

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN



" CARACTERIZACIÓN DE FILAMENTO  
3D CONDUCTOR Y PINTURA DE PLATA  
PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE  
CIRCUITOS DE MICROONDAS "

TRABAJO FIN DE GRADO

Diciembre -2022

AUTOR: Soukaina El Hamry Saoura

DIRECTOR: Héctor García Martínez

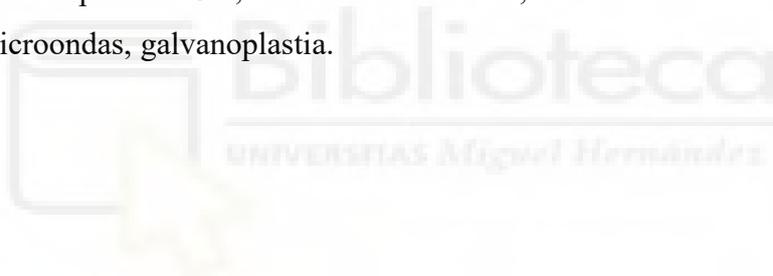
CODIRECTOR: Germán Torregrosa Penalva



## RESUMEN

El objeto de estudio de este trabajo de investigación se basa en la caracterización de un filamento 3D conductor y pintura de plata para la implementación de circuitos de microondas. Para ello, diseñaremos y fabricaremos mediante diversos procesos unos circuitos de Test que nos permitirán calcular las variables que caracterizan el material. Posteriormente mediremos los circuitos implementados utilizando un VNA (Vector Network Analyzer) y los resultados obtenidos nos permitirán calcular la conductividad del filamento 3D conductor y de la pintura de plata. Esto hará que podamos determinar la opción óptima para la implementación de futuros circuitos. Finalmente, conociendo las características y el comportamiento del material, se diseñará y fabricará una estructura periódica EBG (Electronic Band Gap) con perfil sinusoidal que presenta variaciones en altura y ancho.

Palabras clave: impresión 3D, material conductor, caracterización de materiales, circuitos de microondas, galvanoplastia.





## **ABSTRACT**

The object of study of this project is based on the characterization of conductive 3D filament and silver paint for the implementation of microwave circuits. For this purpose, we will design and manufacture by means of different processes some circuits test that will allow us to calculate the variables that characterize the material. Subsequently, we will measure the implemented circuits using a VNA (Vector Network Analyzer) and the results obtained will allow us to calculate the conductivity of the conductive 3D filament and the silver paint. This will allow us to determinate the optimal choice for the implementation of future circuits. Finally, knowing the characteristics and behavior of the material, a periodic EBG (Electronic Band Gap) structure with sinusoidal profile that presents variations in height and width will be designed and fabricated.

Key words: 3D printing, conductive material, material characterization, microwave circuits, electroplating.





## **AGRADECIMIENTOS**

Este Trabajo Fin de Grado es el resultado de varios meses de trabajo y aprendizaje, y finalizarlo no hubiera sido posible sin la ayuda de varias personas a las que me gustaría agradecer.

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi tutor, Héctor García Martínez por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto con él, por su gran implicación y dedicación, sin olvidar la atención y disponibilidad prestada siempre que la he necesitado. Agradecer también a Germán Torregrosa Penalva por toda su ayuda.

Asimismo, me gustaría dar las gracias al Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica por acogerme en su laboratorio y hacerme sentir cómoda desde el primer día hasta el último.

Dar las gracias a mis padres y hermanos por ayudarme durante toda esta etapa y apoyarme en los momentos más complicados. Sin vosotros todo esto no habría sido posible.

Por último, no me olvido de todos los compañeros y amigos que me han acompañado durante todo este proceso desde el principio. Gracias por hacer que esta etapa haya sido una de las mejores de mi vida, sois todos increíbles.

A todos vosotros, gracias.



# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xii
<b>ÍNDICE DE GRÁFICAS</b> .....	xv
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS</b> .....	xvii
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	3
2.1. <b>ORIGEN DE LA IMPRESIÓN 3D</b> .....	3
2.2. <b>TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D</b> .....	6
2.2.1. <b>MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)</b> .....	6
2.2.2. <b>ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA)</b> .....	13
2.2.3. <b>SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR LÁSER (SLS)</b> .....	17
<b>CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	19
3.1. <b>INSTRUMENTOS DE FABRICACIÓN</b> .....	19
3.1.1. <b>IMPRESORA 3D</b> .....	19
3.1.2. <b>FRESADORA</b> .....	20
3.1.3. <b>GALVANOPLASTIA</b> .....	22
3.2. <b>INSTRUMENTOS DE MEDIDA</b> .....	23
3.2.1. <b>DINOCAPTURE 2.0</b> .....	24
3.2.2. <b>ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES (VNA)</b> .....	24
3.3. <b>PROGRAMAS SOFTWARE</b> .....	25
3.3.1. <b>ADVANCED DESIGN SYSTEM (ADS)</b> .....	25
3.3.2. <b>EMPRO</b> .....	26
3.3.3. <b>ULTIMAKER CURA 3D</b> .....	26
3.3.4. <b>FREECAD</b> .....	27

<b>CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DEL FILAMENTO CONDUCTOR MULTI3D</b>	<b>28</b>
4.1. DISEÑO EN ADS DE LOS CIRCUITOS DE TEST .....	28
4.2. FABRICACIÓN DE LOS SUSTRATOS .....	30
4.3. FABRICACIÓN DE CADA PLACA CON LA IMPRESORA 3D.....	32
4.4. MEDIDA DE LAS PLACAS FABRICADAS .....	36
4.5. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO FR4.....	38
4.5.1. LÍNEA DE TRANSMISIÓN .....	39
4.5.2. RESONADOR CORTO DE LONGITUD 10MM.....	44
4.5.3. RESONADOR LARGO DE LONGITUD 15MM.....	46
4.5.4. CÁLCULO DE LAS VARIABLES DEL SUSTRATO .....	48
4.6. CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD DEL FILAMENTO MULTI3D.....	49
4.6.1. PLACA COBRE_MULTI3D .....	49
4.6.2. PLACA MULTI3D_COBRE.....	55
RESONADOR LARGO DE LONGITUD 15MM.....	58
4.6.3. PLACA MULTI3D_MULTI3D.....	59
4.7. OBTENCIÓN DEL VALOR DE LA CONDUCTIVIDAD DEL FILAMENTO MULTI3D .....	63
<b>CAPÍTULO 5. DISEÑO DE CIRCUITOS CON SUSTRATO PLA Y PINTURA DE PLATA</b>	<b>65</b>
5.1. DISEÑO DE LA PLACA CON MATERIAL PLA.....	65
5.2. FABRICACIÓN DE LA PLACA CON MATERIAL PLA Y PINTURA DE PLATA	66
5.3. CARACTERIZACIÓN DE LA PINTURA DE PLATA .....	69
5.3.1. LÍNEA DE TRANSMISIÓN .....	69
5.3.2. RESONADOR CORTO DE LONGITUD 10MM.....	72
5.3.3. RESONADOR LARGO DE LONGITUD 15MM.....	73
5.3.4. CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD DE LA PINTURA DE PLATA.....	75
5.4. APLICACIÓN DE LA GALVANOPLASTIA DE ESPIGAS .....	75

5.5. CARACTERIZACIÓN DE LA PINTURA DE PLATA MÁS LA GALVANOPLASTIA DE ESPIGAS .....	76
5.5.1. LÍNEA DE TRANSMISIÓN .....	77
5.5.2. RESONADOR CORTO DE LONGITUD 10MM.....	78
5.5.3. RESONADOR LARGO DE LONGITUD 15MM.....	79
5.5.4. CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD DE LA PINTURA DE PLATA+GALVANOPLASTIA DE ESPIGAS .....	80
5.6. CONCLUSIONES .....	80
<b>CAPÍTULO 6. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA.....</b>	<b>82</b>
6.1. DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA CON PERFIL SINUSOIDAL QUE PRESENTA VARIACIONES EN ALTURA .....	82
6.1.1. PROCESO DE FABRICACIÓN.....	84
6.1.2. PROCESO DE MEDIDA.....	86
6.2. DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA CON PERFIL SINUSOIDAL QUE PRESENTA VARIACIONES EN ALTURA Y ANCHURA .....	87
6.2.1. PROCESO DE FABRICACIÓN.....	91
6.2.2. PROCESO DE MEDIDA.....	92
6.3. COMPARATIVA Y CONCLUSIONES .....	94
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>96</b>
7.1. CONCLUSIONES DEL PROYECTO.....	96
7.2. LÍNEAS FUTURAS .....	97
<b>ANEXOS .....</b>	<b>99</b>
ANEXO A: PROCESO DE CALIBRADO Y MANTENIMIENTO DE LA IMPRESORA 3D .....	99
ANEXO B: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LOS CONECTORES SMA.....	100
ANEXO C: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LA PINTURA DE PLATA .....	102
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>104</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tecnología de impresión FDM [5].	7
Figura 2. Impresora FDM cartesiana. [12]	11
Figura 3. Impresora FDM delta. [13]	11
Figura 4. Impresora 3D polar. [14]	12
Figura 5. Impresora FDM cinta transportadora. [15]	12
Figura 6. Tecnología SLA de abajo arriba. [17]	14
Figura 7. Tecnología SLA de arriba abajo. [17]	15
Figura 8. Comparativa entre DLP y MSLA según la fuente de luz. [20]	16
Figura 9. Tecnología de impresión SLS. [22]	18
Figura 10. (a) Bobina de Multi3D. (b) Bobina de PLA. [23]	19
Figura 11. Impresora 3D modelo BQ Hephestos. [24]	20
Figura 12. Máquina fresadora. [25]	21
Figura 13. Proceso de galvanoplastia.	22
Figura 14. Proceso de galvanoplastia de espigas. [26]	23
Figura 15. Microscopio electrónico DinoCapture 2.0. [27]	24
Figura 16. Analizador vectorial de redes (VNA). [28]	25
Figura 17. Esquemático en ADS de los circuitos de Test.	29
Figura 18. Layout en ADS del diseño de los circuitos de Test.	30
Figura 19. Conector SMA modelo 292-04A-6. [29]	30
Figura 20. Placas de Test fabricadas mediante la fresadora.	31
Figura 21. Placa fabricada de Cobre_Cobre.	32
Figura 22. Diseño en EMPPro del circuito de Test con escuadras.	33
Figura 23. Diseño de las escuadras en Ultimaker Cura.	33
Figura 24. Diseño del circuito de Test en Ultimaker Cura.	34
Figura 25. Placa fabricada de Multi3D_Cobre.	34
Figura 26. Diseño del plano de masa en Ultimaker Cura.	35
Figura 27. Placa fabricada de Cobre_Multi3D.	35
Figura 28. Placa fabricada de Multi3D_Multi3D.	36
Figura 29. Placa fabricada de Multi3D con pasta de plata.	37
Figura 30. (a) Circuito de Test metalizado. (b) Plano de masa metalizado.	38
Figura 31. Medición de la anchura de la línea de Cobre_Cobre con DinoCapture.	39
Figura 32. Circuito para simular el comportamiento de los conectores SMA.	41

Figura 33. Diseño en ADS de la línea de transmisión de Cobre_Cobre. ....	42
Figura 34. Mediciones del resonador corto de 10mm de Cobre_Cobre con DinoCapture. ....	44
Figura 35. Diseño en ADS del resonador corto de 10mm de Cobre_Cobre. ....	45
Figura 36. Mediciones del resonador largo de 15mm de Cobre_Cobre con DinoCapture. ....	47
Figura 37. Diseño en ADS del resonador largo de 15mm de Cobre_Cobre. ....	47
Figura 38. Representación de parámetros S de transmisión del resonador largo de 15mm de Cobre_Cobre. ....	48
Figura 39. Mediciones de las pistas de la placa de Cobre_Multi3D con DinoCapture. ....	50
Figura 40. Diseño en ADS de la línea de transmisión de Cobre_Multi3D. ....	51
Figura 41. Diseño en ADS del resonador corto de 10mm de Cobre_Multi3D. ....	52
Figura 42. Diseño en ADS del resonador largo de 15mm de Cobre_Multi3D. ....	54
Figura 43. Mediciones de las pistas de la placa de Multi3D_Cobre con DinoCapture. ....	56
Figura 44. Mediciones de las pistas de la placa de Multi3D_Multi3D con DinoCapture. ....	60
Figura 45. (a) Diseño de la placa de PLA en EMPro. (b) Diseño de la placa de PLA en Ultimaker Cura. ....	66
Figura 46. Placa de PLA fabricada con la impresora 3D. ....	67
Figura 47. Jeringa para rellenar los circuitos con pintura de plata. [31] ....	67
Figura 48. (a) Rollo de lámina de cobre de 35 $\mu$ m. (b) Pegamento de barra. (c) Papel de lija. [31] ....	68
Figura 49. Placa de PLA con pintura de plata. ....	68
Figura 50. Diseño en ADS de la línea de transmisión de pintura de plata. ....	70
Figura 51. Propagación de los campos en la estructura fabricada. ....	71
Figura 52. Diseño en ADS del resonador corto de 10mm de pintura de plata. ....	72
Figura 53. Diseño en ADS del resonador largo de 15mm de pintura de plata. ....	74
Figura 54. Representación de parámetros S del resonador largo de 15mm de pintura de plata. ..	74
Figura 55. Placa de PLA con pintura de plata más electroplating. ....	76
Figura 56. Diseño de estructura EBG con variaciones de altura en EMPro. ....	83
Figura 57. Dimensiones de la estructura EBG con variaciones de altura. ....	83
Figura 58. Estructura EBG fabricada con variaciones de altura cara top. ....	85
Figura 59. Estructura EBG fabricada con variaciones de altura cara bottom. ....	85
Figura 60. Estructura EBG fabricada con variaciones de altura vista de perfil. ....	85
Figura 61. Diseño de estructura EBG con variaciones de altura y ancho en EMPro. ....	89
Figura 62. Dimensiones de la estructura EBG con variaciones de altura y ancho. ....	90
Figura 63. Estructura EBG fabricada con variaciones de altura y ancho cara top. ....	91
Figura 64. Estructura EBG fabricada con variaciones de altura y ancho cara bottom. ....	91

Figura 65. Estructura EBG fabricada con variaciones de altura y ancho vista de perfil. .... 92

Figura 66. Diseño de línea microstrip con plano de masa superior..... 98



# ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comportamiento de los conectores SMA según el fabricante. [30] .....	40
Gráfica 2. Simulación en ADS de los conectores SMA.....	41
Gráfica 3. Representación de parámetros S de transmisión de la línea de Cobre_Cobre.....	43
Gráfica 4. Representación de parámetros S de reflexión de la línea de Cobre_Cobre.....	44
Gráfica 5. Representación de parámetros S de transmisión del resonador corto de 10mm de Cobre_Cobre.....	46
Gráfica 6. Representación de parámetros S de transmisión de la línea de Cobre_Multi3D.....	51
Gráfica 7. Representación de parámetros S de transmisión del resonador corto de 10mm de Cobre_Multi3D.....	53
Gráfica 8. Representación de parámetros S de transmisión del resonador largo de 15mm de Cobre_Multi3D.....	54
Gráfica 9. Representación de parámetros S de transmisión de la línea de Multi3D_Cobre.....	57
Gráfica 10. Representación de parámetros S de transmisión del resonador corto de 10mm de Multi3D_Cobre.....	58
Gráfica 11. Representación de parámetros S de transmisión del resonador largo de 15mm de Multi3D_Cobre.....	59
Gráfica 12. Representación de parámetros S de transmisión de la línea de Multi3D_Multi3D..	61
Gráfica 13. Representación de parámetros S de transmisión del resonador corto de 10mm de Multi3D_Multi3D.....	62
Gráfica 14. Representación de parámetros S de transmisión del resonador largo de 15mm de Multi3D_Multi3D.....	63
Gráfica 15. Representación de parámetros S de la línea de pintura de plata.....	70
Gráfica 16. Representación de parámetros S de la fase de la línea de pintura de plata.....	71
Gráfica 17. Representación de parámetros S del resonador corto de 10mm de pintura de plata.	73
Gráfica 18. Representación de parámetros S de la línea de pintura de plata más electroplating.	77
Gráfica 19. Representación de parámetros S del resonador corto de 10mm de pintura de plata más electroplating.....	78
Gráfica 20. Representación de parámetros S del resonador largo de 15mm de pintura de plata más electroplating.....	79
Gráfica 21. Representación de la simulación de parámetros S de estructura EBG con variaciones en altura.....	84

Gráfica 22. Representación de la medida de parámetros S de estructura EBG con variaciones en altura.....	86
Gráfica 23. Comparativa entre la medida y simulación de la estructura EBG con variaciones de altura.....	87
Gráfica 24. Comparativa de distintas amplitudes de la estructura EBG. ....	88
Gráfica 25. Representación de la simulación de parámetros S de estructura EBG con variaciones en altura y ancho. ....	91
Gráfica 26. Representación de la medida de parámetros S de estructura EBG con variaciones en altura y ancho. ....	93
Gráfica 27. Comparativa entre la medida y simulación de la estructura EBG con variaciones de altura y ancho. ....	94
Gráfica 28. Comparativa de las medidas de ambas estructuras EBG.....	95



# LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

## A

ABS *Scrylonitrile Butadiene Styrene*, 1

## C

CAD *Computer-Aided Design*, 6

## D

dB decibelios, 44

DLP *Digital Light Processing*, 15

## E

EBG *Electronic Band Gap*, 2

## F

FDM modelado por deposición fundida, 3

## G

GHz Gigahercios, 53

## L

LCD *Liquid Crystal Display*, 16

## M

m metro, 50

mm milímetro, 43

MSLA *Mask Stereolithography*, 15

## P

PET *Polyethylene Terephthalate*, 7

PLA *Polylactic Acid*, 1

## R

RepRap *Replicating Rapid-Prototypers*, 5

RF radiofrecuencia, 24

## S

S siemens, 50

SLA estereolitografía, 4

SLS sinterización selectiva por láser, 4

SMA *SubMiniature versión A*, 2

## T

TPU *Thermoplastic Polyurethane*, 7

## U

UV ultravioleta, 3

## V

VNA *Vector Network Analyzer*, 2



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el concepto de la impresión 3D (tres dimensiones) se ha popularizado en muchos de los ámbitos que nos rodean debido a que el gran desarrollo de estas máquinas de impresión ha facilitado el proceso de fabricación de numerosos prototipos proporcionando un bajo coste de elaboración.

La impresión 3D es un tipo de tecnología de fabricación que utiliza un método de adición capaz de crear un objeto físico tridimensional a partir de un modelo digital. Esto se realiza mediante la superposición de distintas capas de un determinado material cuya elección dependerá de las condiciones físicas y mecánicas que debe poseer el prototipo a fabricar. Entre los filamentos de material más utilizados cabe destacar el PLA (*Polylactic Acid*) y ABS (*Scrylonitrile Butadiene Styrene*), aunque también se han ido desarrollando materiales orgánicos y biodegradables para ser utilizados en aplicaciones médicas como, por ejemplo, en el uso de prótesis o trasplantes. O también materiales conductores para ser aplicados en el sector tecnológico de las telecomunicaciones, concretamente en los circuitos de alta frecuencia.

Como se ha dicho anteriormente, el gran desarrollo de las técnicas de impresión 3D ofrecen numerosas ventajas en el sector de las telecomunicaciones y circuitos de alta frecuencia, ya que de esta manera se abre una puerta a la creación de infinidad de diseños que quedan a elección del ingeniero responsable sin limitarse a las especificaciones de ciertos fabricantes en cuanto a dimensiones, material, geometría, etc. Además, una gran ventaja que ofrece el uso de impresoras 3D en circuitos impresos es que facilita y agiliza el proceso de fabricación haciéndolo accesible a muchos más usuarios, ya que trabajar con una impresora 3D resulta muchas veces más sencillo y cómodo en comparación con los instrumentos tradicionales de fabricación de circuitos.

El objeto de estudio de este Trabajo Fin de Grado será en primer lugar la caracterización del nuevo filamento conductor Multi3D para calcular la conductividad de este material y determinar si es útil para la fabricación de circuitos de microondas. Se ha escogido este filamento ya que es considerado el mejor conductor de la tecnología FDM de circuitos impresos, componentes, antenas y filtros de radiofrecuencia, etc. Está

principalmente compuesto por polvo de cobre y tiene una resistividad de  $0.006 \Omega/\text{cm}$ , mucho menor que la de cualquier filamento de carbono o grafeno.

Para ello, en primer lugar, debemos caracterizar el sustrato FR4 empleado obteniendo su constante dieléctrica y tangente de pérdidas mediante la fabricación de unos circuitos de Test utilizando la fresadora. Una vez caracterizado el sustrato, se diseñarán y fabricarán mediante la impresora 3D los mismos circuitos de Test utilizando el filamento conductor. Estos circuitos consisten en una línea de transmisión y dos resonadores de distinta longitud que mediante los ajustes de las simulaciones y medidas realizadas nos permitirán obtener la conductividad del filamento.

Dado que la conductividad obtenida del material Multi3D no es lo suficientemente buena para este tipo de aplicaciones, se continuará la investigación desde otro posible foco: se diseñarán circuitos con sustrato de material PLA y las líneas de transmisión serán trazadas con pintura de plata que posteriormente se metalizará mediante la técnica de galvanoplastia de espigas. Este proceso ofrece mejores resultados y, además, es mucho más rápido, económico y sencillo que el anterior, ya que solamente se necesita la impresora 3D y el kit de galvanoplastia para la fabricación de circuitos.

Por último, una vez caracterizada la pintura de plata conociendo su conductividad y cómo se comporta el material, se pasará al diseño de una estructura EBG (*Electronic Band Gap*) periódica con perfil sinusoidal que presentará variaciones tanto en altura como en ancho. Esta figura será medida con el VNA (*Vector Network Analyzer*) utilizando conectores SMA (*SubMiniature versión A*) que no necesitan soldarse con el circuito, y además ofrecen unas pérdidas mínimas. Las medidas finales realizadas sobre esta estructura nos permitirán obtener importantes conclusiones mediante la comparación del análisis empírico con las hipótesis planteadas al principio de la investigación.

## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se hará una descripción general del estado actual de la impresión 3D, así como sus orígenes, evolución, materiales utilizados y métodos empleados. Como se ha dicho anteriormente, la impresión 3D está presente en muchos de los sectores que nos rodean, sin embargo, en esta investigación se profundizará en la impresión de modelado por deposición fundida (FDM) enfocada a la fabricación de circuitos de microondas. [1]

### 2.1. ORIGEN DE LA IMPRESIÓN 3D

La historia de la impresión 3D se remonta al momento posterior al de la invención de la impresora de inyección de tinta en 1976. Esta impresora, creada por Hewlett Packard, consistía en la expulsión de pequeñas gotas de tinta sobre diferentes tipos de soportes, generalmente papel.

