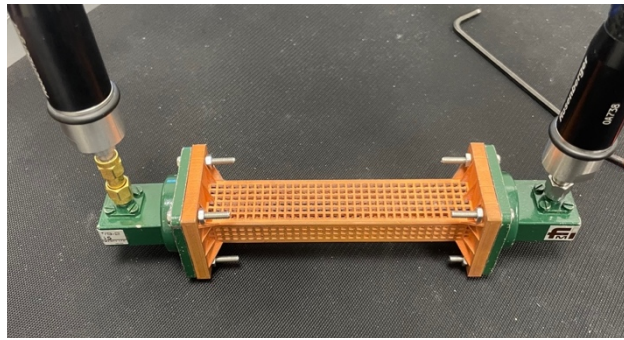


Figura 75. Realización de medida de guía de onda de perforada de  $N_x=6$ .

A través de la aplicación *Matlab*, se compararon los resultados de las tres guías, realizando una gráfica por cada prototipo y comparando los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  medidos y simulados para un análisis de los resultados. En las siguientes Figuras (Figuras 76, y 77) podemos ver los resultados de los parámetros expuestos de las dos guías de referencia.

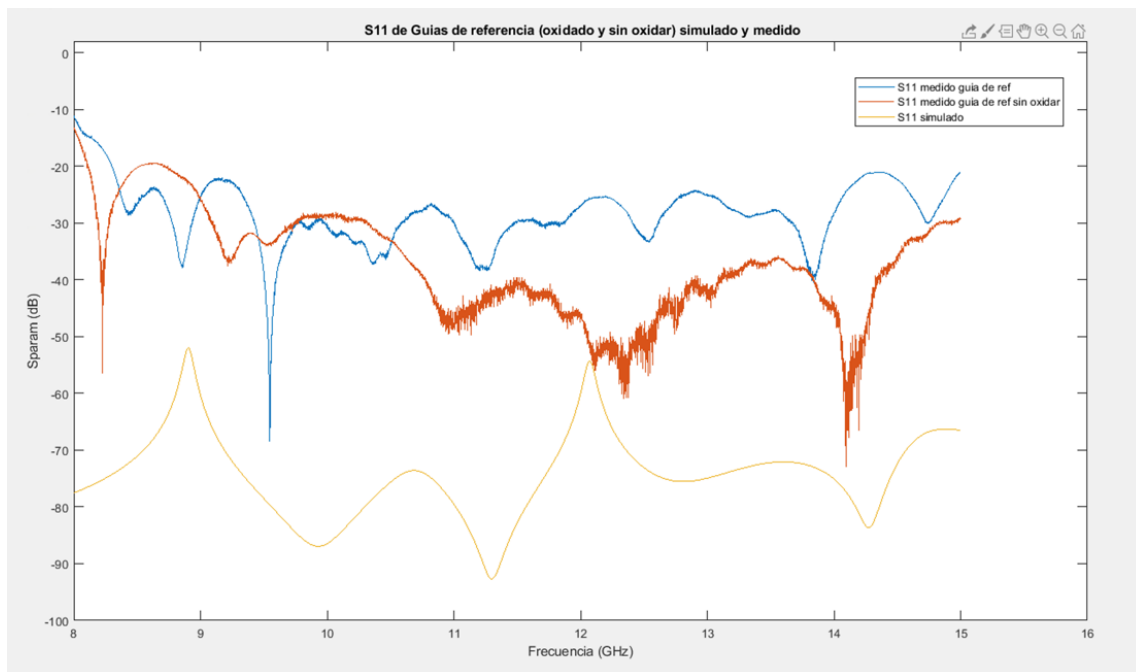


Figura 76. Comparativa del parámetro  $S_{11}$  medido y simulado de guía de referencia oxidada y sin oxidar.