Desde la aparición de las primeras impresoras 2D se tuvo claro que el siguiente paso sería para poder imprimir objetos físicos, más allá de dibujarlos sobre soportes como el papel.

En la década de los años 80, exactamente en 1981 se presenta en Japón la primera patente relacionada con la impresión 3D. Se trataba de un proyecto dirigido por el investigador Hideo Kodama que pretendía crear piezas sólidas mediante el curado de resina con rayos de luz ultravioleta (UV). Sin embargo, este proyecto no pudo llevarse a cabo debido a problemas de financiación que le dificultaron el cumplimiento del plazo establecido para ello.

Un año después, en 1982 en Francia, la idea de los dispositivos de prototipado rápido continúa desarrollándose por tres personas: Jean-Claude André, Olivier de Witte y Alain le Méhauté. Méhauté fue un ingeniero en la empresa de Alcatel que investigaba acerca de las piezas de geometría fractal. Witte trabajaba también para una filial de Alcatel con láseres realizando investigaciones sobre líquidos que eran capaces de convertirse en sólidos mediante láser. Ambos investigadores presentaron la nueva idea a André, que

trabajaba en el Centro Nacional de Investigación Científica de Francia (CNRS), y fue donde el proyecto se denegó debido a que se consideró que no tenía suficientes áreas de aplicación en esos momentos.

Sin embargo, tres semanas después Chuck Hull (conocido como el inventor de la tecnología 3D) sugirió un nuevo proceso que consistía en curar la resina fotosensible mediante lámparas UV capa a capa hasta crear una pieza personalizada. Esta tecnología se denominó estereolitografía (SLA) y fue en 1984 cuando Chuck Hull registra su patente y dos años más tarde, funda 3D Systems, la primera compañía de impresión 3D en el sector y también será la primera en comercializar impresoras SLA.

La impresión fue avanzando, y pocos años después de la primera impresora SLA, en 1987 aparece un sistema alternativo de impresión 3D. El investigador Carl Deckard inventa un sistema que sinteriza polvo de resina para convertirlo en un sólido, es decir, que el sinterizado es de polvo en lugar de resina líquida como ocurría en la estereolitografía. Esta tecnología se denominó sinterización selectiva por láser (SLS) y aunque surgió hace bastante tiempo, no fue hasta 2006 cuando apareció la primera impresora 3D SLS comercial.

Las terceras impresoras en llegar fueron las impresoras 3D FDM, que son las más conocidas hoy en día y representan un gran porcentaje del mercado. Esta vez se trataba del modelado por deposición fundida (FDM) que se basa en finas capas de filamento que se calienta para poder ser fundido y extruido a través de una boquilla que va depositándolo en una plataforma o cama caliente. La historia de cómo surgió esta tecnología es debido a que S.Scott Crump trataba de crear un juguete para su hija utilizando para ello una pistola cargada con cera caliente y termoplásticos que iba depositando en finas capas, obteniendo así el objeto final al enfriarse el material utilizado. En 1989 Scott Crump y su esposa Lisa Crump fundan Stratasys, que hoy en día es una de las compañías más importantes del sector a nivel de impresoras 3D profesionales.

En la década de los años 90 aparecen numerosas compañías que van a tener gran importancia en el desarrollo de la impresión 3D en diversas áreas profesionales.

En 1992 comenzaron a comercializarse las primeras impresoras SLA que, aunque presentaban algunos defectos e imperfecciones, eran capaces de llevar a cabo la fabricación de objetos mediante la deposición capa a capa y utilizando los rayos UV. Estas máquinas eran capaces de fabricar una pieza compleja en una sola noche. [2]

En la segunda década de los años 90 la impresión 3D comenzó a utilizarse en el campo de la medicina, que fue uno de los primeros en adoptar esta tecnología. Esta se podía usar en un recubrimiento sintético (partiendo de células propias del paciente) con el fin de implementar soluciones a problemas en determinados órganos. De forma paralela, esta tecnología llega a sectores como la odontología y la fabricación de prótesis. Este fue el primer paso hacia el campo de la bioimpresión.

Con la llegada del siglo XXI la evolución de las impresoras iba cada vez en aumento, aunque hasta entonces había sido un producto caro y destinado exclusivamente a determinados sectores profesionales. Sin embargo, en el año 2005 surgió la iniciativa denominada RepRap (*Replicating Rapid-Prototypers*) fundada por Adrian Bowyer que consistía en un proyecto de código abierto para construir una máquina impresora 3D capaz de imprimir la mayoría de sus propios componentes. Esto abre las puertas a diversos sectores como, por ejemplo: construcción, joyería, automoción, piezas decorativas, etc.

Unos años después, en la década 2010 surgen los kits de impresora 3D que llegan a hogares y centros de estudios. Estos permiten al usuario comprar impresoras 3D a un precio bajo a cambio de montarlas y calibrarlas por sí mismo. De esta manera, debido al gran avance de esta tecnología, se produce una subida en investigación y producción a gran escala, así como también en el consumo. [3]

Hasta la actualidad, la impresión 3D ha supuesto una auténtica revolución que ha sido capaz de incorporar nuevos métodos para el desarrollo de numerosos sectores, y que hasta entonces no deja de crecer.

## 2.2. TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

Como hemos dicho anteriormente, la impresión 3D es una tecnología de fabricación por adición. En primer lugar, un prototipo debe ser diseñado utilizando un software de modelado tipo CAD (*Computer-Aided Design*) que consiste en determinados programas de ordenador para crear o modificar representaciones gráficas tridimensionales (3D), sin embargo, en este software no se incluye ninguna información relacionada con aspectos estéticos como el color o textura de la figura u objeto a fabricar. A continuación, para que el diseño sea impreso en la máquina 3D, será necesario utilizar una interfaz que hace de intermediario entre el software CAD y la impresora. La función de este segundo software será transformar el modelo 3D diseñado (.stl) en el lenguaje que utiliza la impresora. Este software conocido como “*Slicer*” divide la figura en varias partes, dándole forma de capas o “rebanadas”, y para cada una de ellas calcula los movimientos que debe hacer el cabezal para rellenar cada área. En él se configuran los distintos parámetros de impresión, y finalmente, convierte el diseño en lenguaje máquina que será interpretado por la máquina 3D.

Actualmente existen diversas tecnologías de impresión 3D que se diferencian entre sí dependiendo del método que utiliza cada una para la creación de las figuras. A continuación, profundizaremos en las más populares:

### 2.2.1. MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)

Esta tecnología fue desarrollada por S.Scott Crump a finales de 1980 y hasta la actualidad es considerada el método existente más sencillo ya que se basa solamente en tres elementos principales: una camilla de impresión en la que se imprime la pieza, una bobina de filamento que actúa como material de impresión y un cabezal de extrusión que succiona el filamento y lo calienta para ser depositado de forma precisa capa por capa sobre la camilla de impresión. El objeto final se obtiene cuando las capas de filamento se enfrían y solidifican, y entonces se puede retirar para ser lijado, pintado, metalizado, etc. Se debe tener en cuenta que para la fabricación de algunas piezas es necesario incluir un sistema de soportes en el diseño para ayudar a que el proceso de

impresión se realice correctamente, y una vez terminada la figura, los soportes se retiran de una forma sencilla.

Uno de los parámetros más importantes que hay que tener en cuenta cuando se está configurando la impresión de la pieza es la altura de capa. Normalmente los valores oscilan entre 50 y 400 micras dependiendo de la figura, de esta manera, cuanto menor es la altura de capas más precisión tendrá la figura. Por lo contrario, si se utiliza una altura de capa elevada, la figura se reproduce con menos detalle. [4]

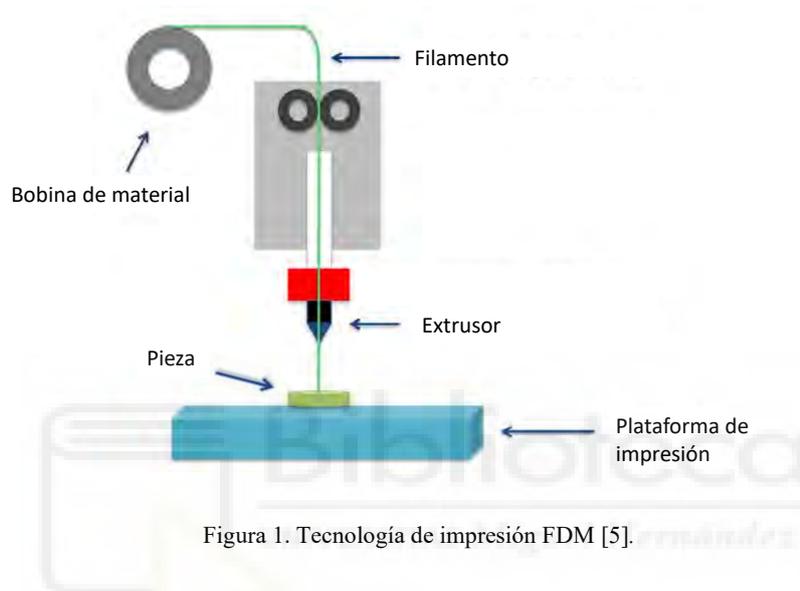


Figura 1. Tecnología de impresión FDM [5].

La impresión 3D comienza cuando la máquina alcanza la temperatura de fusión del material que se esté empleando. Entre los materiales de impresión 3D más populares en la deposición por fusión se encuentran el PLA, ABS, PET (*Polyethylene Terephthalate*), TPU (*Thermoplastic Polyurethane*), Nylon y Electrifi Multi3D. Todos los materiales anteriormente nombrados vienen enrollados en bobinas que facilitan la entrada del material al extrusor de la máquina 3D. A continuación, describiremos cada uno de ellos destacando las ventajas y desventajas que ofrecen:

- Filamento PLA:

Se trata de un biopolímero termoplástico fabricado a base de recursos renovables como el almidón de maíz, raíces de tapioca o caña de azúcar. Además, es biodegradable y no emite humos olorosos durante el proceso de impresión, cosa que lo convierte en una de las mejores opciones para la impresión 3D en muchos sectores como el ámbito escolar o doméstico. En cuanto a las características de

impresión tiene una temperatura de fusión de 180°C y no es necesaria la utilización de una camilla de impresión caliente, sin embargo, dado que se pueden generar problemas con la primera capa de impresión se recomienda cubrir la superficie de la camilla con cinta de adherencia (cinta de carroceros, por ejemplo) para facilitar el desprendimiento de la pieza. El PLA presenta una resistencia mecánica baja, es decir, se trata de un material frágil a la vez que duro. Por último, cabe destacar que también absorbe mucho la humedad y se vuelve endeble a temperaturas entorno a [60-70]°C por lo que no se puede utilizar en sectores donde se requiera una resistencia a altas temperaturas. [6]

- Filamento ABS:

El acrilonitrilo butadieno estireno es un polímero termoplástico bastante común en la industria, conocido principalmente por su alta resistencia a los impactos y su ligero peso. El ABS también presenta una elevada resistencia a las temperaturas que va desde -20°C hasta 80°C, de esta manera, resulta muy útil para piezas que estén sometidas a altas temperaturas o ambientes de muy bajas temperaturas. En cuanto a las características de impresión tiene una temperatura de fusión alrededor de 200°C y es obligatorio el uso de una camilla calefactada entre [80-130]°C cuando se desea imprimir. Además, el ABS es un plástico que se encoge cuando está en contacto con el aire, causando una deformación de la pieza y por lo tanto su desprendimiento de la superficie de la bandeja de impresión, de manera que es necesario aplicar un adhesivo especial como Kapton o laca adhesiva. Finalmente, es preferible que la impresora 3D posea una cámara cerrada, ya que el ABS es un plástico a base de petróleo que emite partículas de material que pueden ser dañinas para los usuarios. [7]

- Filamento PET:

El tereftalato de polietileno (PET) se utiliza de manera común en envases y botellas de plástico desechables. Es el filamento ideal para cualquier pieza destinada al contacto con alimentos debido a que no libera olores en el proceso de impresión y es totalmente reciclable, además posee gran rigidez y tiene buena resistencia al desgaste y corrosión. En cuanto a la temperatura de fusión de este material se encuentra en un rango entre 210°C y 250°C y no es necesario que la

camilla de impresión esté caliente. Sin embargo, como aspecto negativo, este filamento tiende a sobrecalentarse cuando se imprime en 3D.

Es por eso por lo que surge una de las variantes de este filamento denominada PETG, o poliéster glicolizado, que contiene la misma composición química que el PET solamente que con la adición de glicol para reducir el sobrecalentamiento y, por lo tanto, su aspecto frágil. De esta manera las piezas ganan resistencia y se conserva la dureza y transparencia. [8]

- Filamento TPU:

Es un tipo de elastómero similar al caucho que se caracteriza por su alta flexibilidad. Suele emplearse en objetos que se diseñan con goma como, por ejemplo, la industria del calzado y las ruedas. En su composición posee una secuencia de segmentos duros y blandos, de manera que, variando la proporción de estos segmentos, la flexibilidad y dureza del material también cambian. La característica de que este material sea especialmente flexible lo convierte en uno de los más difíciles a la hora de imprimir, ya que puede obstruir el extrusor si no se tiene la configuración de parámetros adecuada. Por otro lado, en cuanto a la temperatura de fusión de este material se encuentra en un rango entre 220°C y 250°C y no se requiere de una plataforma de impresión calentada. El filamento es capaz de soportar temperaturas ambientales de hasta 80°C y es resistente impactos y a muchos productos químicos, cosa que lo hace una de las mejores opciones para la impresión 3D. [7]

- Filamento Nylon:

El Nylon es un polímero que posee átomos de fibra de carbono o fibra de vidrio. Es un material especialmente resistente, duradero e ideal para objetos que deban soportar estrés mecánico. De hecho, el Nylon comparado con otros materiales, como el ABS, ofrece tres veces más de prestaciones mecánicas. Además, su elevada resistencia al desgaste y su excelente adhesión de capa a capa lo hace una opción ideal para la fabricación de repuestos industriales bajo demanda.

Al ser un material termoplástico, el Nylon tiene una temperatura de fusión en un rango entre 260°C y 280°C y es necesario que la base de impresión esté calentada para una buena adherencia del material en la camilla de impresión.

Además, el Nylon es un material extremadamente higroscópico, es decir, que absorbe fácilmente la humedad del aire. De esta manera, es necesario almacenar adecuadamente el filamento e incluso utilizar un secador para evitar que se debilite el material. Por otro lado, la propiedad higroscópica ofrece la ventaja de hacer que absorba fácilmente el agua permitiendo que sea uno de los materiales más fáciles de pintar. [9]

- Filamento Electrifi Multi3D:

Electrifi Multi3D es el único filamento de impresión 3D que es considerado buen conductor. Este filamento es básicamente un PLA que en su composición contiene polvo de cobre que lo hace altamente conductor de la electricidad, ofreciendo muy poca resistencia. El material tiene una resistividad de  $0.006\Omega/\text{cm}$ , mucho menor que cualquier filamento elaborado a base de carbono y grafeno. En cuanto a las características de impresión, el filamento tiene una temperatura de fusión que varía dentro del rango de  $160^{\circ}\text{C}$  y  $180^{\circ}\text{C}$ , con una placa de impresión a  $25^{\circ}\text{C}$  (temperatura ambiente).

Este material se puede usar para fabricar diversos tipos de circuitos impresos personalizados, componentes, antenas y filtros de radiofrecuencia, etc. [10]

Por otro lado, cabe destacar que dentro de la impresión FDM existen diversos tipos de máquinas que buscan alcanzar diferentes resultados según el funcionamiento de ellas. Estas se pueden clasificar en cuatro tipos distintos: cartesianas, deltas, polares y cinta transportadora. [11]

- Impresoras cartesianas:

Es el tipo de impresora FDM más común que hay en el mercado. Este tipo de impresora utiliza un sistema de coordenadas cartesiano que consiste en tres ejes ortogonales que se utilizan para determinar hacia dónde y cómo se debe mover el cabezal de extrusión. Normalmente la cama de impresión será la encargada del eje Z y el extrusor se sitúa sobre el eje X e Y.

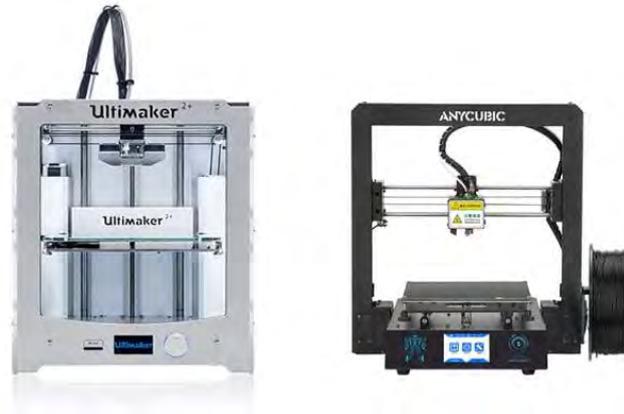


Figura 2. Impresora FDM cartesiana. [12]

- Impresoras deltas:

Este estilo de impresora trabaja también con coordenadas cartesianas, y posee una cama de impresión circular y estática sobre la que se sitúa el extrusor con una configuración triangular, y por esto se les denomina delta. La limitación de estas máquinas queda definida por el diámetro de la base y la altura de los brazos, sin embargo, cada uno de los tres brazos puede moverse en cuatro direcciones: izquierda derecha, arriba y abajo.



Figura 3. Impresora FDM delta. [13]

- Impresoras polares:

Este tipo de máquinas utiliza las coordenadas polares para imprimir. La principal ventaja que ofrecen es que pueden funcionar solo con dos motores, mientras que las cartesianas y deltas necesitan tres motores, cada uno de ellos para un eje. En ellas la cama de impresión es redonda y se mantiene girando mientras que el cabezal de impresión se mueve hacia arriba, abajo, izquierda o

derecha. Al tratarse de una superficie que da vueltas, es la opción perfecta para piezas con forma de espiral. Sin embargo, la desventaja de este tipo de máquinas es la precisión ya que al girar de forma circular existe más precisión en el centro que en la zona externa.



Figura 4. Impresora 3D polar. [14]

- Impresoras de cinta transportadora:

Este tipo de impresora permite la impresión continua de piezas y sin necesidad de supervisión. En ella, la cinta calentada, que actúa como la placa de construcción se va moviendo a medida que las piezas se imprimen, y posteriormente avanzan hasta desprenderse automáticamente de la cinta. Además, al inclinar la cama 45 grados, la parte posterior del objeto podrá avanzar mientras la impresora todavía este imprimiendo en la cinta. Esto ofrece una gran ventaja que las otras impresoras no poseen, y es poder imprimir piezas con un tamaño mayor a la superficie de impresión de la propia máquina, ya que la cinta transportadora hace que el eje Z sea teóricamente infinito. [15]



Figura 5. Impresora FDM cinta transportadora. [15]

### 2.2.2. ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA)

La estereolitografía se considera como el origen de los procesos de impresión 3D, con el primer equipo patentado en 1984 por Charles Hull y la primera máquina comercial desarrollada por 3D Systems en 1988. Esta tecnología consiste en un proceso de impresión 3D por “fotopolimerización en tanque” en la que se vierte una resina líquida y fotosensible en un contenedor o tanque donde la luz UV interactúa con la resina para polimerizarla (endurecerla o solidificarla) de forma selectiva hasta convertirla en plástico endurecido. La principal ventaja de esta tecnología es la calidad de impresión de los objetos, obteniendo un acabado limpio, liso y preciso donde no se diferencian las distintas capas de la pieza. Sin embargo, entre sus inconvenientes cabe destacar que el precio de las resinas es mayor que el de los filamentos termoplásticos y, además, los objetos impresos se pueden deteriorar si se exponen a menudo a la luz solar debido a la naturaleza fotosensible de las resinas. El funcionamiento detallado de esta técnica es el siguiente:

Se requiere del archivo digital en 3D con la figura a imprimir, después será convertido a formato STL, y a través de un software que actúa como “*slicer*” se realiza un corte del modelo en capas delgadas de impresión de un espesor determinado. En el proceso de impresión el rayo láser barre la superficie de la resina líquida de acuerdo con el modelo 3D digital suministrado a la impresora. Una vez que la primera capa de material esté solidificada, la plataforma desciende un nivel. Este nivel corresponde al grosor de una capa de impresión, y de esta manera, se repite el proceso para las siguientes capas debido a que hay tantos ciclos de impresión como capas necesarias para obtener el volumen completo de la pieza. En esta técnica, el valor típico de la altura de capa es entre 50 y 150 micras, por lo que se trata de una tecnología capaz de crear objetos con mayor resolución y precisión. Cabe destacar también que al igual que en la tecnología FDM, la estereolitografía necesita el uso de soportes en el proceso de construcción para sujetar los voladizos cuando se imprimen formas complejas.

Después de terminar la impresión, se pasa a la etapa de posacabado ya que las piezas requieren un lavado en alcohol isopropílico para eliminar la resina sin curar de su superficie. Después de secarse, tras el lavado, algunos materiales requieren un poscurado que es un proceso que ayuda a las piezas a alcanzar su máximo grado de

resistencia y estabilidad. Por último, se retiran los soportes y se lijan las marcas que dejan para obtener un acabado limpio. [16]

En la tecnología SLA existen dos métodos diferentes de impresión: “de abajo arriba” o “de arriba abajo”.

Inicialmente se diseñó con el método “de abajo arriba” donde la fuente de luz irradia la resina desde la parte inferior del tanque. La primera capa está en la base del tanque, mientras que la placa de construcción se desplaza hacia arriba a medida que se solidifican las capas. Con este método las piezas emergen del tanque invertidas y posee la gran ventaja de que las dimensiones de la pieza no serán un factor limitante a la hora de la impresión, debido a que la placa de construcción se puede ir elevando según las capas que contiene el objeto hasta llegar al límite del eje vertical.



Figura 6. Tecnología SLA de abajo arriba. [17]

Por otro lado, existe el método “de arriba abajo” donde la fuente de luz se coloca sobre el tanque de resina, por lo que se endurece la superficie en lugar de la base. La placa de construcción se mueve hacia abajo según la altura de capa para dejar espacio para construir nuevas capas sobre las anteriores hasta completar la fabricación del objeto completo. Con este método las dimensiones del objeto están limitadas al tamaño del tanque.