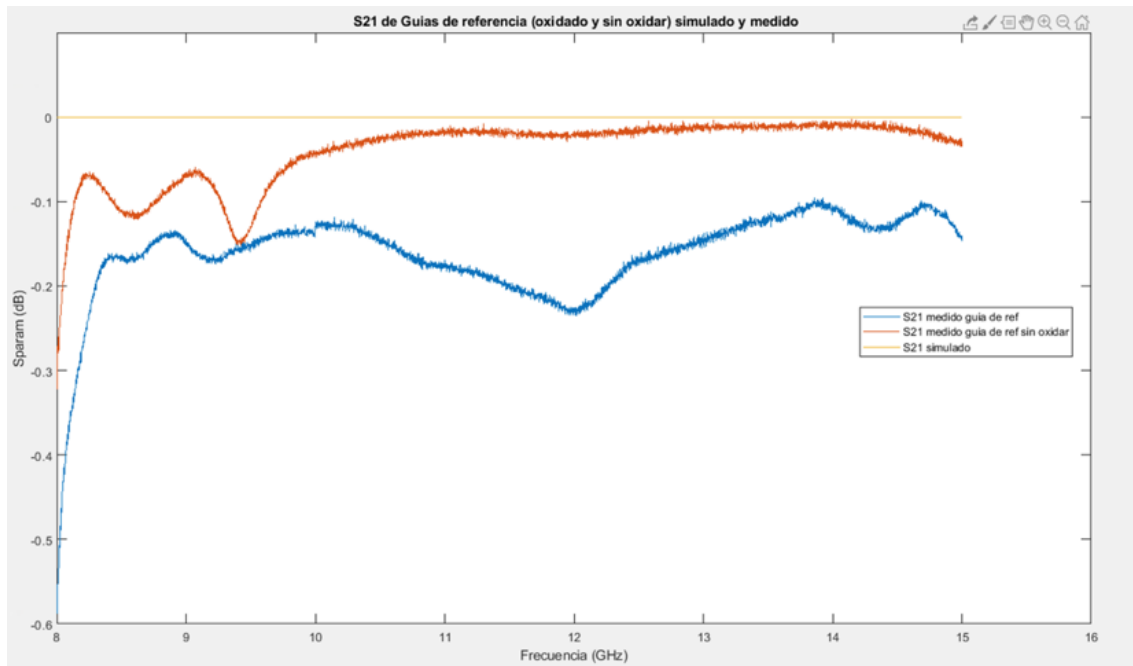


Figura 77. Comparativa del parámetro  $S_{21}$  medido y simulado de guía de referencia oxidada y sin oxidar.

Podemos apreciar que los resultados de la guía de onda de referencia sin oxidar son mejores tanto para  $S_{11}$  como para  $S_{21}$ . En la guía de onda sin oxidar, podemos ver que la reflexión se mantiene en valores entre -30 dB y -40 dB, siendo estos unos valores muy buenos, y en la guía oxidada, son un poco peores, siendo valores más cercanos a -25 dB. En cuanto a las pérdidas  $S_{21}$ , en los dos casos los resultados son muy buenos, aproximadamente a 0, siendo también mejor la guía sin oxidar que la oxidada. Las Figuras 78 y 79 muestran los mismos resultados, pero para las guías perforadas de “ $N_x=6$ ” y “ $N_x=8$ ”.

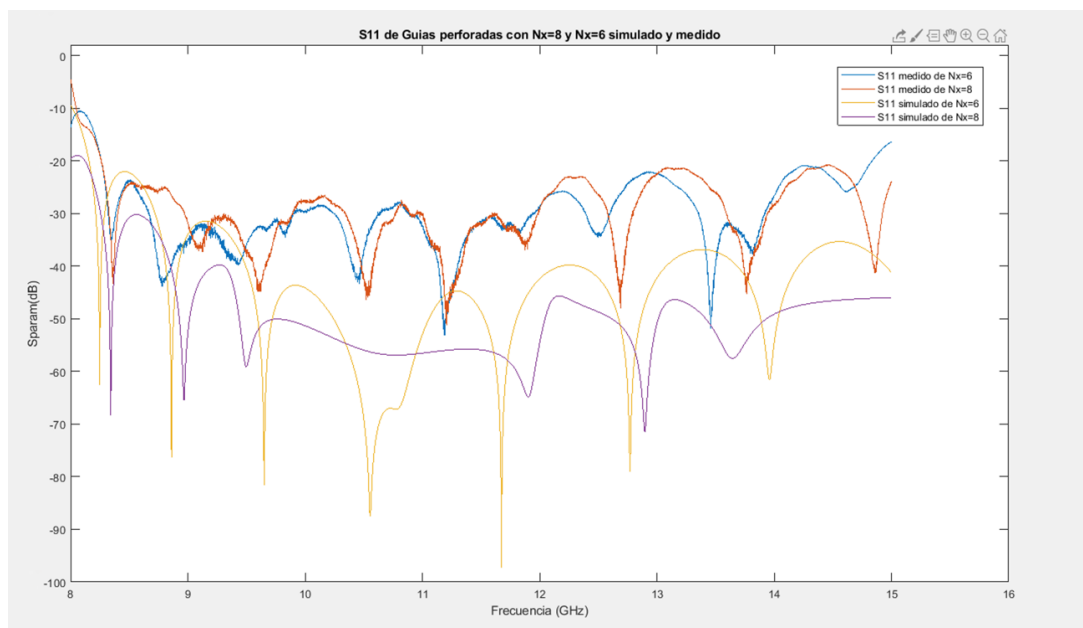
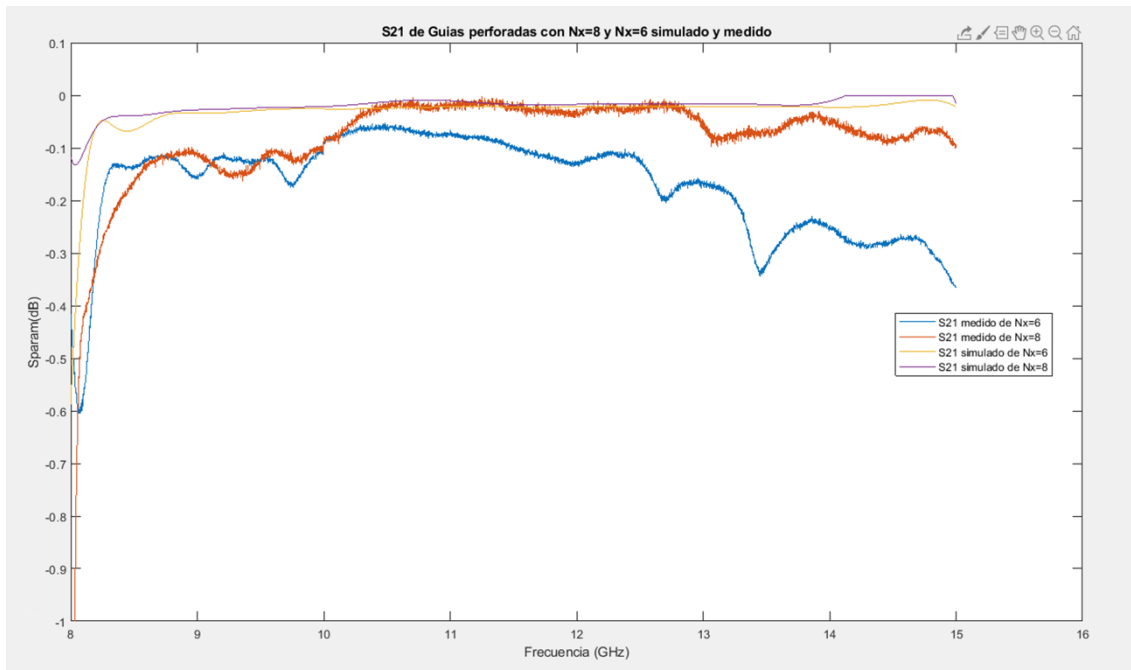


Figura 78. Comparativa del parámetro  $S_{11}$  medido y simulado de las guías perforadas de “ $N_x=6$ ” y “ $N_x=8$ ”.