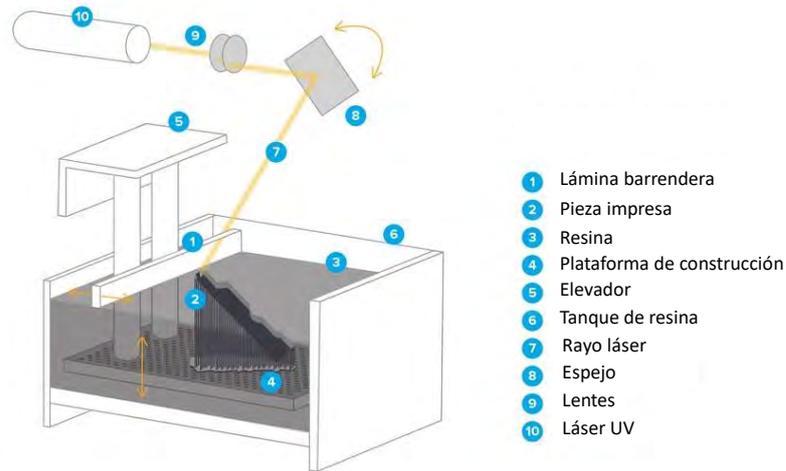


Figura 7. Tecnología SLA de arriba abajo. [17]

Actualmente, la estereolitografía incluye otras tecnologías como el DLP (*Digital Light Processing*) y la MSLA (*Mask Stereolithography*) que tienen ciertas diferencias con respecto al SLA. [18]

- DLP:

La tecnología DLP es una técnica de fabricación que se basa en la estereolitografía con la diferencia de que la fuente de luz es un proyector, no un láser. De manera que las impresoras SLA láser van trazando capas de impresión punto a punto, mientras que las impresoras DLP endurecen la capa inmediatamente con un único rayo de luz, presentando una mayor velocidad de impresión.

En el proceso de impresión la luz se refleja en un dispositivo de microespejos digitales (DMD) dispuestos en una matriz sobre un chip semiconductor, y al alternar rápidamente estos pequeños espejos entre las lentes que dirigen la luz hacia el fondo del tanque, se definen las coordenadas donde la resina líquida se cura en una determinada capa. Dado que la fuente de luz es un proyector con pantalla digital, la imagen de cada capa está compuesta por píxeles cuadrados que dan como resultado una capa tridimensional formada por pequeños ladrillos rectangulares denominados vóxeles.

- MSLA:

La tecnología MSLA es una técnica de fabricación basada también en la estereolitografía que utiliza una fuente de luz compuesta por una matriz de diodos LED ultravioleta (UV). De manera que emite la luz UV a través de una pantalla LCD (*Liquid Crystal Display*) que actúa como máscara. Esta máscara está compuesta por píxeles cuadrados que actúan bloqueando o dejando pasar el haz de luz dependiendo de la forma de la estructura. De esta manera, la pantalla LCD proyecta las capas de la pieza a imprimir permitiendo que la luz emitida por la matriz de LEDs atraviese solamente las capas de resina a solidificar.

Esta técnica supone una mejora con respecto a las impresoras SLA tradicionales, ya que la incorporación de las pantallas LCD de reducido coste suponen una gran ventaja y, además, se reducen los tiempos de impresión, ya que cada vez se expone una capa completa a la luz UV en lugar de ir trazando las capas punto a punto como se hacía en la impresión SLA tradicional. [19]

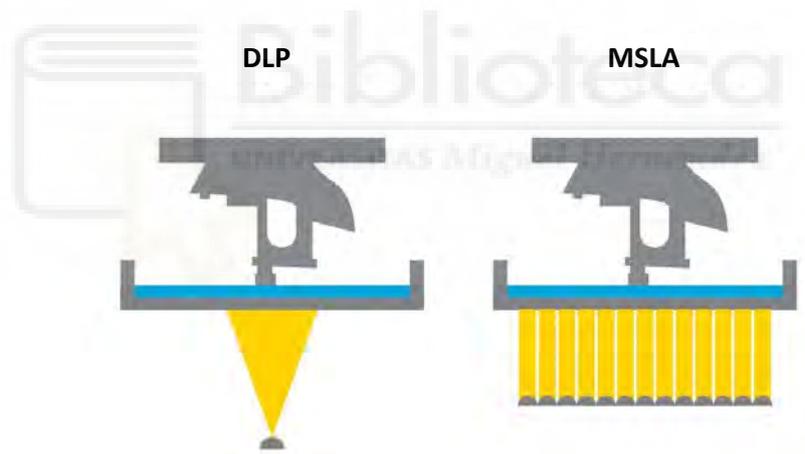


Figura 8. Comparativa entre DLP y MSLA según la fuente de luz. [20]

### 2.2.3. SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR LÁSER (SLS)

El sinterizado selectivo por láser es una tecnología de fabricación que utiliza láser de gran potencia para sinterizar pequeñas partículas de polímero en polvo y convertirlo en una estructura sólida a partir de un modelo 3D. Esta técnica de fabricación requiere de un proceso más largo para la impresión de piezas, sin embargo, es la mejor opción para fabricar productos especialmente resistentes. El funcionamiento detallado de esta técnica es el siguiente:

El polvo se dispersa como una capa delgada encima de una plataforma que está dentro de la cámara de impresión. La impresora precalienta el polvo hasta una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del material para facilitar que el láser aumente la temperatura en zonas específicas donde debe solidificar el polvo. Este proceso funde las partículas y las une de forma mecánica. A continuación, la plataforma desciende una altura de capa, normalmente entre 50 y 200 micras, y se repite el proceso capa a capa hasta completar la pieza. Por otro lado, el polvo que queda sin fundir sirve como soporte para la pieza durante el proceso de impresión eliminando la necesidad de incluir expresamente los soportes como ocurría en las otras tecnologías.

Después del proceso de impresión, la cámara de impresión debe enfriarse ligeramente dentro del recinto de impresión y, después, fuera de la impresora. De esta manera se aseguran unas propiedades mecánicas óptimas y se evita la deformación de las piezas.

Por último, en el posacabado se retiran las piezas terminadas de la cámara de impresión, se separan y se limpia el exceso de polvo adherido al objeto. Este polvo se puede reciclar y la pieza puede ser pulida para un acabado óptimo y completo.

El material más común para el sinterizado selectivo por láser es el Nylon, un termoplástico disponible en filamento y en polvo, ideal para ensamblajes complejos y piezas duraderas con una alta estabilidad ambiental. Las piezas de Nylon impresas en 3D mediante SLS son resistentes a la radiación UV, a la luz, al calor y a la humedad.

[21]

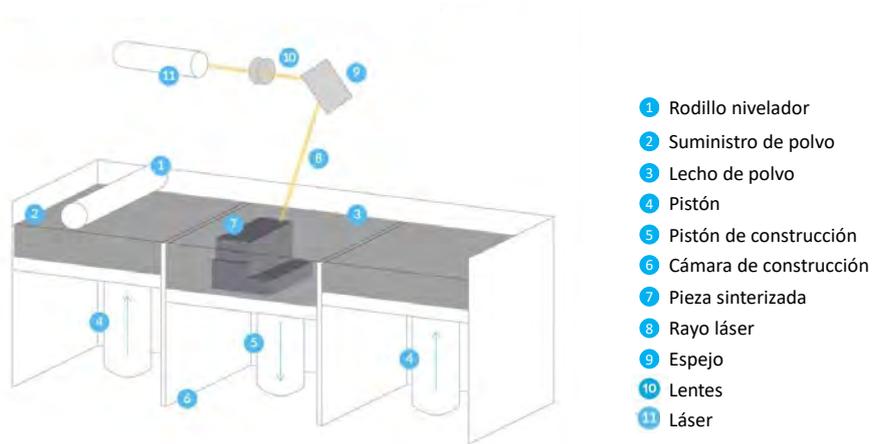


Figura 9. Tecnología de impresión SLS. [22]



## CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

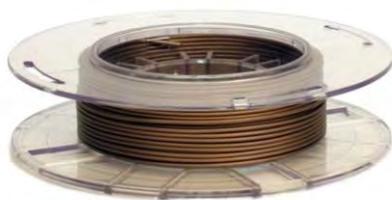
En este capítulo realizaremos una descripción de todos los materiales que se han empleado para llevar a cabo este proyecto, incluyendo tanto los equipos físicos de laboratorio como los programas software utilizados. Además, se explicarán también los procedimientos y métodos que se han seguido en la elaboración de este Trabajo Fin de Grado.

### 3.1. INSTRUMENTOS DE FABRICACIÓN

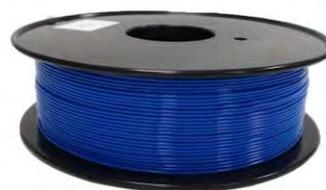
En este apartado describiremos y explicaremos cada uno de los instrumentos o herramientas físicas de fabricación que se han empleado para la realización de este proyecto. Las herramientas utilizadas son las siguientes:

#### 3.1.1. IMPRESORA 3D

La impresora que vamos a emplear en este proyecto es el modelo BQ Hephestos. Este tipo de impresoras 3D forma parte de los kits de impresora de coste reducido a cambio de montarlo y calibrarlo. Esta máquina de impresión se basa en la tecnología FDM, de manera que se necesita un filamento de material que se irá depositando capa a capa hasta conformar la pieza completa (explicación completa en el apartado 2.2.1). Los materiales que utilizaremos en este proyecto serán el filamento conductor Electrifi de Multi3D y el PLA cuyas características hemos detallado también en el apartado 2.2.1.



(a)



(b)

Figura 10. (a) Bobina de Multi3D. (b) Bobina de PLA. [23]

La máquina es una impresora ligera de aproximadamente 15kg con dimensiones alrededor de 460 x 383 x 430mm (Alto x Ancho x Profundidad). Su volumen de impresión está limitado a las dimensiones de la cama de impresión que es de 215 x 210 x 180mm. El diámetro del filamento puede ser de 1.75mm o 2.85mm según la boquilla del extrusor, aunque en nuestro caso solamente utilizaremos filamentos de diámetro igual a 1.75mm con una boquilla de 0.4mm. En cuanto a la resolución del eje Z, tiene una altura de capa mínima de 60 micras. La velocidad máxima de impresión está entre 80-100mm/s, pero la recomendada está entre 40-60mm/s. Por último, para la conectividad posee un lector de tarjeta MicroSD estándar y un puerto micro-USB tipo B con admisión de archivos en formato “.gcode” elaborados en entornos de “Slicer” similares a Cura Software, siendo compatibles los siguientes sistemas operativos: Windows XP y superiores, Mac OS X y superiores, Linux.

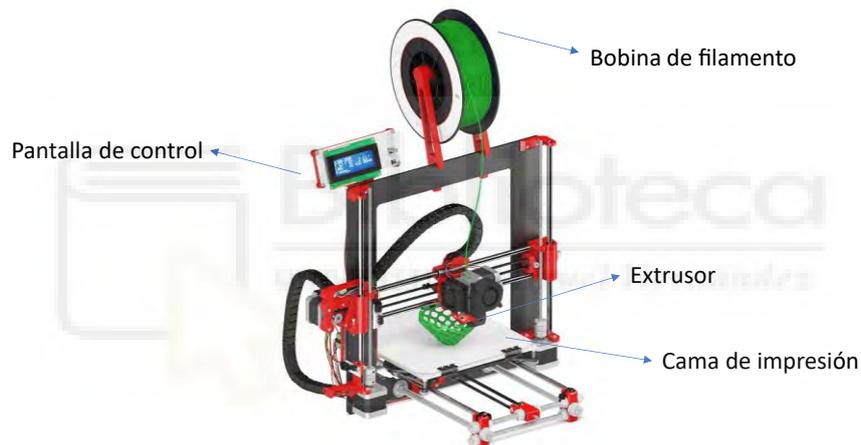


Figura 11. Impresora 3D modelo BQ Hephestos. [24]

### 3.1.2. FRESADORA

La fresadora es una máquina o herramienta multitarea diseñada para el mecanizado de piezas de diversos materiales. Esta máquina está compuesta por distintas fresas, donde cada una de ellas tiene una función determinada, por ejemplo: grabar, desbastar, perforar, cortar o detallar un determinado material.

En nuestro proyecto necesitamos fabricar unos circuitos de Test con material FR4. Normalmente este proceso se realiza utilizando la técnica clásica de insolación donde la máquina insoladora ilumina el fotolito de la imagen (que en nuestro caso contiene los

circuitos de Test) para copiarlo en la superficie fotosensible (la placa de material FR4). Posteriormente se lleva a cabo el revelado que consiste en diluir sosa cáustica en agua y sumergir la placa insolada hasta que se muestren claramente las pistas de nuestro circuito y después, sacamos la placa y la enjuagamos con abundante agua. Por último, debemos realizar el ataque químico de agua fuerte y agua oxigenada que será el encargado de eliminar el cobre de la placa salvo en los lugares protegidos por la capa de material fotosensible.

Después de todo el proceso, en el último paso nuestras placas se dañaron debido a la dificultad de controlar el ataque químico ya que se “come” parte del cobre de las pistas de nuestro circuito, produciendo cortes o discontinuidades en las líneas.

Es por esto por lo que recurrimos a la técnica del fresado, ya que tiene una gran precisión a la hora de dibujar las pistas, cortar las placas con las dimensiones exactas y realizar los agujeros con el diámetro determinado. Sin embargo, como desventaja podríamos destacar que esta fresadora utiliza un software complejo, ya que se trata de un modelo de fresadora antiguo que funciona con Windows 98, por lo que hay que realizar diversas transiciones del archivo que contiene el circuito a fabricar. El proceso de elaboración de las placas es sencillo y rápido: en primer lugar, realizamos en ADS el *Layout* donde están diseñados los circuitos de Test, ya que este archivo es el que utiliza la fresadora para fabricar las placas. Posteriormente posicionamos el sustrato de FR4 sobre la superficie de la fresadora y finalmente, vamos cambiando las fresas según la actividad que corresponda realizar.



Figura 12. Máquina fresadora. [25]

### 3.1.3. GALVANOPLASTIA

La galvanoplastia es una técnica que consiste en un baño de sulfato de cobre con una estructura de cobre conectada al ánodo de una fuente de alimentación. En ella el circuito estará sumergido casi por completo en la solución y conectado al cátodo de la fuente de alimentación. Posicionaremos el recipiente donde está contenida la solución sobre un agitador magnético que mantendrá la solución en continuo movimiento para que se deposite el cobre de manera uniforme por toda la superficie de las líneas. Esto hará que el cobre se vaya depositando sobre la estructura donde tenemos conectado el cátodo hasta tener nuestros circuitos completamente metalizados.

Este proceso se realiza con el objetivo de reducir la resistividad del circuito hasta que sea igual a la del cobre que es de  $0.1\Omega$ , y de esta manera, tendremos unas líneas con mayor conductividad que ofrecerán mejores resultados.

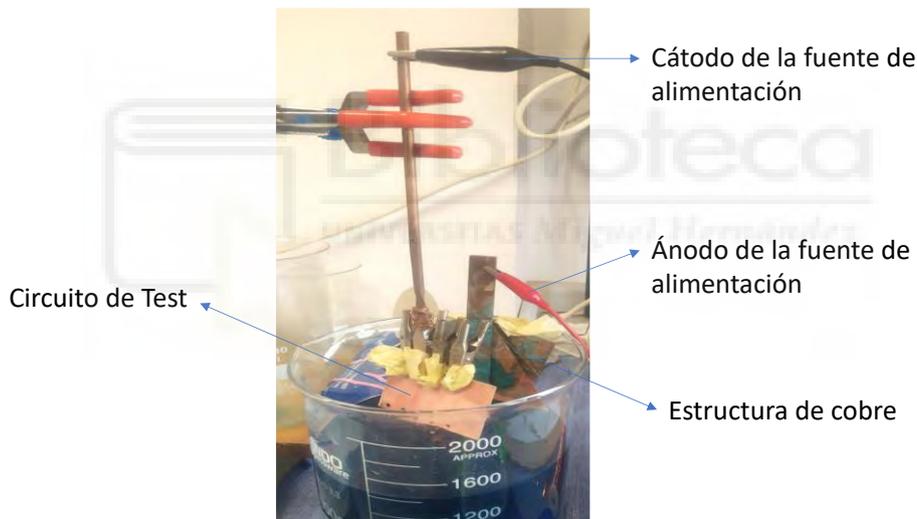


Figura 13. Proceso de galvanoplastia.

- Galvanoplastia de espigas:

La galvanoplastia de espigas es una técnica alternativa a la galvanoplastia tradicional que hace uso de un “GalvanoPen” que permite una deposición rápida ya que se realiza una creación parcial y selectiva de capas en pequeñas superficies.

Esta técnica utiliza un Kit que posee un “GalvanoPen” de grafito con su correspondiente filtro, un bloque de alimentación y conectores. Se trata de un kit

completo, económico y de fácil adquisición y uso tanto para entidades como para particulares.

Para el proceso de metalización se tomará el “GalvanoPen” de grafito al que se coloca el filtro que está humedecido con sulfato de cobre. Este pincel se conectará a la fuente de alimentación con 2 voltios, y para metalizar las líneas se colocará el cable de masa en la línea deseada a la vez que se aplican leves movimientos con el boli para que se deposite el cobre de manera uniforme por la superficie de las líneas.

La galvanoplastia de espigas ofrece la ventaja de metalizar de manera selectiva, cosa que en la galvanoplastia tradicional no ocurre ya que se introduce la pieza completa en la solución. Además, es más fácil de controlar ya que somos nosotros los que movemos el pincel para depositar las capas necesarias. [26]



Figura 14. Proceso de galvanoplastia de espigas. [26]

### 3.2. INSTRUMENTOS DE MEDIDA

En este apartado describiremos los instrumentos de medida que se han empleado para la realización del proyecto. Los instrumentos utilizados son los siguientes:

### 3.2.1. DINO\_CAPTURE 2.0

Es un software profesional que controla un microscopio electrónico mediante USB. Debido al elevado número de aumentos que posee, permite de medir con gran precisión las dimensiones de las líneas de un circuito, visualizar el estado de las pistas y guardar las capturas de fotografías con la opción de incluir texto en las imágenes.



Figura 15. Microscopio electrónico DinoCapture 2.0. [27]

### 3.2.2. ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES (VNA)

Para realizar las medidas de los circuitos fabricados utilizaremos el VNA (*Vectorial Network Analyzer*) modelo E8363B de Keysight. Este instrumento suele emplearse frecuentemente en sistemas de radiofrecuencia (RF), posee dos puertos y es capaz de realizar barridos de frecuencia desde 10MHz hasta 40GHz. Estos dos puertos corresponden al puerto de entrada y salida, y con ellos se miden los parámetros S de reflexión y transmisión que hacen referencia a la potencia reflejada ( $S_{11}, S_{22}$ ) y la potencia transmitida de un puerto a otro ( $S_{21}, S_{12}$ ).

Antes de realizar las medidas de los circuitos, hay que calibrar el dispositivo para que los resultados sean correctos y precisos. Para ello, utilizamos el kit de calibración SOLT (*Short-Open-Load-Thru*). Para empezar, colocamos en el puerto de entrada un cortocircuito (short), un circuito abierto (open) y una carga de  $50\Omega$  (load) para calibrar las señales reflejadas entre los puertos. A continuación, colocamos una red de conexión (thru) entre el puerto de entrada y salida para calibrar las señales transmitidas.

Después de realizar una correcta calibración del dispositivo, debemos colocar los conectores SMA en los circuitos que se desean medir, que a su vez irán unidos con los terminales de los puertos del VNA. Los resultados de la medición quedan guardados en un archivo de formato S2P que posteriormente podemos abrir, visualizar y analizar en el programa ADS.

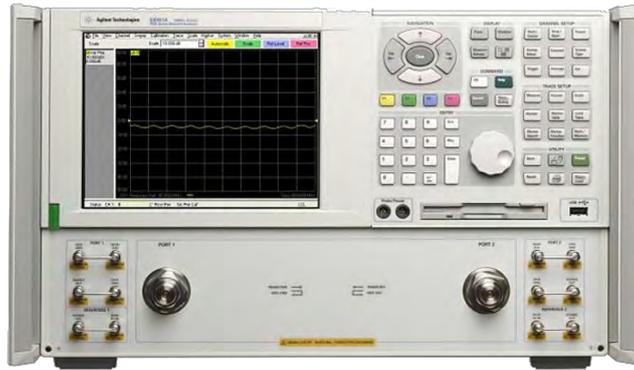


Figura 16. Analizador vectorial de redes (VNA). [28]

### 3.3. PROGRAMAS SOFTWARE

En este apartado describiremos cada uno de los programas utilizados para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto. Estos programas son lo que nos permiten diseñar los circuitos, realizar las simulaciones para determinar su comportamiento, visualizar los resultados, etc. Los programas utilizados son los siguientes:

#### 3.3.1. ADVANCED DESIGN SYSTEM (ADS)

Es un programa de diseño y simulación electromagnética (EM) de circuitos que dispone de dos tipos de ventanas diferentes: el *Schematic* que contiene las librerías y es donde se conectan los componentes de la forma deseada y sobre el que se realizan análisis y simulaciones, y el *Layout* que es donde se observa el formato que tendrá el circuito sobre la placa.

En este proyecto utilizaremos las dos ventanas de trabajo, ya que en la primera diseñaremos el modelo circuital con los componentes determinados y realizaremos las

simulaciones para comprobar el comportamiento y la respuesta de los circuitos. Por otro lado, en cuanto a la segunda ventana, la utilizaremos para diseñar el *Layout* que posteriormente imprimiremos sobre nuestras placas.

### 3.3.2. EMPRO

Este software, a diferencia de ADS, permite crear estructuras de tres dimensiones (3D) y realizar su respectiva simulación electromagnética. El programa contiene diversas funciones avanzadas, herramientas y formas geométricas para diseñar estructuras complejas en 3D.

Además, permite la opción de importar archivos CAD de otros entornos, de manera que podemos importar el *Layout* de ADS y modificar sobre él las características necesarias, como por ejemplo: espesor de cada capa, propiedades del material utilizado, etc.

En nuestro caso lo utilizaremos para fabricar las placas de Test de material PLA y las estructuras periódicas (EBG), de manera que en él crearemos la pieza en tres dimensiones y añadiremos las características del material junto con los espesores y las posiciones de los agujeros para colocar los conectores SMA. A continuación, realizamos la simulación electromagnética y si los resultados son correctos, importamos los objetos a Cura 3D para imprimirlos en la máquina 3D.

### 3.3.3. ULTIMAKER CURA 3D

Este programa actúa como una interfaz que hace de intermediario entre el software CAD y la impresora. Su función será transformar el modelo 3D diseñado (.stl) en el lenguaje que utiliza la máquina 3D.

Este software conocido como “*Slicer*” ya que divide la figura en varias partes, dándole forma de capas o “rebanadas”, y para cada una de ellas calcula los movimientos que debe hacer el cabezal para rellenar cada área. En él se configuran los distintos parámetros de impresión según el material empleado, y finalmente, convierte el diseño en el lenguaje máquina que será interpretado por la máquina 3D.

#### 3.3.4. FREECAD

Se trata de una aplicación de diseño asistido por computadora en dos y tres dimensiones, y se utiliza para diseñar y crear cualquier objeto en 3D. El objeto resultante del diseño es también un archivo CAD que se debe importar a Cura 3D para ser impreso.