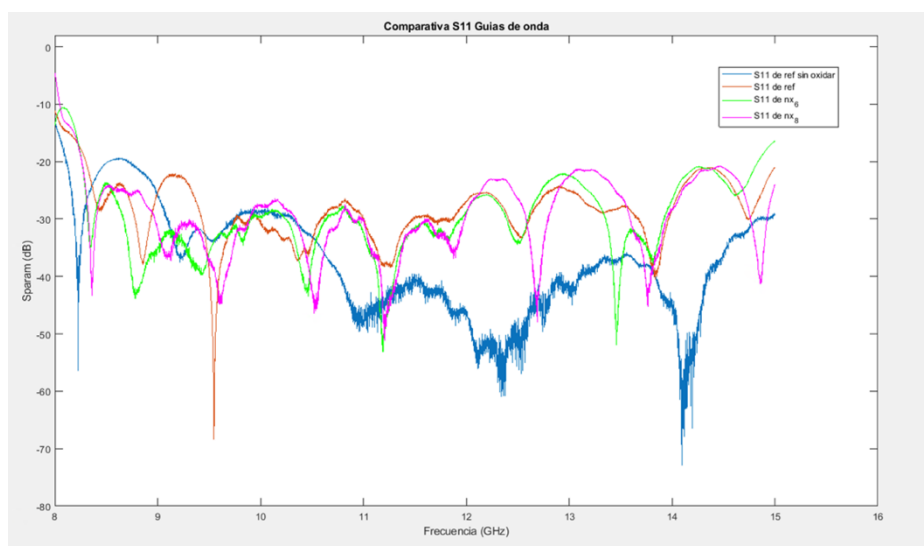


**Figura 79. Comparativa del parámetro S21 medido y simulado de las guías perforadas de “Nx=6” y “Nx=8”.**

En estas dos gráficas se representa en color azul y naranja los resultados medidos del parámetro  $S_{11}$  y  $S_{21}$  en dB, y en color amarillo y violeta los resultados simulados para el rango de frecuencias expuesto inicialmente (de 8 GHz a 15 GHz).

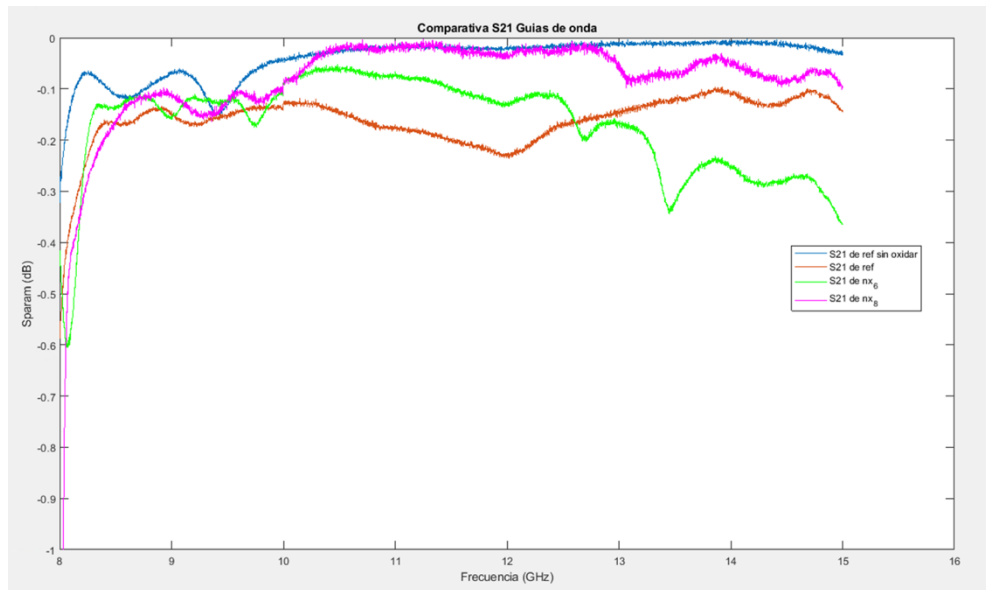
Como observamos, en las dos guías perforadas, los resultados de  $S_{11}$  son bastante buenos (entre -30 dB y -35 dB), y en para los resultados de  $S_{21}$  también son buenos, aproximándose a 0 como los resultados simulados.

Para un análisis más detallado de los resultados en medida, también realizamos una gráfica para comparar el parámetro  $S_{11}$  entre la guía de referencia (sin oxidar y oxidada) y las dos guías perforadas y, además, el parámetro  $S_{21}$  entre la guía de referencia (sin oxidar y oxidada) y las dos guías de onda. Podemos ver los resultados en las Figuras 80 y 81.



**Figura 80. Comparativa del parámetro S11 medido de todas las guías de onda impresas.**





**Figura 81. Comparativa del parámetro S21 medido de todas las guías de onda impresas.**

Como vemos en ambas gráficas del parámetro del factor de reflexión  $S_{11}$  la guía de onda de referencia tiene buenos valores dentro de los valores óptimos  $[-35, -30]$  dB. En las dos guías perforadas, podemos ver que en algunas frecuencias como 10 GHz y 12 GHz empeora estos valores, pero siendo normal por sus perforaciones a lo largo de estas. Para el factor de transmisión  $S_{21}$  cambia un poco. En la gráfica (Figura 77) la guía de referencia sin oxidar obtiene unas pérdidas de transmisión muy bajas, pudiendo ver que la guía de onda perforada con “Nx=8” tiene unas pérdidas muy parecidas a la de referencia, siendo peores para la otra guía perforada con “Nx=6”. En cambio, las pérdidas para la guía de referencia oxidada son peores que la guía perforada “Nx=8”, siendo esto por las pérdidas por conductividad debido a su superficie oxidada de la que hablamos, por el paso del tiempo.