En este proyecto lo utilizaremos para crear diversas figuras (mayormente líneas de transmisión simples) con el fin de ajustar los parámetros de impresión del filamento conductivo, ya que nunca se ha utilizado y por lo tanto se desconocen los parámetros de impresión. Además, será bastante útil para realizar diversas pruebas de diseños de manera rápida.



## CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DEL FILAMENTO CONDUCTOR MULTI3D

En este capítulo trataremos de caracterizar el filamento conductor Electrifi Multi3D. Para ello, en primer lugar, diseñaremos en el programa ADS los circuitos de Test simples (formados por una línea de transmisión y dos resonadores de distinta longitud). En estos circuitos de prueba la línea de transmisión nos permitirá calcular la tangente de pérdidas del material, y los resonadores de distinta longitud nos permiten calcular la permitividad relativa a dos frecuencias distintas. Fabricaremos cuatro placas distintas:

1. Placa con Cobre en la superficie superior e inferior.
2. Placa con Cobre en la superficie superior y Multi3D en la superficie inferior.
3. Placa con Multi3D en la superficie superior y Cobre en la superficie inferior.
4. Placa con Multi3D en la superficie superior e inferior

La primera se utilizará para caracterizar el sustrato FR4, y las tres restantes servirán para determinar la conductividad del filamento.

Para cada una de estas placas realizaremos un proceso de fresado, impresión 3D, metalización y medida donde se comparará con la simulación y se sacarán conclusiones.

### 4.1. DISEÑO EN ADS DE LOS CIRCUITOS DE TEST

En este apartado trataremos de diseñar los circuitos de Test que nos permitirán caracterizar el sustrato FR4 y posteriormente calcular la conductividad del filamento conductor Multi3D.

Nuestra placa FR4 tiene dimensiones 100mm x 140mm, dado que necesitaremos 4 placas de este mismo sustrato, cada una de ellas tendrá dimensiones de 40mm x 60mm. De manera que deberemos diseñar y calcular el ancho de la línea y de ambos resonadores utilizando la herramienta *LineCalc* del programa ADS, suponiendo los terminales de entrada/salida de  $50\Omega$  (ohmios), la constante dieléctrica  $\epsilon_r = 4.4$  y la tangente de pérdidas  $TanD = 0.02$ . Finalmente, teniendo en cuenta las anteriores variables que definen nuestro sustrato FR4, obtenemos un ancho de línea  $W=0.8\text{mm}$ .

A continuación, realizaremos el modelo circuital que estará conformado por una línea de transmisión, un primer resonador de longitud 10mm y un segundo resonador de longitud 15mm.

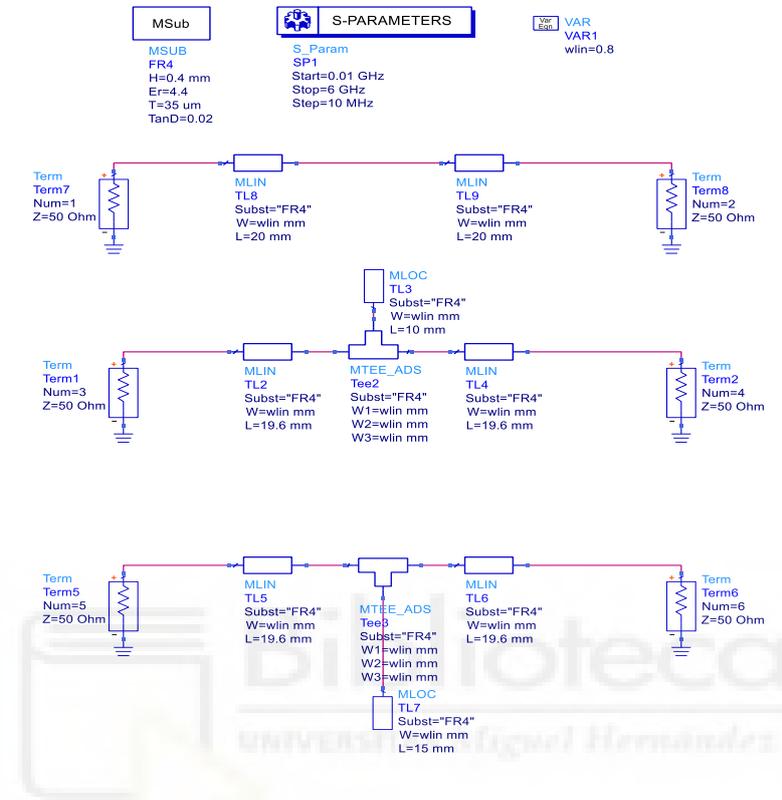


Figura 17. Esquemático en ADS de los circuitos de Test.

Una vez realizado el circuito, lo simularemos y obtendremos el *Layout* correspondiente donde posicionaremos y alinearemos los tres componentes que conforman nuestro circuito de Test.

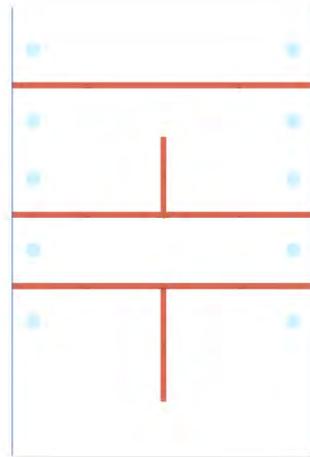


Figura 18. Layout en ADS del diseño de los circuitos de Test.

Como podemos ver en la Figura 18, además de los tres componentes también hemos incluido en el *Layout* los agujeros para los conectores SMA que se utilizarán para medir con el VNA. Los hemos posicionado teniendo en cuenta las dimensiones exactas que figuran en el DataSheet del fabricante, ya que de esta manera podremos realizar los agujeros con facilidad y posicionar los conectores con más seguridad. Por último, también hemos incluido un rectángulo con dimensiones 40mm x 60mm que nos ayudará a posicionar de forma más exacta los circuitos de Test en el sustrato de FR4, y permitir que la fresadora corte las distintas placas con las dimensiones exactas.



Figura 19. Conector SMA modelo 292-04A-6. [29]

## 4.2. FABRICACIÓN DE LOS SUSTRATOS

El proceso de fabricación de los sustratos se realizará mediante el uso de una fresadora. Para ello, en primer lugar, posicionaremos nuestra placa FR4 pegándola con cinta de doble cara. A continuación, el programa de ordenador nos indicará las fresas que hay

que colocar para las distintas funciones: cortar las 4 placas, realizar los agujeros y fresar quitando la capa de cobre de nuestro sustrato. En la siguiente figura podemos ver las 4 placas resultantes.

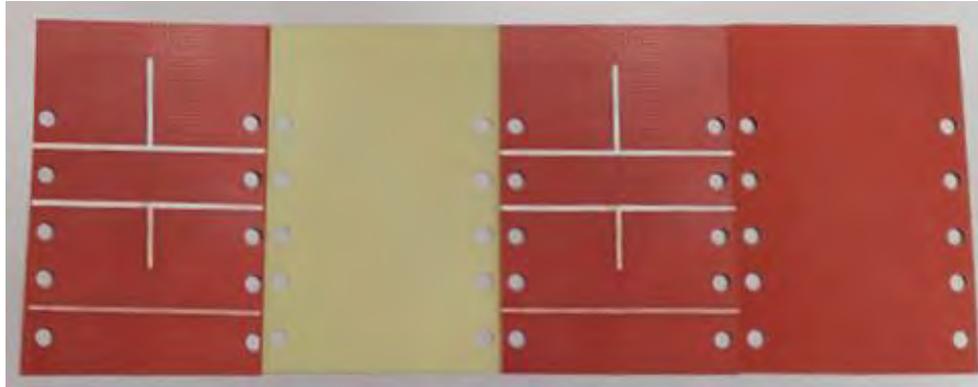


Figura 20. Placas de Test fabricadas mediante la fresadora.

En primer lugar, tenemos una placa formada por Cobre\_Cobre que es la que utilizaremos para caracterizar el material FR4 del sustrato.

En segundo lugar, tenemos una placa virgen que hemos conseguido eliminando el cobre por ambas caras mediante una solución de ácido clorhídrico más agua oxigenada. En esta placa dibujaremos con la impresora 3D utilizando el filamento Multi3D por ambas caras, en la superficie superior tendremos nuestro circuito de Test, y en la inferior el plano de masa (Multi3D\_Multi3D).

En tercer lugar, tenemos una placa con nuestro circuito de Test en la cara superior, y en la inferior dibujaremos el plano de masa con filamento Multi3D haciendo uso de la impresora 3D (Cobre\_Multi3D). Para ello, deberemos eliminar el cobre de la superficie de la cara inferior, que lo haremos mediante una solución de ácido clorhídrico más agua oxigenada también.

Por último, en cuarto lugar, tenemos una placa que contendrá en la cara superior el circuito de Test dibujado con filamento Multi3D en la impresora 3D y en la cara inferior posee cobre (Multi3D\_Cobre)

### 4.3. FABRICACIÓN DE CADA PLACA CON LA IMPRESORA 3D

La primera placa que ya hemos fabricado está compuesta por cobre en ambas caras, y es la que se ha obtenido mediante la fresadora. Esta placa será utilizada para caracterizar el sustrato FR4, es decir, obtener el valor de la constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) y la tangente de pérdidas del material (TanD).

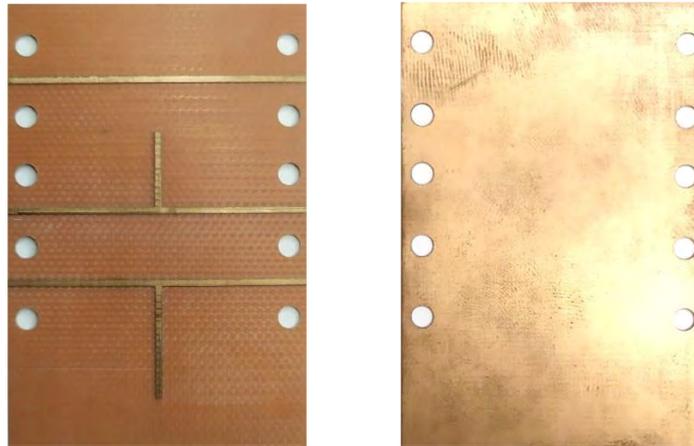


Figura 21. Placa fabricada de Cobre\_Cobre.

A continuación, procedemos a fabricar las tres placas restantes con la impresora 3D utilizando el filamento conductor Multi3D.

Para empezar, deberemos importar al programa de EMPro nuestro diseño del circuito de Test para añadirle unas escuadras en cada uno de los vértices con el fin de posicionar de manera correcta las placas en la superficie de la impresora 3D.

En el programa EMPro, dado que visualizamos la figura en 3 dimensiones, deberemos modificar en primer lugar el espesor (*Thicken Sheet*) de la línea y los resonadores, que en este caso serán de  $400\mu\text{m}$  (micras). Por otro lado, también debemos crear el plano de masa (*Sheet Body*) en la superficie inferior, que también tendrá un espesor de  $400\mu\text{m}$ .

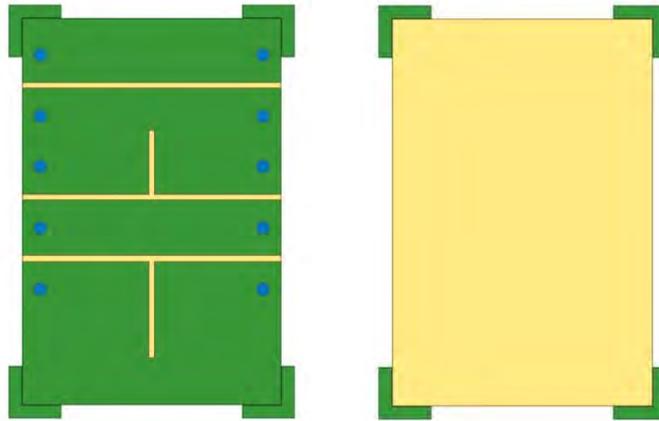


Figura 22. Diseño en EMPro del circuito de Test con escuadras.

Una vez terminado nuestro diseño, en primer lugar, debemos exportar solamente las escuadras en formato Step (.step) al programa FreeCAD que nos permitirá visualizarlo y exportarlo en formato STL Mesh (.stl) para poder abrirlo finalmente en el programa Ultimaker Cura que actúa como interfaz directa generando los archivos gcode que introducimos en la impresora 3D.

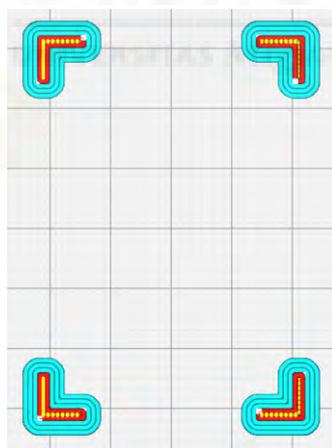


Figura 23. Diseño de las escuadras en Ultimaker Cura.

Una vez tengamos impresas las escuadras, éstas serán la referencia que tomaremos para posicionar la placa en la que desea imprimir con el filamento Multi3D.

A continuación de esto, procederemos a posicionar la placa Multi3D\_Cobre, en la que imprimiremos con filamento Multi3D nuestro circuito de Test, y en la superficie inferior

posee cobre. Para ello, posicionamos la placa en la superficie de impresión que indican las escuadras, y la pegamos con cinta adhesiva de doble cara.

Para imprimir el circuito de Test realizaremos el mismo proceso de exportación de las escuadras, pero en este caso será el circuito de Test que deseamos dibujar con la impresora 3D.

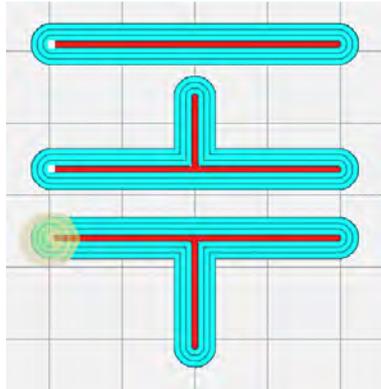


Figura 24. Diseño del circuito de Test en Ultimaker Cura.

En el archivo gcode generado debemos revisar y modificar la altura del eje Z de la impresora 3D con el fin de configurarla para que comience a dibujar en la superficie de nuestra placa de altura  $400\mu\text{m}$ . Por otro lado, hay que tener en cuenta que en la capa inferior hay cobre, sin embargo, después de las pruebas realizadas se ha comprobado que las  $35\mu\text{m}$  del cobre no afectan ya que es un valor bastante pequeño. Empezaremos entonces en un valor de  $0.4\text{mm}$  en el eje Z.

El resultado obtenido ha sido el siguiente:

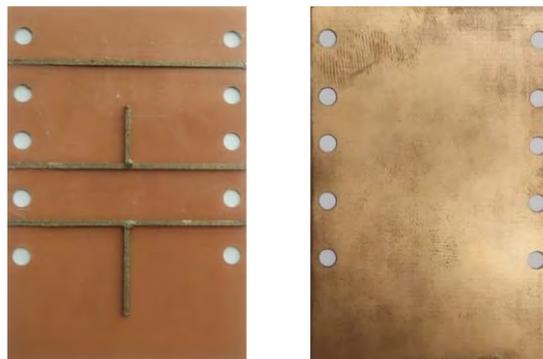


Figura 25. Placa fabricada de Multi3D\_Cobre.

A continuación, procedemos a imprimir la siguiente placa, donde ya tenemos fresado por la parte de arriba el circuito de Test, y mediante la impresora 3D añadiremos el plano de masa con filamento Multi3D.

Para ello, exportaremos el archivo CAD desde EMPro a FreeCAD, y de esta manera obtendremos el archivo stl que podremos visualizar con el programa Ultimaker Cura.

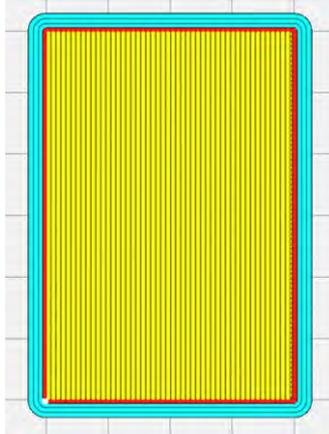


Figura 26. Diseño del plano de masa en Ultimaker Cura.

En este caso, al igual que el anterior, en el archivo gcode establecemos la altura de la primera capa en  $400\mu\text{m}$  en el eje Z de la impresora 3D.

El resultado obtenido de esta placa es el siguiente:

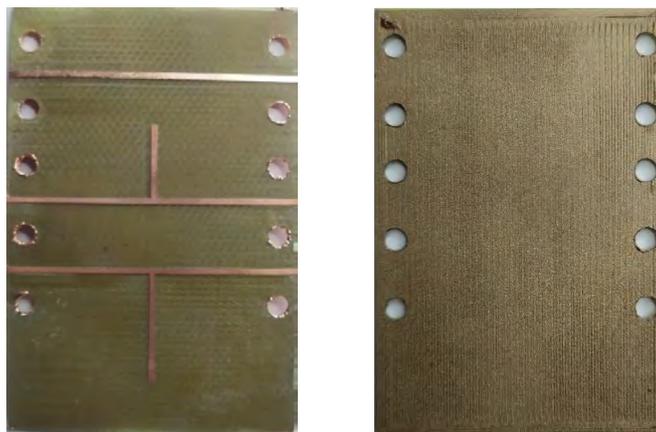


Figura 27. Placa fabricada de Cobre\_Multi3D.

Para terminar, fabricaremos la última placa que contendrá el circuito de Test dibujado con la impresora 3D y el plano inferior de masa también se dibujará con la impresora 3D utilizando el filamento Multi3D. De manera que realizaremos los mismos pasos que en los casos anteriores, primero imprimiremos la superficie superior que contiene el circuito de Test, y posteriormente le damos la vuelta a la placa y la posicionamos para que imprima la capa inferior del plano de masa.

En cuanto a los ajustes del eje Z de la impresora en el archivo gcode, debemos ajustarlo inicialmente a una altura de 0.4, es decir,  $400\mu\text{m}$  que pertenecen al espesor de nuestro sustrato y así dibujaremos nuestro circuito de Test. Una vez impresa la capa superior, debemos modificar la altura del archivo gcode perteneciente al plano de masa, y en este caso, la primera capa comenzará en 0.8, es decir,  $800\mu\text{m}$  ( $400\mu\text{m}$  pertenecen al espesor del propio sustrato y  $400\mu\text{m}$  pertenecen al espesor del circuito de Test dibujado anteriormente).

El resultado obtenido de la última placa es el siguiente:



Figura 28. Placa fabricada de Multi3D\_Multi3D.

#### 4.4. MEDIDA DE LAS PLACAS FABRICADAS

En este apartado realizaremos las medidas de los parámetros S de los componentes que forman nuestro circuito de Test. Para ello, utilizaremos conectores SMA que ofrecen la gran ventaja de medir sin tener que soldar, simplemente se posicionan en los agujeros que están hechos a medida teniendo en cuenta las distancias que se indican en la hoja de

referencia del fabricante. Estos se conectan de manera directa al analizador vectorial de redes del siguiente modelo “*VNA E8363B AgilEnTechnologies 10MHz to 40GHz*”.

Para realizar las medidas del filamento conductor Multi3D, tal y como se indica en *multi3dllc*, es necesario colocar previamente pasta de plata en los extremos del filamento. Esto es debido a que existe una gran resistencia de contacto entre las sondas del multímetro y el filamento, y la pasta de plata mejora la transición y reduce la resistencia de contacto.

De esta manera, nuestra placa queda con la siguiente forma:



Figura 29. Placa fabricada de Multi3D con pasta de plata.

Una vez añadida la pintura de plata, que en nuestro caso es el modelo “*Silver Conductive Paint, circuitworks, CW2205*” debemos esperar a que se seque para poder medir con el multímetro. Cuando hemos medido, se ha podido ver claramente que debido a la pintura la resistencia ha disminuido en gran medida, de manera que la conductividad mejora. Sin embargo, seguimos obteniendo un valor alrededor de  $70\Omega$  que es bastante elevado para el tamaño de las líneas diseñadas (que son bastante cortas, 40mm). De esta manera, los resultados obtenidos en el VNA son bastante malos debido a la baja conductividad del material y las grandes pérdidas de este.

El siguiente paso, con el fin de mejorar la conductividad del filamento Multi3D, lo que se hará será metalizar nuestros circuitos. Esto se hará mediante *electroplating* usando la técnica de galvanoplastia, que consiste en un baño de sulfato de cobre con una estructura de cobre conectada al ánodo de una fuente de alimentación, el circuito estará sumergido en la solución y conectado al cátodo de la fuente de alimentación. Posicionaremos el recipiente donde está contenida la solución sobre un agitador

magnético que mantendrá la solución en continuo movimiento para que se deposite el cobre de manera uniforme por toda la superficie de las líneas. Esto hará que el cobre se vaya depositando sobre la estructura donde tenemos conectado el cátodo hasta tener nuestros circuitos completamente metalizados.

En las siguientes figuras podemos un ejemplo de la forma de nuestras placas una vez ya están metalizadas tanto por la superficie superior como la inferior. Se puede notar que efectivamente sobre el filamento Multi3D se ha depositado una capa de cobre con color rojizo, tal y como se ha explicado anteriormente.

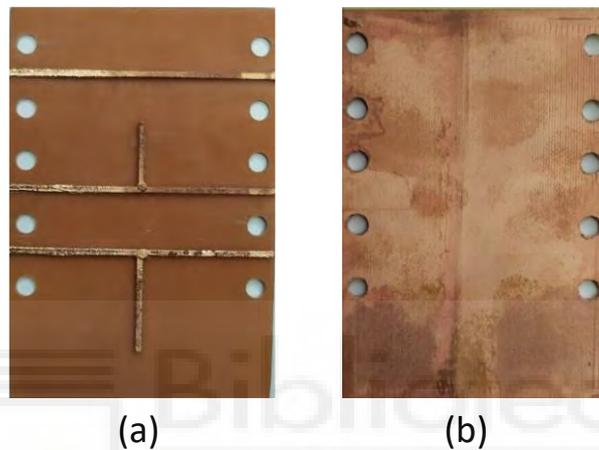


Figura 30. (a) Circuito de Test metalizado. (b) Plano de masa metalizado.

Después, de haber metalizado, se vuelve a medir el circuito y en este caso, los valores de resistencia obtenidos anteriormente se han reducido a la mitad tanto en la línea como en ambos resonadores. De esta manera, la conductividad mejora en gran medida reduciendo las pérdidas. Esto ya nos permite analizar más a fondo los parámetros S de cada circuito en cada una de las placas fabricadas, y así poder sacar conclusiones con respecto a la conductividad del filamento Multi3D.

#### 4.5. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO FR4

En este apartado se tratará de caracterizar el sustrato utilizado para la fabricación de cada una de las placas. Esto se hará ajustando los resultados obtenidos en la medida real del circuito y los resultados obtenidos en la simulación del programa ADS, y así se podrán obtener los valores reales de la constante dieléctrica del material y la tangente de

pérdidas. Este ajuste se hará de manera independiente para cada componente del circuito de Test, es decir, que adecuaremos las variables del material para la línea por un lado y, después, para cada uno de los resonadores de manera individual. Los valores obtenidos de la constante dieléctrica del material y la tangente de pérdidas deben ser bastante similares, sin embargo, se hará una media de los tres valores obtenidos para determinar el resultado final.

Como se ha dicho anteriormente, para la caracterización del sustrato FR4 se utilizará la placa compuesta por Cobre\_Cobre en ambos lados.

#### 4.5.1. LÍNEA DE TRANSMISIÓN

En primer lugar, debemos de tener en cuenta que cuando fabricamos un circuito con la fresadora o la impresora 3D se puede producir una pequeña variación en cuanto a los anchos de las líneas fabricadas, ya que no existe una precisión del 100% de los instrumentos utilizados.

Por ello, para comprobar los tamaños reales fabricados, lo que se hará será medir las dimensiones de la línea con el microscopio electrónico “*DinoCapture 2.0*”.

Como se puede comprobar en la Figura 31 el ancho de la línea no se corresponde con el valor teórico de fabricación de  $W=0.8\text{mm}$ , sino que es  $W=0.805\text{mm}$

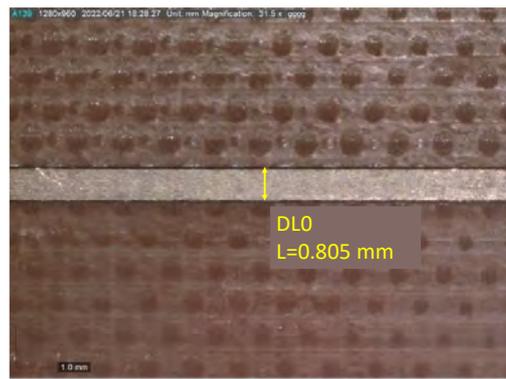
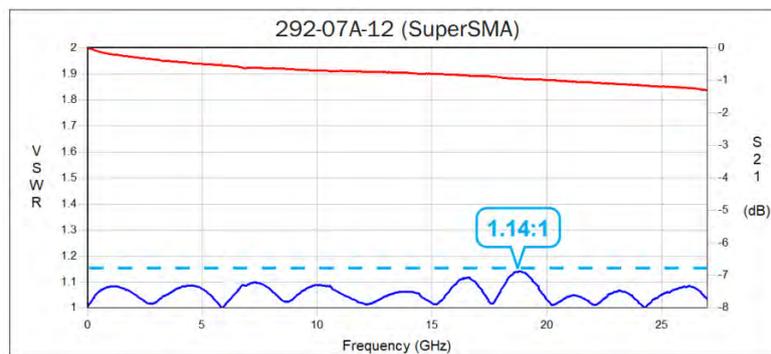


Figura 31. Medición de la anchura de la línea de Cobre\_Cobre con DinoCapture.

Después de haber medido el ancho de la línea de transmisión, hay otro elemento importante que debemos tener en cuenta en las medidas realizadas con los conectores

SMA. Estos conectores de *SouthWest Microwave* son bastante precisos, pero aun así tienen un factor de pérdidas que hay que calcular y añadir en los modelos circuitales.

El comportamiento de estos conectores se representa con la siguiente gráfica que muestra los parámetros de transmisión de un puerto a otro S(2,1) medidos por el fabricante del producto. La curva de color rojo es la que intentaremos simular en el programa ADS variando los valores de atenuación hasta conseguir ajustarla a la que se nos ofrece.



Gráfica 1. Comportamiento de los conectores SMA según el fabricante. [30]

En el programa ADS creamos nuestro prototipo de línea para simular los conectores. En primer lugar, debemos investigar los valores de la constante dieléctrica del material, así como también su tangente de pérdidas. A continuación, debemos calcular el ancho de la línea con la herramienta *LineCalc*, ya que dependerá de las variables que definen el material.

El material utilizado es *VIRGIN PTFE*, y según las indicaciones de la hoja de características del fabricante el valor de la constante dieléctrica es  $\epsilon_r=3.38$  y la tangente de pérdidas  $\text{TanD}=0.0027$ , de esta manera, el ancho de la línea obtenido en *LineCalc* es  $W=0.438400\text{mm}$ .

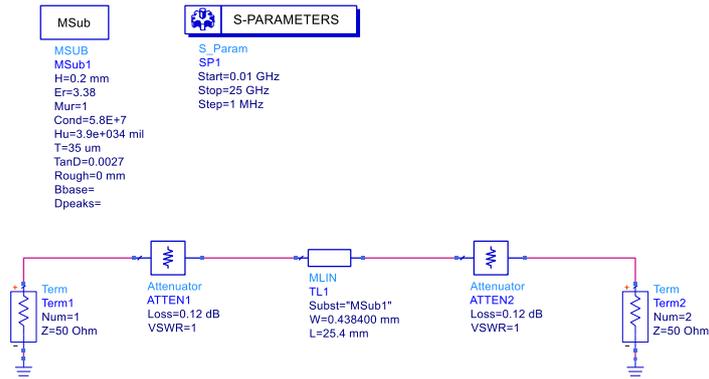
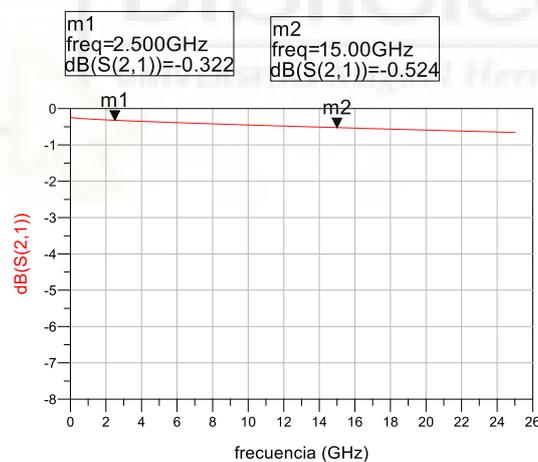


Figura 32. Circuito para simular el comportamiento de los conectores SMA.

Simularemos los parámetros S hasta una frecuencia de 25GHz para obtener un resultado similar al que proporciona el fabricante. Iremos modificando el valor de los atenuadores situados en los extremos de la línea hasta que nuestra simulación se corresponda con la Gráfica 1.

El resultado final de la simulación realizada en ADS es el siguiente:



Gráfica 2. Simulación en ADS de los conectores SMA.

Como se puede ver en la Gráfica 2, hemos posicionado dos marcadores para ajustar los valores de una manera más precisa. El marcador m1 a una frecuencia de 2.5GHz marca un nivel de -0.322dB para cada conector, de manera que tenemos un total de -0.644dB para ambos conectores, que aproximadamente es el valor que indica la gráfica del fabricante. También ocurre lo mismo para el marcador m2 que a una frecuencia de 15GHz presenta un valor de -0.524dB para cada conector, es decir, -1.048dB en total,

mientras que el fabricante muestra -1dB. De esta manera, podemos concluir que nuestra simulación se ajusta bastante a la del fabricante, y concluimos, por lo tanto, que el valor de atenuación que introduce en nuestro circuito cada conector SMA es de 0.12dB. Cabe destacar que la forma que sigue la curva de estos conectores no es perfectamente lineal, aunque para facilitar los cálculos lo hemos considerado así.

Además de las pérdidas, también se introduce un desfase a la entrada y salida del circuito que debemos calcular. Esto se hará ajustando el parámetro S(2,1) de la simulación y medida.

En el programa ADS dibujaremos nuestro prototipo circuital de línea de transmisión incluyendo todos los factores nombrados anteriormente: valor medido del ancho de la línea y pérdidas de los conectores SMA.

El circuito quedará de la siguiente manera:

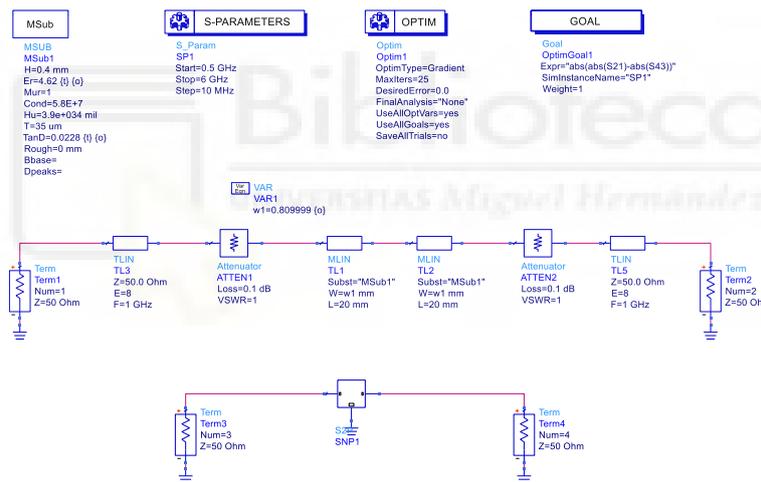


Figura 33. Diseño en ADS de la línea de transmisión de Cobre\_Cobre.

Como podemos ver en la figura anterior, al circuito de la línea de transmisión de longitud 40mm, se le añade el desfase de la entrada/salida y los atenuadores de los conectores SMA. Debajo de ese circuito se encuentra el bloque de tipo S2P en el que tenemos guardada la medida real que se ha hecho con el VNA.

En cuanto a la simulación, configuraremos un rango de frecuencias desde 0.5GHz hasta 6GHz y en las variables del sustrato pondremos inicialmente los valores que nos ofrece

el fabricante:  $H=0.4\text{mm}$  ;  $\epsilon_r=4.4$  ;  $\text{TanD}=0.02$  y la conductividad del cobre que es  $\text{Cond}=5.8\text{E}+7$ .

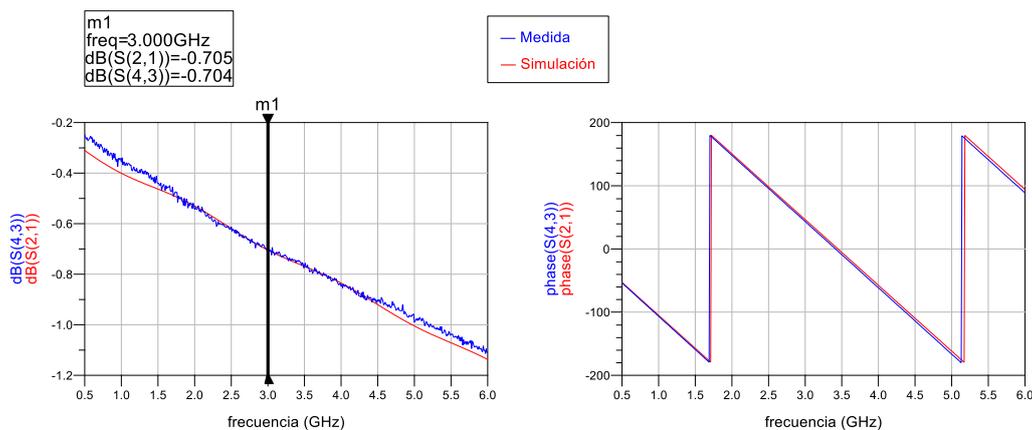
A continuación, añadiremos los bloques de optimización *OPTIM* y *GOAL*, que nos ayudarán a calcular las variables de nuestro circuito mediante un proceso iterativo del gradiente. Este método funciona con el fin de minimizar el error e intentando ajustar los parámetros  $S(2,1)$  en un determinado rango de frecuencias que ha sido configurado en *GOAL*.

En cuanto a las variables a optimizar, se configurarán dos valores límites (mínimo y máximo) entre los que podrá oscilar el valor calculado. Las variables que optimizaremos de nuestro circuito serán el ancho de la línea ( $W1$ ), la constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) y la tangente de pérdidas ( $\text{TanD}$ ). Si después de realizar la optimización, los resultados de simulación y medida siguen desajustados, podremos utilizar además la herramienta del *Tunning* para mejorar el resultado. Con esta herramienta tenemos la posibilidad de ir aumentando o disminuyendo cada variable de forma independiente a medida que observamos como cambia el resultado en la gráfica.

Después de realizar la optimización y los ajustes necesarios, los resultados obtenidos son los siguientes:

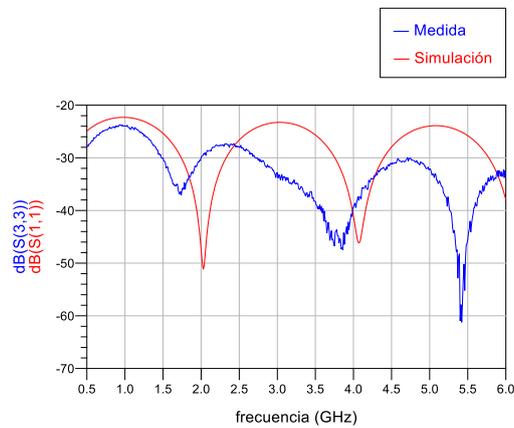
$$\epsilon_r=4.620 ; \text{TanD}= 0.022 ; W1=0.809$$

En las simulaciones representaremos los parámetros de transmisión  $S(2,1)$  y  $S(4,3)$  tanto en dB como la fase. También analizaremos los parámetros de reflexión  $S(1,1)$  y  $S(3,3)$ .



Gráfica 3. Representación de parámetros S de transmisión de la línea de Cobre\_Cobre.

Como podemos ver en las gráficas anteriores, y después de haber realizado los ajustes necesarios, los parámetros de transmisión en el modelo circuital se ajustan a las medidas tanto en dB como en fase. El valor de la fase que ha sido necesario introducir es de 8 grados a la entrada y salida del circuito ( $E=8^\circ$ ).



Gráfica 4. Representación de parámetros S de reflexión de la línea de Cobre\_Cobre.

En la gráfica anterior, podemos ver que nuestro circuito está adaptado, ya que los parámetros de reflexión están por debajo de -10dB. De manera que se comporta efectivamente como una línea de transmisión.

#### 4.5.2. RESONADOR CORTO DE LONGITUD 10MM

En este apartado, procedemos de la misma manera que en el caso de la línea de transmisión. En primer lugar, mediremos las dimensiones reales con el microscopio electrónico “DinoCapture 2.0”. Mediremos la longitud del resonador y también la anchura en 3 puntos distintos para que después podamos hacer una media, ya que el valor del ancho puede variar según donde medimos.



Figura 34. Mediciones del resonador corto de 10mm de Cobre\_Cobre con DinoCapture.

Longitud medida  $L=9.768\text{mm}$  ; Anchura media medida  $W=0.805\text{mm}$

Como se puede ver en las imágenes realizadas con el microscopio, las medidas no se corresponden exactamente con los valores teóricos iniciales que especificamos para la fabricación, donde  $L=10\text{mm}$  y  $W=0.8\text{mm}$

A continuación, implementamos el modelo circuital teniendo en cuenta todas las variables expuestas anteriormente, y finalmente se ajustarán los valores de medida y simulación para caracterizar el sustrato FR4.

En este caso las variables que tenemos que optimizar serán el ancho de la línea ( $W1$ ), la longitud del resonador ( $L1$ ), la constante dieléctrica del material ( $\epsilon_r$ ) y la tangente de pérdidas ( $\text{TanD}$ ).

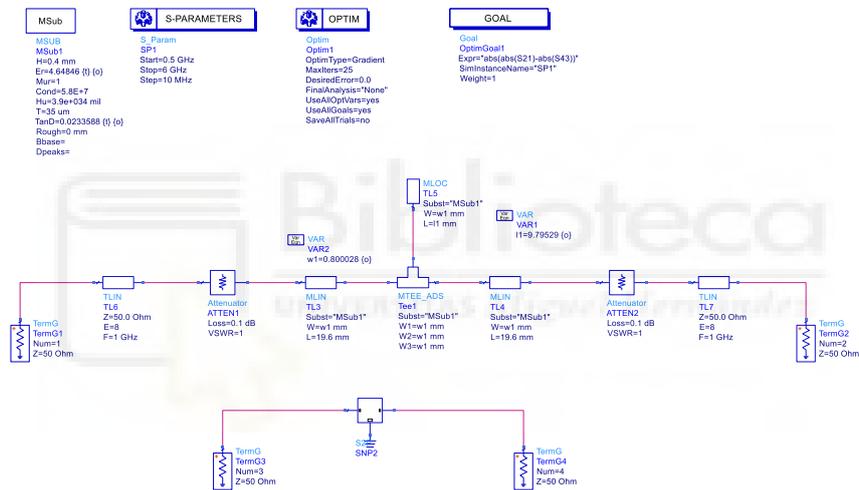
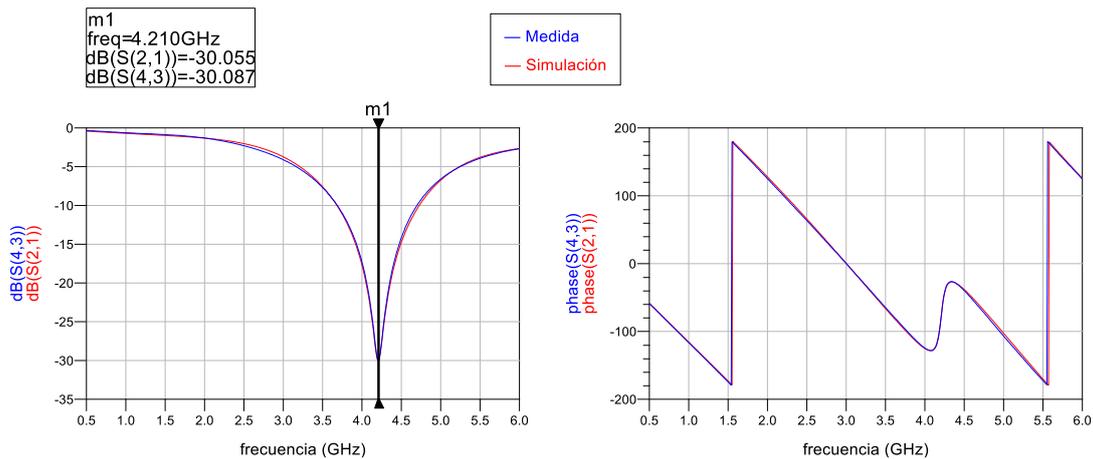


Figura 35. Diseño en ADS del resonador corto de 10mm de Cobre\_Cobre.

Al igual que en el caso de la línea de transmisión, una vez realizada la optimización de las variables con los ajustes necesarios para adaptar los resultados de la medida y simulación, obtenemos que los valores finales optimizados de nuestras variables son:

$$\epsilon_r=4.648 ; \text{TanD}=0.023 ; W1=0.800 ; L1=9.795$$

En cuanto a las simulaciones, representaremos los parámetros de transmisión  $S(2,1)$  del modelo circuital en comparación con las medidas.



Gráfica 5. Representación de parámetros S de transmisión del resonador corto de 10mm de Cobre\_Cobre.

Como podemos ver en la gráfica anterior, el resultado de este circuito es una resonancia a la frecuencia de 4.210GHz, justo donde está situado el marcador m1. Con los ajustes realizados se ha conseguido adaptar perfectamente los resultados obtenidos de la medida con los de la simulación.

#### 4.5.3. RESONADOR LARGO DE LONGITUD 15MM

En este apartado procederemos de la misma manera que en el caso anterior, con el objetivo de ajustar los resultados obtenidos en la simulación circuital con los obtenidos en la medida real del circuito.

En primer lugar, mediremos las dimensiones reales utilizando el microscopio electrónico que nos permite realizar aumentos y visualizar de forma más precisa el circuito.

Al igual que en el resonador corto, mediremos la longitud del resonador y la anchura de la línea en tres puntos distintos para después poder hacer una media aproximada.

Los valores medidos son los siguientes:

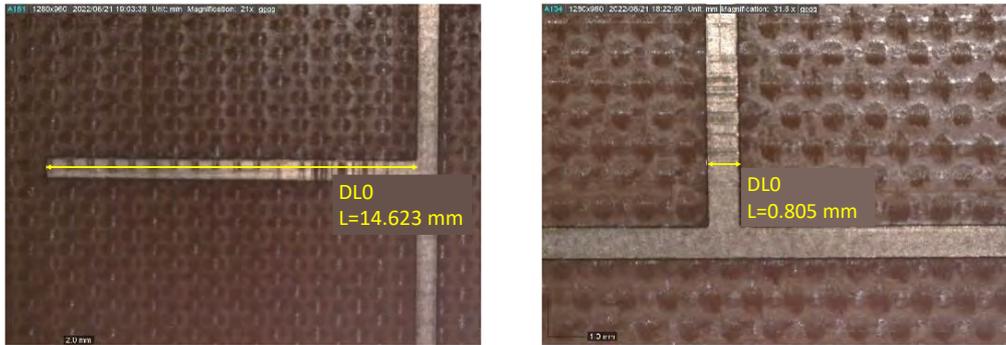


Figura 36. Mediciones del resonador largo de 15mm de Cobre\_Cobre con DinoCapture.

Longitud medida  $L=14.623\text{mm}$  ; Anchura media medida  $W=0.805\text{mm}$

Como se puede ver en las imágenes realizadas con el microscopio, las medidas no se corresponden exactamente con los valores teóricos iniciales que especificamos para la fabricación, donde  $L=15\text{mm}$  y  $W=0.8\text{mm}$

En cuanto al modelo circuital, las variables que tenemos que optimizar serán el ancho de la línea ( $W1$ ), la longitud del resonador ( $L1$ ), la constante dieléctrica del material ( $\epsilon_r$ ) y la tangente de pérdidas ( $TanD$ ).

A continuación, implementamos el modelo circuital de ADS teniendo en cuenta todas las variables expuestas anteriormente, y finalmente se ajustarán los valores de medida y simulación para caracterizar el sustrato FR4.

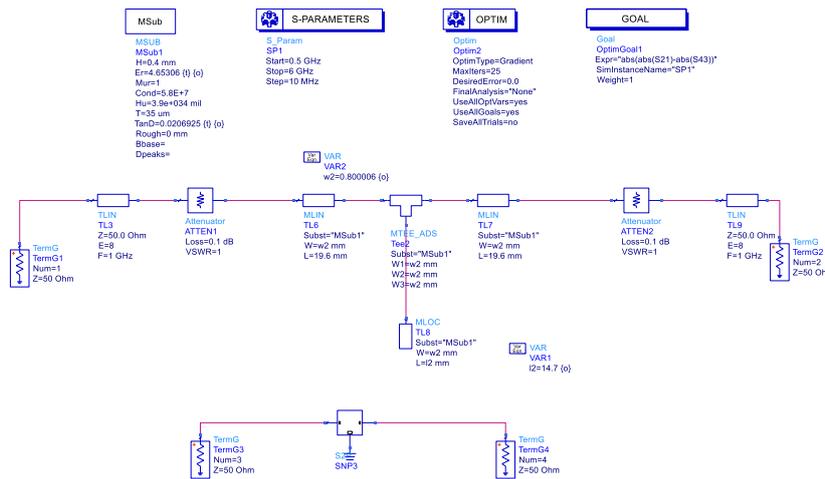


Figura 37. Diseño en ADS del resonador largo de 15mm de Cobre\_Cobre.