Como nuestro propósito en este TFG es una solución de compromiso entre reducir el peso de la guía de onda y aumentar un poco las pérdidas de inserción, podemos estar dispuestos a sacrificar un poco estas pérdidas ya que pueden ser compensadas más adelante con un amplificador u otros sistemas dependiendo de aplicación. Por ello, una vez expuestas las gráficas, vamos a pasar al análisis de los resultados a través de una tabla comparativa para poder ver qué resultado nos compensa más para nuestro trabajo (ver Tabla 14). En esta tabla, vamos a comparar los resultados entre las dos guías de referencia (oxidada y sin oxidar) y las dos guías de onda perforadas en el rango de frecuencia de 8,5 GHz a 12 GHz, viendo expuestos los siguientes parámetros:

- Resultado medio y peor caso en (dB) del parámetro  $S_{11}$  tanto medido como simulado.
- Resultado medio y peor caso en (dB/m) de las pérdidas del parámetro  $S_{21}$  tanto medido como simulado.
- Peso de las tres guías de onda impresas.
- Ratio de las tres guías de onda teniendo en cuenta el peso de los “Flanges”.

Los resultados de los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  van a ser una media de los resultados extraídos de *Matlab* en el rango de frecuencia expuesto anteriormente dividido por la longitud de la guía.

	Guía de onda	Nx	S <sub>11</sub> (dB)		S <sub>21</sub> (dB/m)		Peso	Ratio
			Media	Peor caso	Media	Peor caso		
SIMULADO	Guía de referencia sin oxidar	\	-76,2126	-52,0162	-0,000247	-0,00262	87,86 g	0
	Guía de referencia oxidada	\	-76,2126	-52,0162	-0,000247	-0,00262	87,86 g	0
	Guía perforada	6	-47,7084	-22,2647	-0,272	-0,644	56,35g	0,6414
		8	-51,3301	-30,2068	-0,198	-0,385	65,37 g	0,744
MEDIDO	Guía de referencia sin oxidar	\	-34,6068	-19,3580	-0,511	-1,5	174,71 g	0
	Guía de referencia oxidada	\	-30,7059	-22,0449	-1,6	-2,3	174,71 g	0
	Guía perforada	6	-33,5575	-23,6503	-1	-1,7	134,98 g	0,7714
		8	-32,5165	-23,9921	-0,6881	-1,6	144,98 g	0,8277

Tabla 14. Tabla de resultados tanto medidos como simulados de las guías de onda fabricadas.

Como observamos en la tabla, podemos ver que los resultados simulados y medidos son muy semejantes, siendo esto muy bueno para el resultado del TFG, ya que demuestra que la impresión ha salido buena y se parece mucho a lo “ideal”.

Para los resultados medidos, podemos ver que la guía de referencia sin oxidar obtiene unos resultados mejores respecto a la oxidada, tanto para el parámetro S<sub>11</sub> (obteniendo una media un poco mejor que la oxidada, habiendo una diferencia solo de 3,9 dB) y el parámetro S<sub>21</sub> sigue siendo mejor en la guía no oxidada, pero con una diferencia poco significativa, ya que los dos valores son muy cercanos a 0; esto se debe a las pérdidas debido a la conductividad de las paredes de la guía de referencia oxidada.

Si comparamos estas dos guías de referencia respecto a las perforadas, podremos observar que, sí que hay un empeoramiento de los dos parámetros, pero con un peso menor. Del parámetro S<sub>11</sub> podemos observar que su media es bastante buena en las guías perforadas, siendo un poco mejor en la guía de “Nx=8” debido a que hay menos dimensión de agujeros; en cambio, aunque este valor empeore, podemos ver que el peso disminuye bastante, obteniendo un ratio de 0,7714 (es decir disminuye casi un 17%) en el caso de “Nx=8” y 0,8277 (disminuyendo aproximadamente un 23%) en el caso de “Nx=6”. Podemos ver que los dos casos son muy buenos, y que observando los datos del S<sub>11</sub> y del ratio, la guía perforada de “Nx=6” sería una buena opción. El parámetro S<sub>21</sub> también es un resultado muy bueno para los dos casos, siendo también un poco mejor en la guía perforada de “Nx=8”; pero, como los cambios entre una guía perforada y la otra son también insignificantes y los dos valores se aproximan a 0, seguiría siendo una opción buena la guía perforada de “Nx=6”, ya que nos compensa más ese 23% de peso menos respecto a la de referencia. Respecto a los peores valores de los dos parámetros S<sub>11</sub> y S<sub>21</sub>, en el parámetro de S<sub>11</sub> sí que obtenemos unos valores de -23,6503 dB y -23,9921 dB, que dentro de lo que cabe, no son valores del todo malos. Y en el S<sub>21</sub>, los peores valores (-1,7 dB/m y -1,6 dB/m) siguen siendo valores aproximados a 0.