Como podemos ver en la figura anterior, después de varios procesos de optimización y ajustes con la herramienta del *Tunning*, se ha conseguido llegar a unos valores óptimos de las variables que ajustan perfectamente las medidas reales con la simulación.

Los valores finales de las variables son:

$$\epsilon_r=4.653 ; \text{TanD}=0.021 ; W1=0.800 ; L1=14.700$$

En cuanto a las simulaciones, tal y como se ha dicho anteriormente, las variables se han ajustado con el fin de adaptar la simulación circuital respecto a las medidas reales. Para ello, se han analizado los parámetros de transmisión S(2,1):

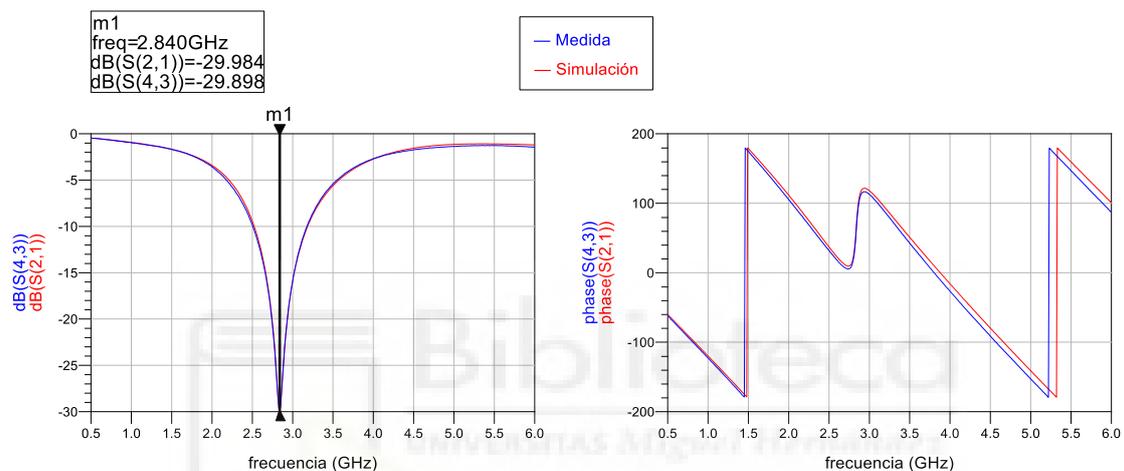


Figura 38. Representación de parámetros S de transmisión del resonador largo de 15mm de Cobre\_Cobre.

Como podemos ver en la Figura anterior, el circuito analizado produce una resonancia a la frecuencia de 2.840GHz. Podemos concluir, finalmente, que se ha conseguido adaptar de manera bastante exacta la simulación y medida.

#### 4.5.4. CÁLCULO DE LAS VARIABLES DEL SUSTRATO

En este apartado calcularemos los valores de la constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) y tangente de pérdidas (TanD) de nuestro sustrato FR4 para caracterizarlo. Para calcular el valor definitivo de estas variables será necesario hacer una media de los tres valores obtenidos: en la línea, en el resonador de 10mm y el resonador de 15mm. El valor resultante definitivo será el que utilizaremos en los apartados posteriores para calcular la conductividad del filamento Multi3D.

Constante dieléctrica:

$$\epsilon_{r_1}=4.620 ; \epsilon_{r_2}=4.648 ; \epsilon_{r_3}=4.653 \rightarrow \epsilon_r=4.640$$

Tangente de pérdidas:

$$\text{Tan}D_1=0.022 ; \text{Tan}D_2=0.023 ; \text{Tan}D_3=0.021 \rightarrow \text{Tan}D=0.022$$

#### 4.6. CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD DEL FILAMENTO MULTI3D

En este apartado trataremos de calcular el valor de la conductividad del filamento conductor Multi3D.

En este proceso, utilizaremos las tres placas restantes que hemos fabricado anteriormente. Estas placas, en primer lugar, han sido fabricadas con la fresadora, y posteriormente se ha realizado la impresión del filamento conductor con la impresora 3D. Después de esto, se ha metalizado mediante la técnica de galvanoplastia para obtener mejores resultados. Finalmente, se ha medido cada placa con el analizador vectorial de redes (VNA) para que se pueda ajustar la medida real con la simulación en ADS, obteniendo así el valor de la conductividad del filamento Multi3D.

Para empezar, realizaremos en primer lugar el diseño de la placa que contiene Cobre en la superficie superior y Multi3D en la inferior (Cobre\_Multi3D). La segunda placa será la que contiene la combinación inversa a la anterior, es decir, Multi3D en la superficie superior y Cobre en la inferior (Multi3D\_Cobre). La tercera y última placa será la que está compuesta por filamento Multi3D en ambas superficies.

##### 4.6.1. PLACA COBRE\_MULTI3D

En primer lugar, mediremos nuestras placas reales con el VNA y guardaremos los resultados en un archivo de formato S2P.

A continuación, mediremos las dimensiones de las líneas con el microscopio electrónico para que posteriormente podamos ajustar esos valores en nuestro diseño de ADS. El hecho de medir las dimensiones nos permite definir un rango de optimización más reducido y exacto para obtener mejores resultados.

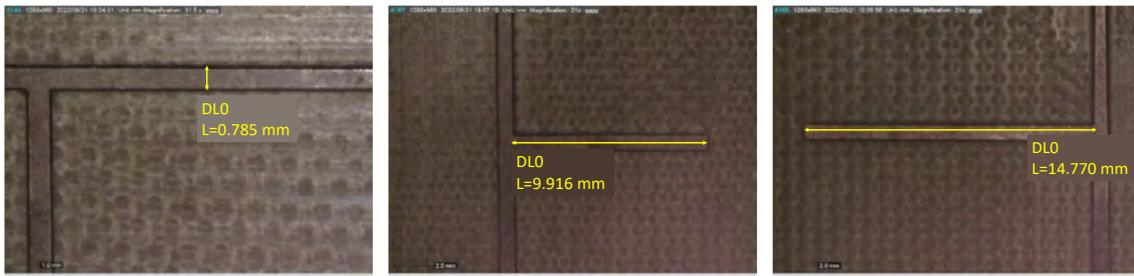


Figura 39. Mediciones de las pistas de la placa de Cobre\_Multi3D con DinoCapture.

Para cada elemento (línea de transmisión, resonador corto de 10mm y resonador largo de 15mm) hemos realizado tres medidas en puntos diferentes, ya que el ancho puede variar según donde lo medimos. De esta manera, teniendo varias medidas del mismo elemento aumentamos la exactitud y procedemos a realizar una media de todos esos valores medidos. El resultado obtenido de esa media será el valor de anchura o longitud que tomaremos para optimizar en la simulación de ADS.

## LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Como podemos ver en el diseño de ADS definiremos un nuevo sustrato microstrip de tres capas “*Three Layer Microstrip*” que permite la simulación de dos materiales distintos, uno en cada capa. En cuanto a las variables del sustrato, pondremos los valores de la constante dieléctrica y tangente de pérdidas calculados anteriormente. En la primera capa, puesto que es de cobre, pondremos el espesor de  $35\mu\text{m}$  y la conductividad de  $5.8\text{E}+7$  S/m. En la segunda capa, que es la inferior, tenemos el filamento conductor Multi3D cuyo espesor hemos medido con el pie de rey ( $313\mu\text{m}$ ) pero la conductividad la desconocemos, y es la variable que calcularemos.

Una vez tenemos definido el sustrato, configuraremos la simulación desde 0.5GHz hasta 6GHz. Añadiremos también los bloques para la optimización de nuestras variables, que en este caso son: la anchura de la línea, el espesor de la capa inferior de material Multi3D y la conductividad de este material. En cuanto a la constante dieléctrica y la tangente de pérdidas, también podrán modificarse un poco, ya que son valores que hemos calculado de manera aproximada.

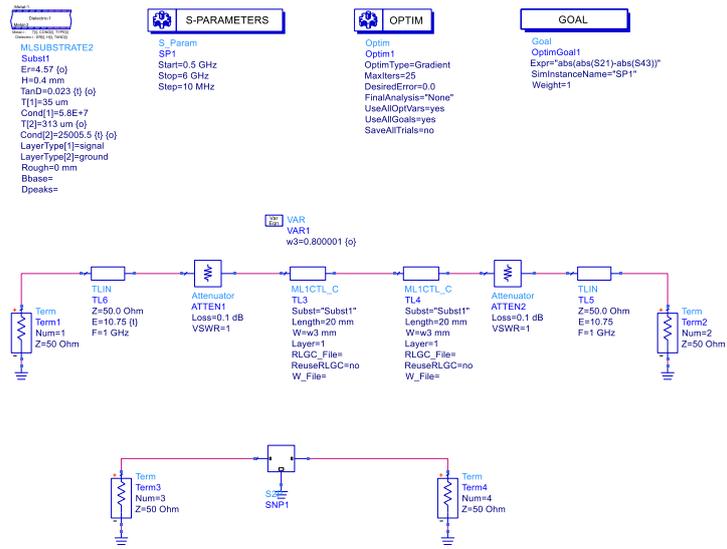
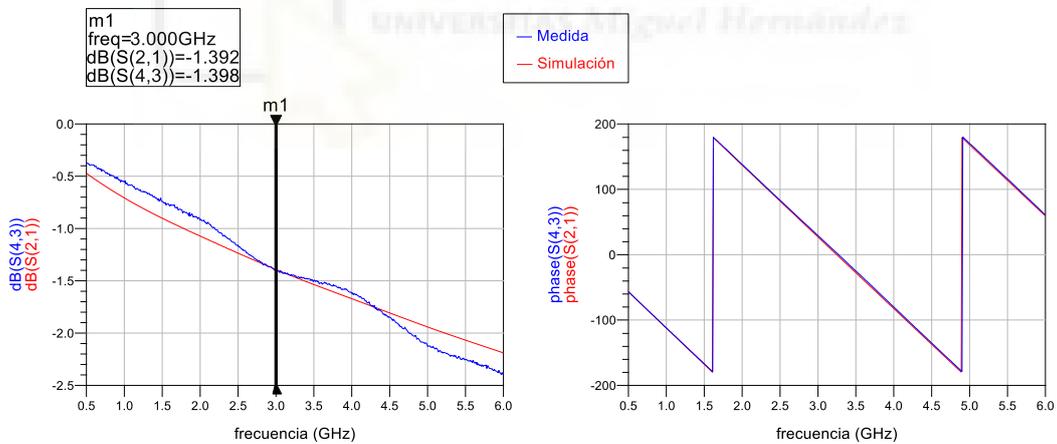


Figura 40. Diseño en ADS de la línea de transmisión de Cobre\_Multi3D.

Una vez optimizados los valores, visualizaremos las simulaciones para comparar las medidas reales con las circuitales de ADS. En el caso de no haber optimizado al máximo, podremos modificar levemente los valores de las variables utilizando la herramienta del *Tunning*.



Gráfica 6. Representación de parámetros S de transmisión de la línea de Cobre\_Multi3D.

Como podemos ver en la gráfica anterior, los resultados de la medida y la simulación se aproximan. Esto se puede observar justo a la frecuencia media de 3GHz donde coinciden exactamente. Sin embargo, a las demás frecuencias se producen oscilaciones (en la curva referente a la medida) que son difíciles de ajustar. Estas oscilaciones pueden ser debidas a los conectores SMA utilizados, ya que la atenuación que introducen al circuito no es lineal en todo el rango de frecuencias, de manera que

cuando conseguimos ajustar la simulación con la medida en determinadas frecuencias vemos que se desajusta en otras.

Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad del material Multi3D en esta línea de transmisión formada por cobre en la capa superior y Multi3D en capa inferior es:

$$\text{Cond}[\text{Multi3D}] = 25005.5.$$

### RESONADOR CORTO DE LONGITUD 10MM

En este apartado calcularemos la conductividad del filamento conductor Multi3D de la misma manera que en el caso de la línea de transmisión. Utilizaremos el mismo tipo de sustrato y realizaremos la optimización de las variables que en este caso son: la anchura de la línea, la longitud del resonador, el espesor de la capa inferior de material Multi3D y la conductividad de este material. Optimizaremos hasta conseguir el ajuste de la medida real con la simulación de ADS y una vez ajustadas las gráficas podremos obtener el valor de la conductividad. Como se ha dicho anteriormente, en cuanto a la constante dieléctrica y la tangente de pérdidas, también podrán modificarse un poco, ya que son valores que hemos calculado de manera aproximada.

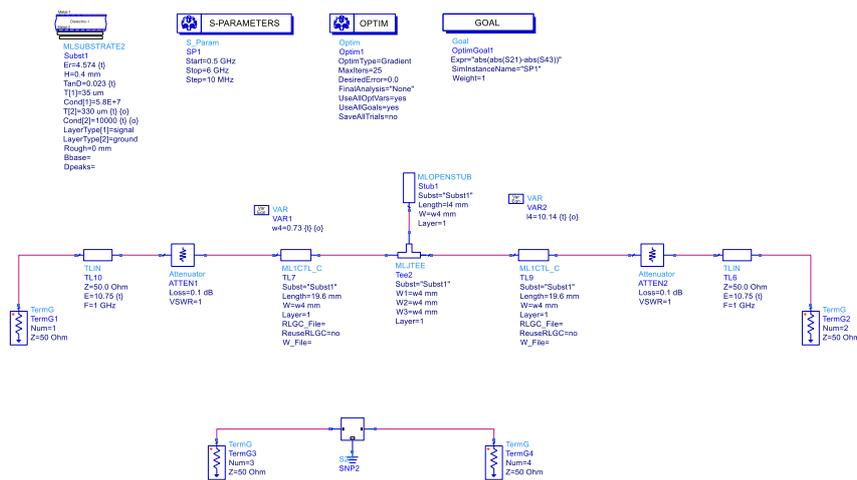
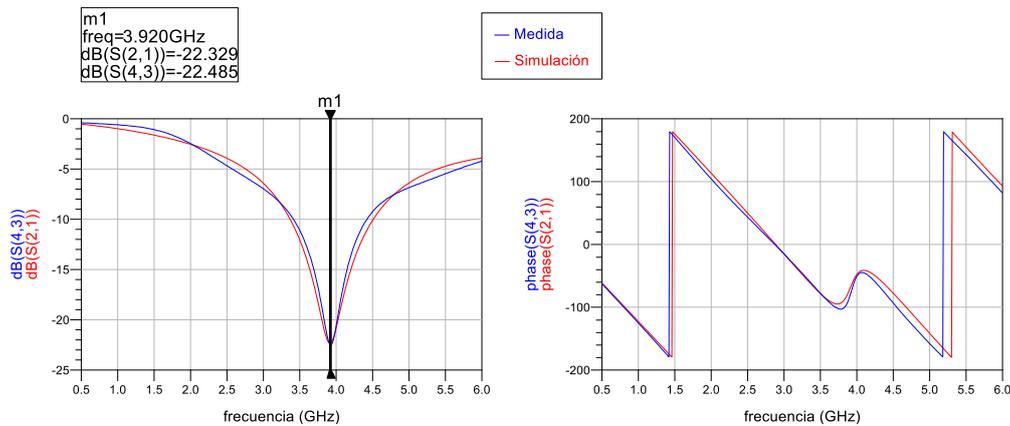


Figura 41. Diseño en ADS del resonador corto de 10mm de Cobre\_Multi3D.

Una vez optimizados los valores, visualizaremos las simulaciones para comparar las medidas reales con las circuitales de ADS. En el caso de no haber optimizado al

máximo, podremos modificar levemente los valores de las variables utilizando la herramienta del *Tunning*.



Gráfica 7. Representación de parámetros S de transmisión del resonador corto de 10mm de Cobre\_Multi3D.

Como podemos ver en la figura anterior, los resultados obtenidos de los parámetros S de transmisión se ajustan en la medida y simulación. En este caso el resonador de longitud 10mm provoca una resonancia a la frecuencia de 3.920GHz. Sin embargo, en el resonador del apartado anterior, cuya placa está compuesta por cobre en ambas caras, la resonancia se produce a la frecuencia de 4.21GHz. De esta manera, podemos ver claramente que se ha desplazado levemente en frecuencia un valor de 0.29GHz aproximadamente debido a la incorporación del material Multi3D.

Por otro lado, en gráfico de la derecha podemos ver representada la fase, que en este caso se producen desfases en determinados rangos de frecuencia, mientras que a otros se mantienen ambas curvas en fase.

Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad del material Multi3D en este resonador de longitud 10mm formado por cobre en la capa superior y Multi3D en capa la inferior es:

$$\text{Cond}[\text{Multi3D}]=10000.$$

## RESONADOR LARGO DE LONGITUD 15MM

En este apartado procederemos exactamente como hicimos en el apartado anterior que trataba el resonador con longitud 10mm.

Dibujamos el circuito, definimos el sustrato, establecemos el rango de simulación y optimizamos las variables de manera que el modelo circuital quedará de la siguiente manera:

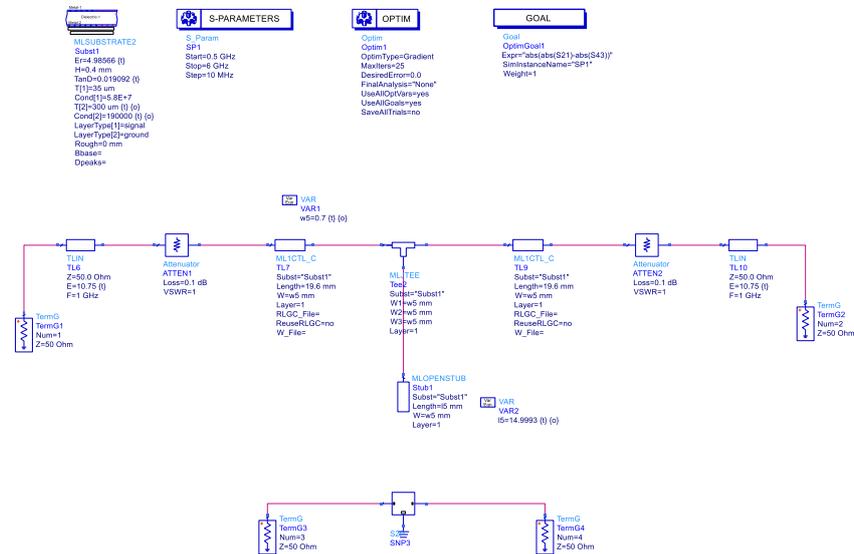
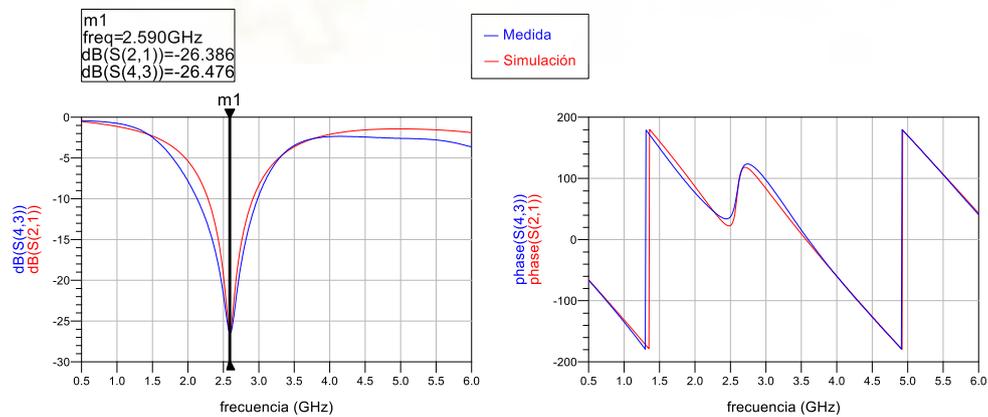


Figura 42. Diseño en ADS del resonador largo de 15mm de Cobre\_Multi3D.

Una vez optimizados los valores, visualizaremos las simulaciones para comparar las medidas reales con las circuitales de ADS.



Gráfica 8. Representación de parámetros S de transmisión del resonador largo de 15mm de Cobre\_Multi3D.

Como podemos ver en la figura anterior, las medidas reales se ajustan con la simulación realizada en ADS, y obtenemos como resultado una resonancia a la frecuencia de 2.59GHz. En nuestra placa compuesta por cobre en ambas caras la resonancia se produce a una frecuencia de 2.84GHz, de manera que podemos observar claramente que

se ha desplazado en frecuencia un total de 0.25GHz debido a la incorporación del nuevo material conductor Multi3D.

En cuanto a la fase, podemos ver que ocurre lo mismo que en el resonador anterior, es decir, que se ajusta en determinados rangos de frecuencias, y se desfasa en otros.

Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad del material Multi3D en este resonador de longitud 15mm formado por cobre en la capa superior y Multi3D en capa la inferior es:

Cond[Multi3D]=190000.

#### 4.6.2. PLACA MULTI3D\_COBRE

En este apartado realizaremos los mismos ajustes, solo que en este caso en la placa está formada por filamento conductor Multi3D en la cara superior y cobre en la inferior. Para ello seguiremos el mismo procedimiento que en apartado anterior, es decir, ajustaremos las variables de cada uno de los elementos (línea y resonadores) para obtener el valor final de la conductividad del material.

En primer lugar, mediremos las dimensiones de las líneas con el microscopio electrónico para que posteriormente podamos ajustar esos valores en nuestro diseño de ADS definiendo un rango de optimización más reducido y exacto que nos proporcionará mejores resultados. Realizaremos el mismo proceso de medida que en el apartado anterior, es decir, mediremos en varios puntos distintos y realizaremos una media de los valores obtenidos.

A continuación, utilizaremos el pie de rey para medir el espesor real de nuestra placa, y a su vez, el espesor (*Thickness*) de la capa superior de material Multi3D para poder añadirlo en las variables del sustrato del circuito en ADS.



Figura 43. Mediciones de las pistas de la placa de Multi3D\_Cobre con DinoCapture.

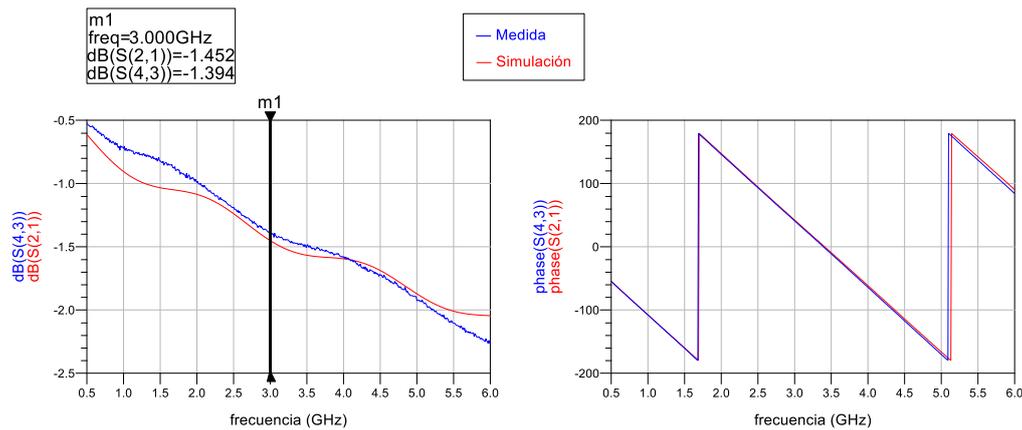
Una vez realizado esto, procedemos a medir los circuitos con el VNA y ajustar los resultados obtenidos en la simulación para cada elemento de nuestra placa: línea de transmisión, resonador corto de 10mm y resonador largo de 15mm.

## LÍNEA DE TRANSMISIÓN

En primer lugar, crearemos nuestro circuito en ADS e incluiremos en él el archivo S2P que nos permitirá incluir la medida real. Al igual que en el caso anterior, definiremos el tipo de sustrato que contiene un material distinto en cada cara, de manera que en la cara superior hay material Multi3D mientras que en la inferior hay cobre.

El objetivo es calcular la conductividad del filamento conductor Multi3D, para ello realizaremos el diseño de la línea de transmisión optimizando las siguientes variables: la anchura de la línea, el espesor de la capa con material Multi3D y la conductividad de este. También podemos modificar levemente los parámetros del sustrato calculados anteriormente (constante dieléctrica y tangente de pérdidas) con el fin de ajustar en mayor medida la medida real con la simulación obtenida.

En cuanto al diseño del circuito en ADS se realizará de la misma manera que en el apartado anterior, y una vez optimizadas las variables se obtienen los siguientes resultados:



Gráfica 9. Representación de parámetros S de transmisión de la línea de Multi3D\_Cobre.

Como podemos ver en la Figura anterior, en el gráfico de la izquierda la curva referente a la simulación presenta unas fluctuaciones que se han intentado reducir al máximo, pero aun así no han desaparecido por completo. En cuanto al gráfico de la derecha, podemos ver que ambas curvas están en fase para un valor de  $10.75^\circ$  introducidos a la entrada y salida del circuito.

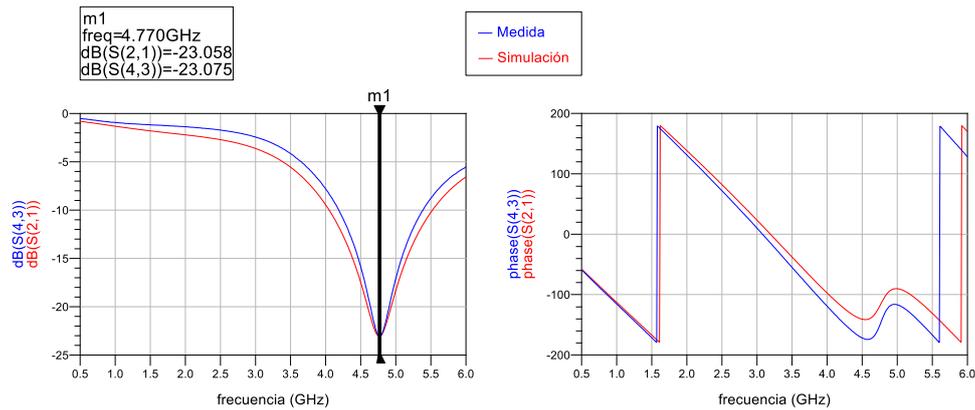
Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad del material Multi3D en esta línea de transmisión formada por Multi3D en la capa superior y cobre en capa la inferior es:

$$\text{Cond}[\text{Multi3D}]=90000.$$

## RESONADOR CORTO DE LONGITUD 10MM

En este apartado procederemos de la misma manera que en el caso de la línea de transmisión. En primer lugar, diseñamos el circuito en ADS configurando los valores medidos con el microscopio electrónico (dimensiones de las líneas), con el pie de rey (espesor de las capas) y con el VNA (parámetros S del comportamiento del resonador).

Una vez optimizadas las variables, procederemos a simular el resultado final gráficamente donde ambas curvas (simulación y medida) deben estar ajustadas.



Gráfica 10. Representación de parámetros S de transmisión del resonador corto de 10mm de Multi3D\_Cobre.

En este caso el resonador de longitud 10mm provoca una resonancia a la frecuencia de 4.770GHz. Sin embargo, en el resonador cuya placa está compuesta por cobre en ambas caras, la resonancia se produce a la frecuencia de 4.21GHz. De esta manera, podemos ver claramente que se ha desplazado levemente en frecuencia un valor de 0.56GHz aproximadamente debido a la incorporación del material Multi3D en la capa superior.

Por otro lado, en gráfico de la derecha podemos ver que según aumenta la frecuencia ambas curvas comienzan a desfasarse.

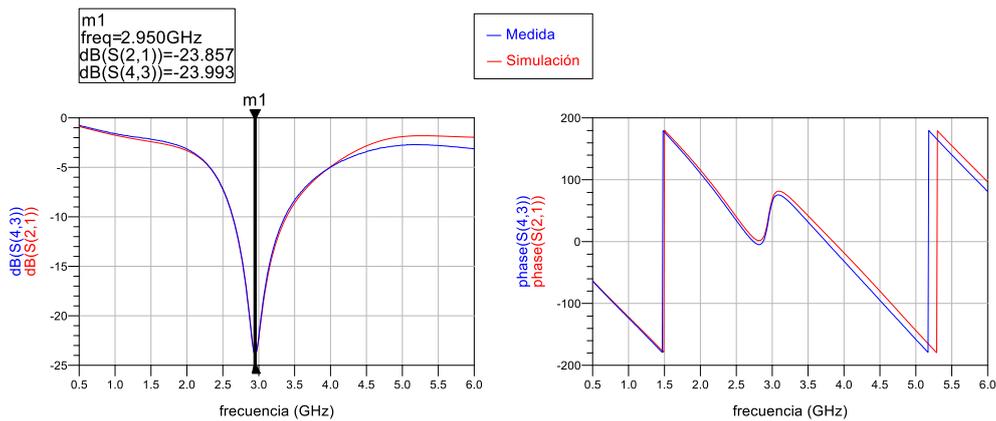
Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad del material Multi3D en este resonador de longitud 10mm formado por Multi3D en la capa superior y cobre en capa la inferior es:

$$\text{Cond}[\text{Multi3D}]=39000.$$

## RESONADOR LARGO DE LONGITUD 15MM

En este apartado seguiremos el mismo procedimiento para calcular la conductividad en el resonador largo de 15mm.

Realizamos el circuito ADS, optimizamos las variables y por último, visualizamos el resultado obtenido en la simulación donde se puede ver que ambas curvas (simulación y medida real) están ajustadas.



Gráfica 11. Representación de parámetros S de transmisión del resonador largo de 15mm de Multi3D\_Cobre.

En el gráfico de la izquierda se representa la transmisión desde puerto 1 al puerto 2, y vemos que se produce una resonancia a la frecuencia de 2.95GHz. Sin embargo, en el resonador cuya placa está compuesta por cobre en ambas caras, la resonancia se produce a la frecuencia de 2.84GHz. De esta manera, concluimos que al igual que en los casos anteriores, se ha desplazado en frecuencia un valor de 0.11GHz aproximadamente debido a la incorporación del material Multi3D en la capa superior.

Por otro lado, en gráfico de la derecha donde se representan las fases, podemos ver que según aumenta la frecuencia ambas curvas comienzan a desfasarse en mayor medida.

Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad del material Multi3D en este resonador de longitud 15mm formado por Multi3D en la capa superior y cobre en capa la inferior es:

$$\text{Cond}[\text{Multi3D}]=189750.$$

#### 4.6.3. PLACA MULTI3D\_MULTI3D

En este último apartado realizaremos los mismos ajustes, con la diferencia de que la placa está formada por filamento conductor Multi3D en la cara superior e inferior. Para ello seguiremos el mismo procedimiento que en apartado anterior, es decir, ajustaremos las variables de cada uno de los elementos (línea y resonadores) para obtener el valor final de la conductividad del material.

En primer lugar, mediremos las dimensiones de las líneas con el microscopio electrónico para que posteriormente podamos ajustar esos valores en nuestro diseño de ADS definiendo un rango de optimización más reducido y exacto que nos proporcionará mejores resultados. Realizaremos el mismo proceso de medida que en el apartado anterior, es decir, mediremos en varios puntos distintos y realizaremos una media de los valores obtenidos.

A continuación, utilizaremos el pie de rey para medir el espesor real de las capas de material Multi3D para poder añadirlo en las variables del sustrato del circuito en ADS.



Figura 44. Mediciones de las pistas de la placa de Multi3D\_Multi3D con DinoCapture.

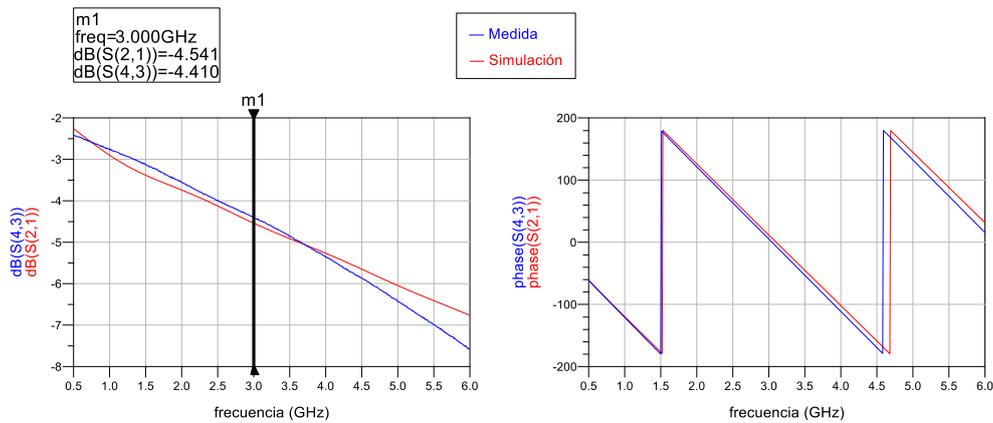
Una vez realizadas las medidas sobre la placa, procedemos a medir los circuitos con el VNA y ajustar con los resultados obtenidos en la simulación para cada elemento de nuestra placa: línea de transmisión, resonador corto de 10mm y resonador largo de 15mm.

## LÍNEA DE TRANSMISIÓN

En primer lugar, crearemos nuestro circuito en ADS e incluiremos en él el archivo S2P que nos permitirá incluir la medida real. Dado que se trata de una placa con material Multi3D en ambas caras utilizaremos un sustrato *microstrip* simple.

El objetivo es calcular la conductividad del filamento conductor Multi3D, para ello realizaremos el diseño de la línea de transmisión optimizando las siguientes variables: la anchura de la línea, el espesor de la capa con material Multi3D y la conductividad de este. También podemos modificar levemente los parámetros del sustrato calculados anteriormente (constante dieléctrica y tangente de pérdidas) con el fin de ajustar en mayor medida la simulación obtenida con la medida real.

Una vez optimizadas al máximo nuestras variables, el resultado de la simulación queda de la siguiente manera:



Gráfica 12. Representación de parámetros S de transmisión de la línea de Multi3D\_Multi3D.

Como podemos ver en el gráfico de la izquierda, los parámetros S de transmisión en la medida y simulación se ajustan exactamente en el rango central del intervalo de frecuencias representado, y en cuanto a los extremos se desajustan levemente debido a que las curvas no son perfectamente lineales. Por otro lado, en cuanto a la fase cabe destacar que ocurre lo mismo que en los apartados anteriores, ya que ambas curvas están en fase hasta aproximadamente el punto medio del rango representado, y a partir de esa frecuencia comienzan a desfasarse.

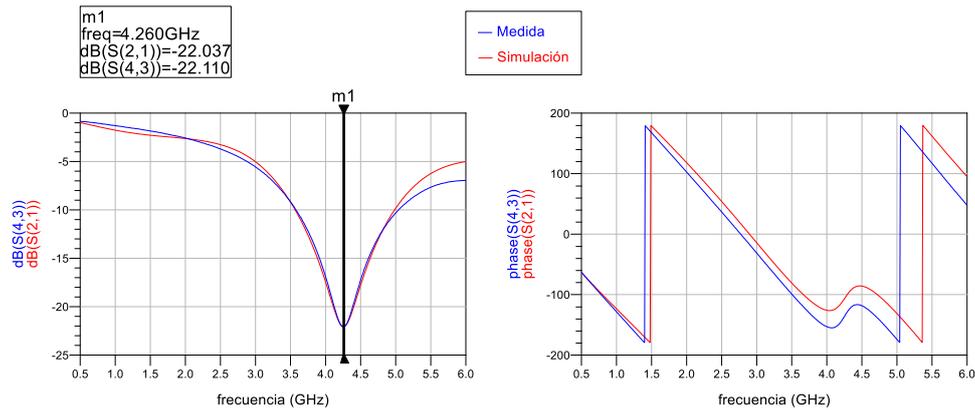
Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad del material Multi3D en esta línea de transmisión formada por Multi3D en ambas capas es:

$$\text{Cond}[\text{Multi3D}] = 6100.$$

## RESONADOR CORTO DE LONGITUD 10MM

En este apartado realizaremos el mismo procedimiento que en la línea de transmisión con el fin de calcular la conductividad para el resonador corto de longitud 10mm.

Una vez optimizadas las variables del modelo circuital, visualizamos las gráficas donde están representadas ambas curvas:



Gráfica 13. Representación de parámetros S de transmisión del resonador corto de 10mm de Multi3D\_Multi3D.

Como se puede ver en el gráfico de la izquierda, las curvas de medida y simulación se corresponden perfectamente. El resonador produce una resonancia a la frecuencia de 4.26GHz, mientras que en la placa de cobre utilizada para caracterizar el sustrato, se produce en 4.21GHz, de esta manera concluimos que se ha desplazado en frecuencia un valor de 0.05GHz, que es mucho menor que en las placas donde se combina Cobre y material Multi3D.

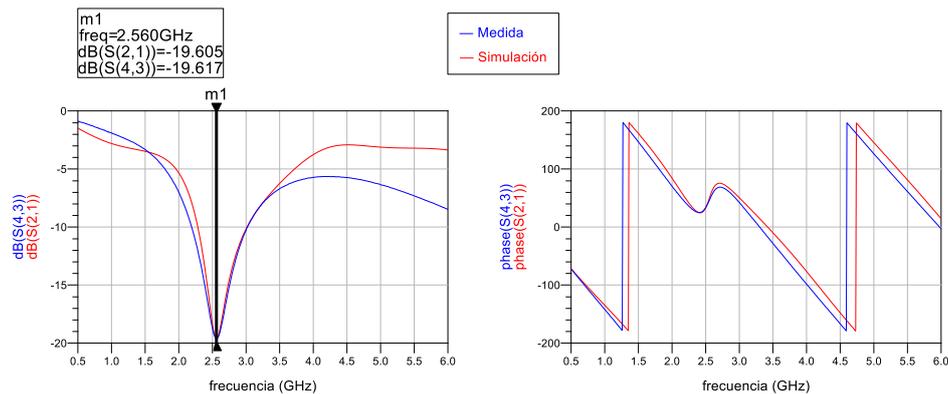
Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad del material Multi3D en este resonador de longitud 10mm formado por Multi3D en ambas capas es:

$$\text{Cond}[\text{Multi3D}]=59311.5$$

## RESONADOR LARGO DE LONGITUD 15MM

En este último apartado procederemos exactamente de la misma manera que en el anterior, y analizaremos el comportamiento del resonador de longitud 15mm.

En la siguiente figura podemos visualizar de forma gráfica el comportamiento del circuito después de haber optimizado las variables:



Gráfica 14. Representación de parámetros S de transmisión del resonador largo de 15mm de Multi3D\_Multi3D.

En la Gráfica 14 podemos ver los gráficos correspondientes a los parámetros S de transmisión de un puerto a otro. En el gráfico de la izquierda podemos ver que el resonador produce una resonancia a la frecuencia de 2.56GHz, mientras que en la placa de cobre se produce a 2.84GHz. De esta manera, podemos concluir que al igual que en todos los casos anteriores, esta resonancia se ve desplazada en frecuencia un valor de 0.08GHz, que al igual que en el resonador de longitud 10mm, este es el valor más pequeño en desplazamiento comparado con las demás placas analizadas.

Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad del material Multi3D en este resonador de longitud 10mm formado por Multi3D en ambas capas es:

Cond[Multi3D]=67012.

#### 4.7. OBTENCIÓN DEL VALOR DE LA CONDUCTIVIDAD DEL FILAMENTO MULTI3D

Para obtener el valor final de la conductividad del filamento conductor Multi3D, realizaremos una media de todos los valores obtenidos en los apartados anteriores donde hemos analizado cada placa de manera individual.

De esta manera, el resultado final obtenido es:

Conductividad[Multi3D]=75131=7.5E+4 S/m

El valor obtenido de la conductividad es 1000 veces más pequeño que la conductividad del cobre (5.8E+7 S/m), de manera que la resistividad de este material es mucho mayor.

Esto provoca que los resultados obtenidos en circuitos *microstrip* no sean lo suficientemente buenos.

Por consiguiente, se tomará otra línea de investigación con el fin de obtener mejores resultados: fabricación de un sustrato con la impresora 3D utilizando material PLA (ácido poliláctico) con circuitos de pintura de plata.



## CAPÍTULO 5. DISEÑO DE CIRCUITOS CON SUSTRATO PLA Y PINTURA DE PLATA

En este apartado se diseñarán, fabricarán y medirán circuitos con sustrato de material PLA elaborado con la impresora 3D y posteriormente se pintarán las pistas *microstrip* con pintura de plata y se metalizará mediante la técnica de galvanoplastia de espigas.

La razón de escoger un sustrato de material PLA ofrece numerosas ventajas, ya que es un polímero biodegradable, no emite humos olorosos durante el proceso de impresión y además es de los filamentos más populares y utilizados en el ámbito de la impresión 3D.

Por otro lado, se diseñarán los circuitos con otro tipo de línea denominada “*slotline*” que consiste en una ranura sobre el material dieléctrico. Esta ranura se pintará con pintura de plata, ya que es un material conductor cuya conductividad eléctrica puede variar dentro del siguiente rango especificado en el DataSheet del fabricante:  $[2E+6 - 8E+6]$ . Después de haber pintado los circuitos diseñados, se medirán utilizando el VNA con el fin de obtener la conductividad real de la pintura de plata utilizada. Para todo ello, se utilizará el mismo proceso descrito en el capítulo anterior donde se calculó la conductividad del filamento Multi3D.

Por último, se aplicará la técnica de la galvanoplastia de espigas también denominada “*Electroplating*” para metalizar el circuito. Este procedimiento se realiza con el fin de aumentar y mejorar la conductividad calculada de la pintura de plata.

### 5.1. DISEÑO DE LA PLACA CON MATERIAL PLA.

En este apartado se realizará el diseño de la placa elaborada con material PLA que contendrá los circuitos de Test y que será impresa con la impresora 3D.

Para ello, en primer lugar, hay que calcular el ancho (W) necesario de las pistas para los elementos del circuito de Test (línea de transmisión, resonador corto de longitud 10mm y resonador largo de longitud 15mm) suponiendo que la altura (H) del sustrato es de 600 micras. Este valor es el resultado de hacer 800 micras menos 200 micras correspondientes a la profundidad de las líneas. Para realizar este cálculo utilizaremos la

herramienta de ADS denominada *LineCalc* en la que calcularemos el ancho de la línea para una resistencia de  $50\Omega$  de manera que la altura sean las 600 micras resultantes.

El valor del ancho de la línea que se ha calculado es de 1.3mm según las condiciones que ofrece este tipo de sustrato y los requerimientos que deseamos que cumpla.

En cuanto al diseño utilizaremos la herramienta de EMPro donde ya hicimos anteriormente la placa para la caracterización del material Multi3D, por lo tanto, solamente deberemos modificar algunos aspectos como, por ejemplo: la profundidad de las líneas (200 micras) y el material de la placa que en este caso es PLA.

Una vez terminado nuestro diseño, deberemos exportarlo en formato Step (*.step*) al programa FreeCAD que nos permitirá visualizarlo y exportarlo en formato STL Mesh (*.stl*) para poder abrirlo finalmente en el programa Ultimaker Cura que actuará como interfaz directa generando los archivos gcode que introducimos en la impresora 3D.

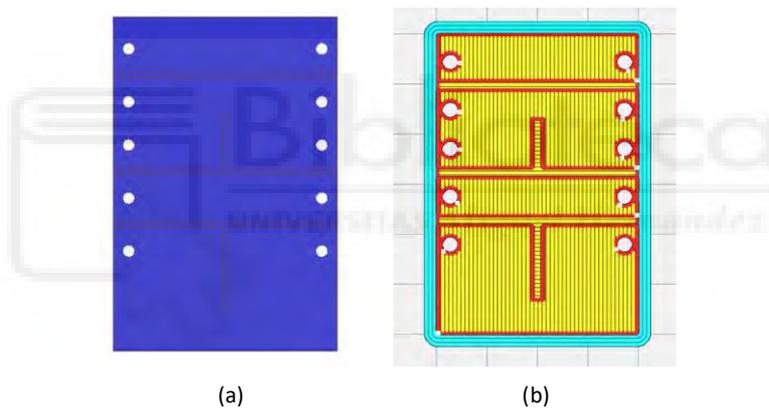


Figura 45. (a) Diseño de la placa de PLA en EMPro. (b) Diseño de la placa de PLA en Ultimaker Cura.

## 5.2. FABRICACIÓN DE LA PLACA CON MATERIAL PLA Y PINTURA DE PLATA

En este apartado se fabricará la placa y se trazarán y pintarán las líneas con la correspondiente pintura de plata, que después de dejarla secar, se metalizará mediante la técnica de la galvanoplastia de espigas.

En primer lugar, obtenemos nuestra placa de PLA que ha sido impresa directamente con la impresora 3D. Como podemos ver en la siguiente figura, se puede ver el diseño de la placa fabricada donde se puede apreciar levemente el dibujo de las líneas y resonadores:

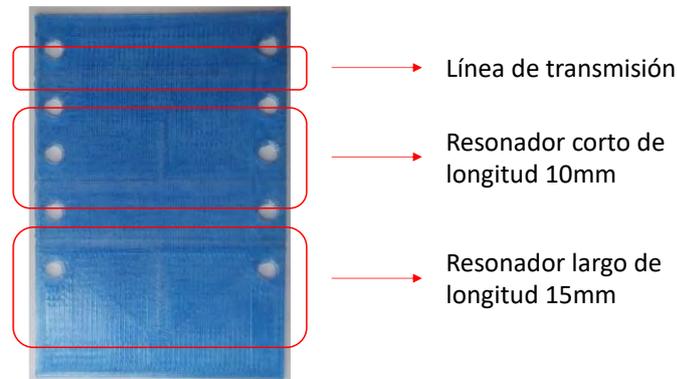


Figura 46. Placa de PLA fabricada con la impresora 3D.