Como conclusión, si comparamos la guía de referencia oxidada con la guía perforada de “Nx=8”, observamos que la media de las pérdidas de transmisión S<sub>21</sub> son un poco más buenas en el caso



de la guía perforada (-1,6 dB/m respecto a -0,6881 dB/m). Esto podemos explicarlo por qué, la guía perforada al tener menos dimensión de paredes de material tiene menos dimensión en caso de que se oxide, por lo tanto, obtiene menos pérdidas debido a la conductividad que respecto a la guía de onda de referencia.

## Capítulo 8. Conclusiones

En este TFG se ha expuesto la idea de realizar una guía de onda rectangular perforada, con el objetivo de crear un modelo capaz de tener unas pérdidas (respuesta eléctrica) mínimas, pero compensándolo de manera que el peso fuese inferior a una guía de onda tradicional. Tras la realización de este trabajo de fin de grado, se ha podido conseguir los objetivos impuestos al principio del proyecto.

Se han estudiado las diferentes formas de impresión 3D de la actualidad, tanto en plástico como en metal, analizando sus diferencias y consiguiendo una forma de impresión acertada para nuestro proyecto. Además, se ha analizado los diferentes proyectos generados con ideas similares de impresión, para poder mejorar sus objetivos.

Se ha podido aprender de manera avanzada sobre el manejo del programa software CST, creando diferentes estructuras de guía de onda, y estudiando de manera simulada sus diferentes características.

Desde el punto de vista teórico, se ha aprendido sobre la optimización multiobjetivo, una técnica capaz de dar soluciones óptimas y minimizar una función. También, se ha podido desarrollar una función en *Matlab* capaz de poner en práctica esta optimización multiobjetivo a nuestro proyecto, aprendiendo a trabajar simultáneamente con CST y *Matlab* para un diseño óptimo. Aunque esta parte no haya sido acabada con éxito, se deja a tratarse de manera futura, ya sea en otro TFG o en para posteriores estudios.

Se han creado diferentes prototipos de guía de onda perforados, así como prototipos de guía de onda de referencia para poder compararlos. Se han expuesto estos diferentes modelos con diferentes características de diseño, pudiendo estudiarlos en profundidad y sacar un resultado exitoso. Gracias a ello, y a los análisis paramétricos realizados en CST, se ha conseguido alcanzar nuestros objetivos de diseño, creando un modelo que ha sido capaz de reducir la relación de volumen entre la guía de onda perforada y la guía de onda de referencia, alcanzando el objetivo de tener un valor de factor de reflexión dentro de un rango mínimo y, además, se ha podido minimizar las pérdidas de transmisión, consiguiendo unos resultados muy buenos.

Se ha podido fabricar tres prototipos de guía, eligiendo dos prototipos de guía perforados con diferentes tamaños de agujeros, y un prototipo de guía de referencia ideal. Partiendo de esto, se ha podido imprimir a través de la técnica de impresión en metal BMD expuesta por la empresa Desktop Metal. Se ha podido medir los prototipos para analizar sus resultados, y compararlos con la guía de referencia, sacando como conclusión que, aunque se rebaje el peso de la guía, se sigue teniendo una respuesta eléctrica muy buena, capaz de sostenerla.

Además, se ha podido realizar gráficos de los resultados de las tres guías a través de *Matlab* para poder comparar los resultados a través de tablas comparativas, donde se observan los resultados de manera muy visual.

En conclusión, se ha obtenido un TFG con unos resultados bastante favorables, proponiendo la utilización de este para una investigación más adelante de diversos temas relacionados con este trabajo.



## Capítulo 9. Líneas Futuras

El trabajo realizado en este proyecto de fin de carrera da la posibilidad de continuar el trabajo en diferentes líneas de investigación.

En primer lugar, una opción sería diseñar guías de onda perforadas, pero probando agujeros de otras geometrías, como circulares o hexagonales, y probar como afectaría a las respuestas eléctricas de las guías.

Otro punto a investigar sería completar el análisis multiobjetivo, ya que, por falta de tiempo, no se ha podido llegar a concluir del todo y, es una herramienta muy potente para poder encontrar el diseño óptimo.

En tercer lugar, se debería diseñar algún componente con agujeros como por ejemplo un filtro o una bocina para compararlos con otros prototipos diseñados y expuestos en otros artículos científicos.

Finalmente, sería interesante probar a imprimir nuestros prototipos con otras técnicas de impresión 3D, como sería directamente en plástico y luego metalizarlos, y compararlos con los resultados de nuestros diseños impresos directamente en metal.

## Capítulo 10. Bibliografía

- [1] Lucas-Bartolo, N. (2020, 29 enero). *¿Qué son los satélites artificiales y para que sirven?* El Economista. <https://www.economista.com.mx/tecnologia/que-son-los-satelites-artificiales-20200129-0066.html>
- [2] Enterprise, Ins. (SEI), S. (2020). 2020 NANO/MICROSATELITE MARKET FORECAST, 10 EDITION. *SpaceWorks*.
- [3] Space, A. (2022, 9 marzo). *Guía básica de nanosatélites*. Alén Space. <https://alen.space/es/guia-basica-nanosatelites/>
- [4] Sanchis, E. & Ejea, J. B. (2008, 11 noviembre). *Propagación de la luz en guías de onda*. uv.es. [https://www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Temas/B\\_T1.pdf](https://www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Temas/B_T1.pdf)
- [5] Bustio Villanueva, I. (2015). Diseño de una transición de Línea Coaxial a Línea Microstrip en Ultra Wide Band. *Universidad de Cantabria*.
- [6] (2022, 18 julio). *La historia de la impresora 3D: los orígenes de las primeras máquinas*. Abax Innovation Technologies. <https://abax3dtech.com/2020/07/24/historia-de-la-impresora-3d/>
- [7] ETSIT, U. P. de V. (2022). *Fundamentos Teóricos: Guía de onda*.
- [8] Hernan Perdomo Cortes, C. & Vivas Homez, C. (2004). TECNICA MICROSTRIP CONCEPTOS, APLICACIONES Y SOFTWARE DE DISEÑO. *Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones*.
- [9] ETSIT, U. P. de V. (2019). *Capítulo 2. Línea de transmisión*.
- [10] (2022b, octubre 13). *Impresión 3D: todo lo que necesitas saber*. aula21 | Formación para la Industria. <https://www.cursosaula21.com/que-es-la-impresion-3d/>
- [11] Herraíz Zanón, D. (2022). Resumen técnicas impresión 3D. *Resumen técnicas impresión 3D*.
- [12] *Modelado por deposición fundida (FDM) | Tecnología de impresión 3D*. (s. f.). <https://www.materialise.com/es/industrial/tecnologias-impresion-3d/modelado-deposicion-fundida>
- [13] Bitfab. (2020, 2 enero). *Impresión 3D en resina (SLA/DLP) por*. <https://bitfab.io/es/impresion-3d-resina/>
- [14] *Electrodeposición | La Guía de Química*. (2010, 18 noviembre). <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/electrodeposicion>
- [15] *Sistema de pulverización catódica (sputtering) mediante Magnetron*. (2019, 5 abril). ISOM\_web. <http://www.isom.upm.es/sistema-de-pulverizacion-catodica-sputtering-mediante-magnetron/>
- [16] Gaget, L. (2020, 1 julio). *Tecnología SLM Metal para impresión 3D*. Sculpteo. <https://www.sculpteo.com/es/materiales/slm-materiales/>
- [17] *Impresora 3D de materiales plásticos - P 500*. (s. f.). EOS GmbH Electro Optical Systems - SLM / de alto rendimiento / de alta velocidad. <https://www.aeroexpo.online/es/prod/eos-gmbh-electro-optical-systems/product-169717-47937.html>
- [18] *Spectra H - Impresora 3D EBM by GE Additive | DirectIndustry*. (s. f.). <https://www.directindustry.es/prod/ge-additive/product-198309-1976476.html>
- [19] *Desktop Metal lleva la impresión 3D de metal a las oficinas y a la producción masiva*. (s. f.). Interempresas. <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/185423-Desktop-Metal-lleva-la-impresion-3D-de-metal-a-las-oficinas-y-a-la-produccion-masiva.html>
- [20] Sorrentino, R. & A. Peverini, O. (2016). Additive Manufacturing: A key Enabling Technology for Next-Generation Microwave and Millimeter-Wave Systems. *Point of View*, 104, 1362-1366.
- [21] Huan, G.-L., Zhou, S.-G., Sim, C.-Y.-D., Chio, T.-H. & Yuan, T. (2017). Lightweight Perforated Waveguide Structure Realized by 3-D Printing for RF Applications. *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, 65, 3897-3904.



- [22] A. Rojas-Nastrucci, E., Nussbaum, J., M. Weller, T. & B. Crane, N. (2016). Meshed Rectangular Waveguide for High Power, Low Loss and Reduced Weight Applications. *Center for Wireless and Microwave Information Systems (WAMI)*.
- [23] BMD Design Guide. (s. f.). *Desktop Metal*. <https://desktopmetal.com>
- [24] Esteban, H. (s. f.). *Diseño de componentes pasivos para sistemas de comunicaciones de alta frecuencia* [Diapositivas; Dpto. de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia].
- [25] CST STUDIO SUITE. Software de simulación Electromagnética y Multifísica. (s. f.). *DASSAULT SYSTEMES*.
- [26] PASTERNAK. (2020). *Pasternack Enterprises, Inc.*



## Capítulo 11. Anexo

```
CSTProject = 'GuiaPerforada_final_marta.cst';
CST = TCSTInterface(); %CREAR EL OBJETO CST
CST.OpenProject(CSTProject);

goal = [0.15,0];
weight = [1,1];
g_limite_inferior = 0.25;
g_limite_superior = 3;
D_limite_inferior = 0.1;
D_limite_superior = 2;
w1 = weight(1);
w2 = weight(2);

A = []; % no linear constraints
b = [];
Aeq = [];
beq = [];
```

```
lb = [g_limite_inferior,D_limite_inferior]; %corresponde a limites de
% valor inferiores de g y D de 0,25 y 0,1
ub = [g_limite_superior, D_limite_superior]; %corresponde a limites de
% valor superiores de g y D de 3 y 2

g0=1; %valor inicial de g
D0=1; %valor inicial de D
x0 = [g0,D0]; %vector que contiene los datos iniciales.
lim_w2 = 40; %EN PRINCIPIO PONGO 50 PERO VOY A PROBAR CON 40
vector=[]; %VARIABLES QUE TE DEVUELVE MATLAB AL EJECUTAR EL PROGRAMA.
vector_2=[]; %SOLUCIONES EN LOS PUNTOS VECTOR.
pesos=[];
```

```
for w2 = 0.1:2:lim_w2

    weight(2) = w2;

    [solution,fval] = fgoalattain(@(x)multi(x,CST),x0,goal,weight,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
    %LLAMA A MULTI

    vector =cat(1,vector,solution);
    vector_2 = cat(1, vector_2, fval');
    pesos = cat(1,pesos,weight);
    save ('solucion_final_con40puntos.mat', 'pesos', 'vector', 'vector_2');

end
```

```
function error = multi(x,CST)

%DARLE VALORES A G Y D ALEATORIOS
x(2)
x(1)

CST.ChangeParameter('D', x(2));

CST.ChangeParameter('g', x(1));

%DA ORDEN DESDE MATLAB A CST QUE SIMULE
CST.Solve();

ParamName = 'ratio';
ratio = CST.GetParameterValue(ParamName); %F1
```

```
ratio = CST.GetParameterValue(ParamName); %F1
error(1) = ratio; %ponemos en error 1, el ratio.

% TreeItem = '1D Results\S-Parameters\S1,1';
% [f,S11_complejo,Zref,RunIDs,Info] = CST.Get1DResultFromTreeItem(TreeItem);

% S11_dB = 20*log10(abs(S11_complejo(:,end))); %pasamos de complejo a dB
%
% S11_max=max(S11_dB); %COJO MAXIMO DE S11_DB que es el peor caso
%
% %CONVERTIMOS S11 PARA EVALUARLO CON EL RATIO
%
% S11 = 1 - max(S11_max,-35)/-35; %S11 final
%
% error(2)=S11;

TreeItem = '1D Results\S-Parameters\S2,1';
[f,S21_complejo,Zref,RunIDs,Info] = CST.Get1DResultFromTreeItem(TreeItem);

S21_dB = 20*log10(abs(S21_complejo(:,end))); %pasamos de complejo a dB

S21_min = min(S21_dB); %COJO MINIMO DE S21_DB

error(2)=abs(S21_min); %ponemos en error 2, el S21_min.

end
```