Una vez tenemos la placa ya fabricada procederemos a rellenar la línea y ambos resonadores con la pintura de plata que se ha descrito anteriormente. Para este proceso utilizaremos una jeringa donde introduciremos la pintura e iremos depositándola poco a poco a lo largo de nuestros circuitos, intentando que quede distribuida de manera uniforme.

Para ello utilizaremos la siguiente jeringa con una boquilla de 0.5ml:

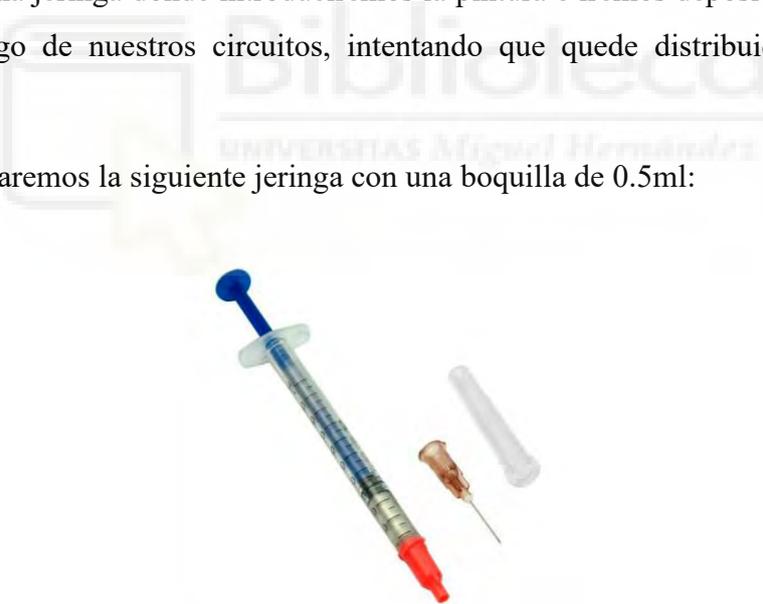


Figura 47. Jeringa para rellenar los circuitos con pintura de plata. [31]

A continuación, esperaremos a que la pintura esté completamente seca (alrededor de 15 minutos) y procederemos a limpiar la placa de los restos de pintura que hayan quedado fuera de los bordes de las líneas. Esta tarea la realizaremos fácilmente con un papel de lija que pasaremos por la placa. Aquí podemos ver una de las grandes ventajas de

realizar un diseño donde las líneas tienen profundidad, y es que al lijar la placa, las líneas ya pintadas se mantienen intactas.

Por último, pegaremos una lámina de cobre en la superficie inferior que representa la masa. Para ello, cortaremos un fragmento de lámina con las dimensiones de la placa y la pegaremos a ésta utilizando pegamento de barra.



Figura 48. (a) Rollo de lámina de cobre de  $35\mu\text{m}$ . (b) Pegamento de barra. (c) Papel de lija. [31]

Después, posicionamos la placa entre dos láminas de madera sujetadas por un sargento cuya función es hacer presión para que el pegamento quede distribuido de manera uniforme por toda la superficie. Esperaremos un tiempo de 15 minutos y nuestra placa ya estará lista para colocarle los conectores SMA y realizar las medidas necesarias.



Figura 49. Placa de PLA con pintura de plata.

### 5.3. CARACTERIZACIÓN DE LA PINTURA DE PLATA

En este apartado trataremos de calcular la conductividad que posee la pintura de plata que hemos utilizado en nuestra placa. Para ello, mediremos la placa realizada mediante el VNA y guardaremos los parámetros S de cada uno de los componentes del circuito de Test: línea de transmisión, resonador corto de longitud 10mm y resonador largo de longitud 15mm.

A continuación, utilizaremos el programa ADS para crear los diseños de los circuitos sobre los que iremos ajustando las variables hasta que la solución de la simulación se ajuste a las medidas reales que se han tomado con el VNA, y de esta manera, obtendremos el valor de la conductividad de la pintura de plata que se ha empleado. Este proceso se repetirá para cada uno de los componentes del circuito de Test, y posteriormente se realizará una media con los valores obtenidos de la conductividad para cada uno de ellos.

#### 5.3.1. LÍNEA DE TRANSMISIÓN

En primer lugar, calcularemos el valor de la conductividad para la línea de transmisión. Para ello realizaremos primero el diseño en ADS donde utilizaremos un sustrato PLA ( $\epsilon_r=2.8$  ;  $\text{TanD}=0.02$ ) [32] de tipo “*Three Layer Microstrip*” que contiene dos materiales distintos, uno es la plata y otro el cobre, por lo tanto configuramos el espesor de cada uno de ellos: la pintura de plata tiene un espesor de 200 micras que corresponden a la profundidad de las líneas, mientras que el cobre tiene un espesor de  $35\mu\text{m}$ . En cuanto a la conductividad sabemos que la del cobre es  $5.8\text{E}+7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$  y la de la pintura de plata es una incógnita que debemos calcular.

En cuanto a las variables a optimizar tenemos la conductividad de la pintura de plata, el ancho de las líneas (aunque hemos configurado la impresora para que el ancho sea de 1.3mm, las dimensiones varían levemente debido a la exactitud de esta tecnología), el espesor de la pintura de plata y, por último, las características del sustrato (constante dieléctrica y tangente de pérdidas).

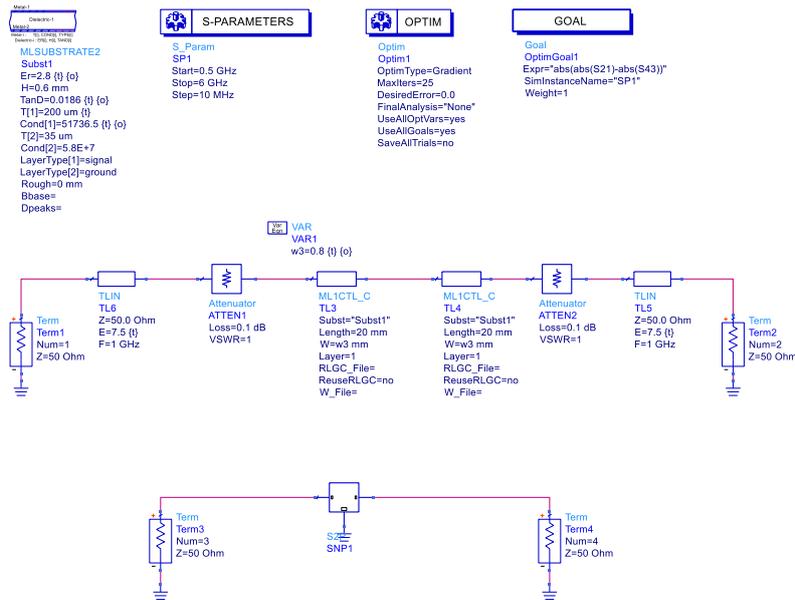
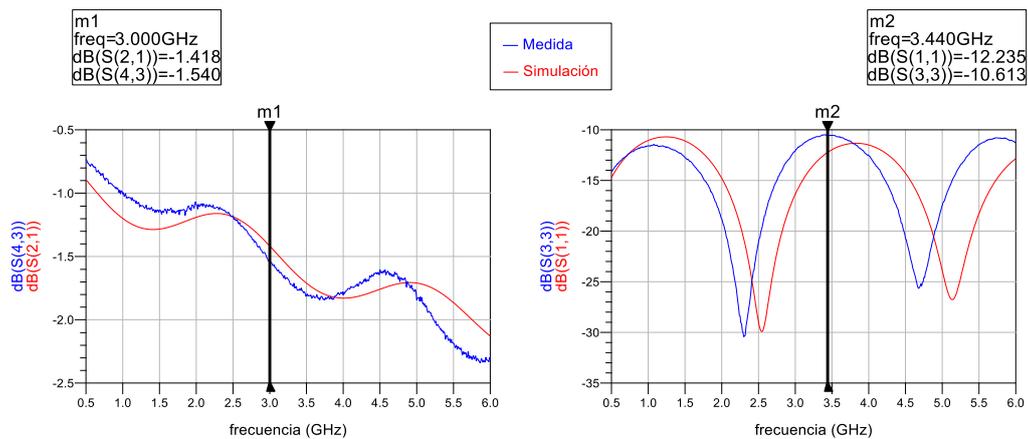


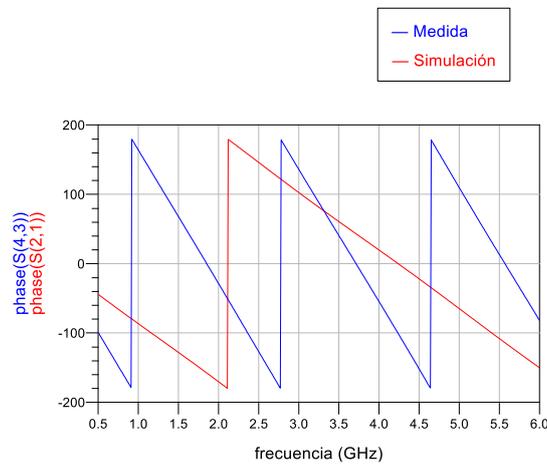
Figura 50. Diseño en ADS de la línea de transmisión de pintura de plata.

Como podemos ver en la siguiente Gráfica 15, a la izquierda vemos representados los parámetros S de transmisión entre dos puertos de entrada y salida. En el gráfico podemos ver que ambas curvas están aproximadamente ajustadas, sobre todo en el rango central de frecuencias que abarca desde los 2GHz hasta 4GHz. Por otro lado, en el gráfico de la derecha podemos ver representados los parámetros S de reflexión de los puertos correspondientes a la medida y simulación. Como podemos ver ambas curvas están por debajo de -10dB, lo que indica que las líneas están adaptadas, ya que rebota menos de una décima parte de la señal que se transmite.



Gráfica 15. Representación de parámetros S de la línea de pintura de plata.

Por último, en la Gráfica 16 podemos ver que la fase está desajustada para un valor de  $7.5^\circ$  y para ajustar ambas curvas (simulación y medida real) es necesario incluir un desfase de  $60^\circ$  aproximadamente en la entrada y salida, cosa que en la práctica no tiene sentido.



Gráfica 16. Representación de parámetros S de la fase de la línea de pintura de plata.

Esto es debido a que en la simulación que se realiza no se considera que las líneas tienen una profundidad hacia dentro de la placa de PLA. En la simulación se considera la estructura de *microstrip* en la que los campos van tanto por el aire como por dentro del material y se desplazan desde la línea hacia el plano de masa cuando en realidad lo que ocurre es que, al estar las líneas sumergidas en la placa, los campos solamente a través del material hacia el plano de masa. De esta manera, la estructura que estamos simulando en ADS no se corresponde con el diseño real que se ha medido con el VNA, y es por esto que se produce un gran desfase entre ambas curvas.

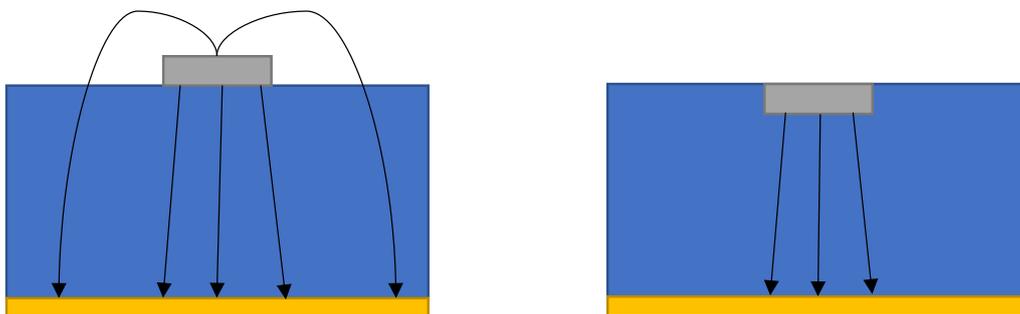


Figura 51. Propagación de los campos en la estructura fabricada.

Afortunadamente para el cálculo de la conductividad no influye el valor de la fase, de manera que en los siguientes diseños obviaremos el término de la fase en el circuito.

Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad de la pintura de plata en esta línea de transmisión es:

$$\text{Cond}[\text{pintura de plata}] = 51736.5$$

### 5.3.2. RESONADOR CORTO DE LONGITUD 10MM

En este apartado realizaremos el mismo procedimiento que se hizo para la línea de transmisión anterior. En primer lugar diseñaremos el modelo circuital de simulación en ADS:

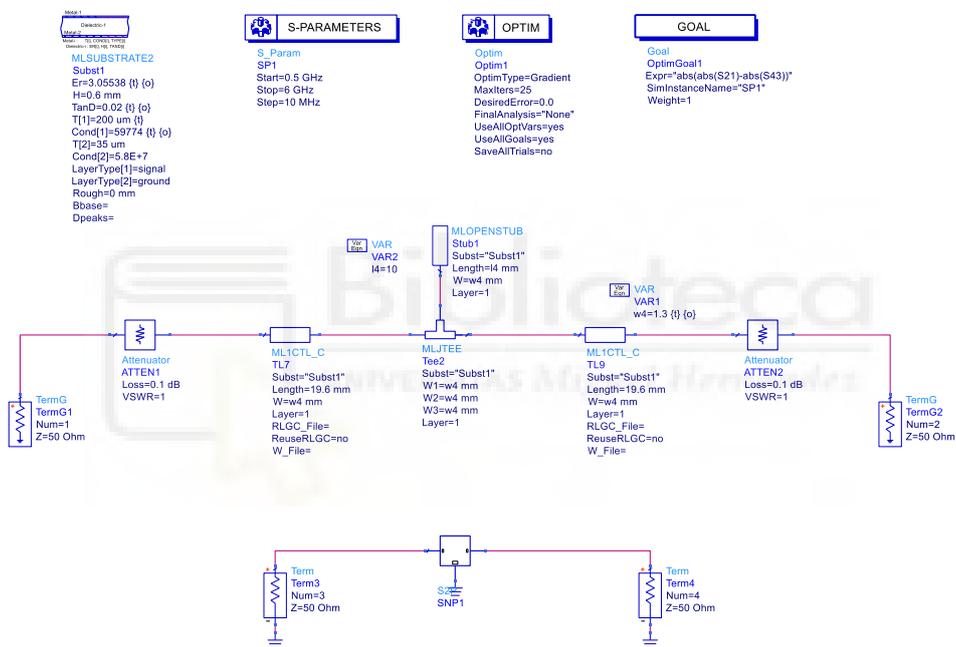
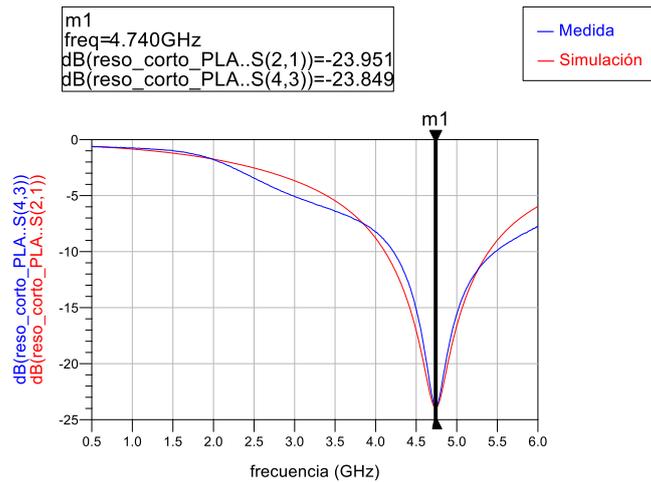


Figura 52. Diseño en ADS del resonador corto de 10mm de pintura de plata.

Una vez optimizadas las variables utilizando la herramienta *Optimize* y el *Tuning* de ADS, procedemos a visualizar los gráficos que comparan las medidas reales con la simulación optimizada:



Gráfica 17. Representación de parámetros S del resonador corto de 10mm de pintura de plata.

Como podemos ver en la figura anterior se representan los parámetros S de transmisión entre dos puertos donde ambas curvas están ajustadas. El resonador de longitud 10mm produce una resonancia a la frecuencia de 4.74GHz.

Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad de la pintura de plata en este resonador de longitud 10mm es:

Cond[pintura de plata]= 59774.

### 5.3.3. RESONADOR LARGO DE LONGITUD 15MM

En este apartado seguiremos el mismo procedimiento para calcular el valor de la conductividad para el resonador largo de 15mm.

Para ello, en primer lugar, creamos el diseño circuital en ADS y añadimos el archivo S2P que contiene las medidas reales para comparar y ajustar los resultados mediante la herramienta de optimización que ofrece ADS.

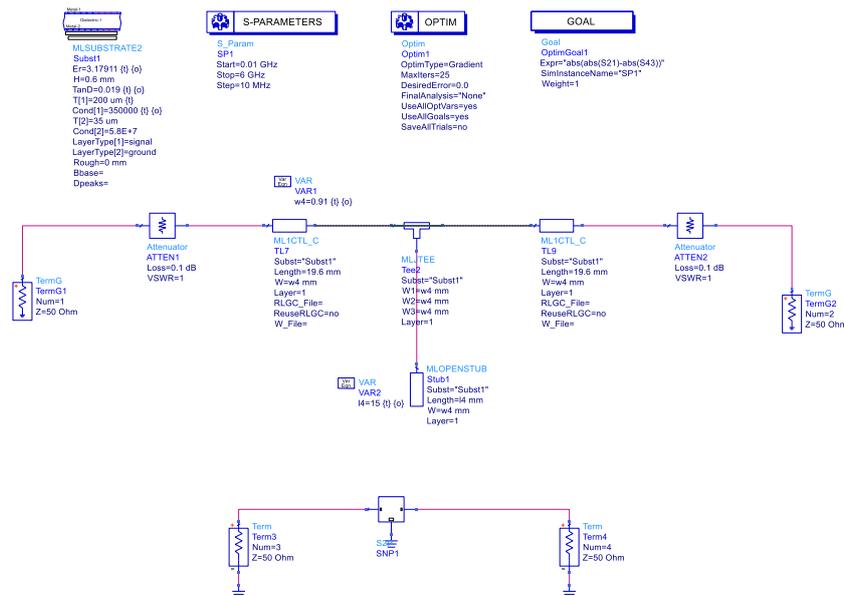


Figura 53. Diseño en ADS del resonador largo de 15mm de pintura de plata.

Después de optimizar las variables, los resultados obtenidos en la simulación son los que se representan en la siguiente Figura 54. Como podemos ver, ambas curvas (simulación y medida real) están ajustadas de manera que producen una resonancia a la frecuencia de 3.2GHz.

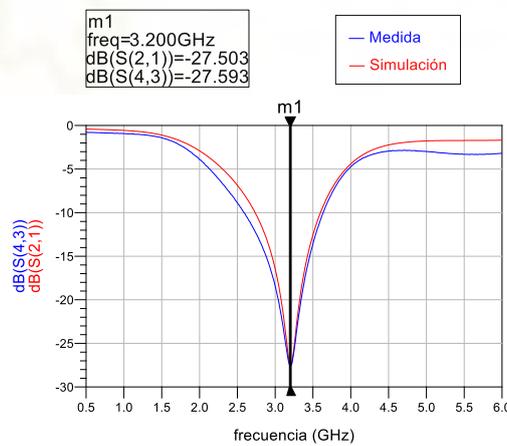


Figura 54. Representación de parámetros S del resonador largo de 15mm de pintura de plata.

Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad de la pintura de plata en este resonador de longitud 15mm es:

$$\text{Cond}[\text{pintura de plata}] = 350000.$$

#### 5.3.4. CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD DE LA PINTURA DE PLATA

Como se ha dicho anteriormente, para el cálculo del valor de la conductividad de la pintura de plata que se ha utilizado se realizará una media de los tres valores obtenidos en los apartados anteriores.

De esta manera, el valor final estimado de la conductividad es:

$$\text{Conductividad}[\text{Pintura de plata}] = 153837 = 1.5E+5 \text{ S/m}$$

Teniendo en cuenta el resultado obtenido y comparándolo con la conductividad del filamento Multi3D, podemos ver que la conductividad de la pintura de plata es dos veces mayor que la del filamento:

$$\frac{\text{Cond}[\text{Multi3D}]}{\text{Cond}[\text{Pintura de plata}]} = \frac{1.5E + 5}{7.5E + 4} = 2$$

Podemos concluir por lo tanto que la pintura nos ofrece mejores resultados que el filamento Multi3D, además de ofrecernos otras grandes ventajas como la simplificación del proceso de fabricación y una gran reducción en los costes, ya que como materiales solamente se necesita la impresora 3D, el filamento PLA y la pintura de plata.

Sin embargo, para seguir mejorando el valor de la conductividad, realizaremos la técnica de *electroplating* mediante el kit de galvanoplastia de espigas que detallaremos en la siguiente sección.

#### 5.4. APLICACIÓN DE LA GALVANOPLASTIA DE ESPIGAS

Como se ha dicho anteriormente, en este capítulo se pretende mejorar y aumentar la conductividad de la pintura de plata mediante la aplicación de la técnica denominada galvanoplastia de espigas.

Para ello, en primer lugar, debemos limpiar la placa para que no queden restos de suciedad o partículas y a continuación preparamos el kit de galvanoplastia para metalizar las líneas. Se utilizará el *GalvanoPen* de grafito al que se colocará el filtro que está humedecido con sulfato de cobre. Este *GalvanoPen* o boli se conectará a la fuente de alimentación con 2 voltios. Para metalizar las líneas se conectará el cable de masa en

la línea deseada a la vez que se aplican leves movimientos con el boli para que se deposite el cobre de manera uniforme por la superficie de las líneas.

Después de metalizar todas las líneas de la placa será necesario introducir la placa en un baño de agua destilada y secarla utilizando un secador de aire frío (para evitar que la placa se dañe con el calor) con el fin de que no se oxiden las líneas con la humedad.

Por último, medimos con un multímetro la resistencia que presentan las líneas para verificar que el proceso de galvanoplastia se ha realizado correctamente. Se puede concluir que se ha realizado de manera correcta, ya que el resultado que obtenemos de la resistencia en las líneas es de  $0.1\Omega$  (misma resistencia que el cobre).



Figura 55. Placa de PLA con pintura de plata más electroplating.

## 5.5. CARACTERIZACIÓN DE LA PINTURA DE PLATA MÁS LA GALVANOPLASTIA DE ESPIGAS

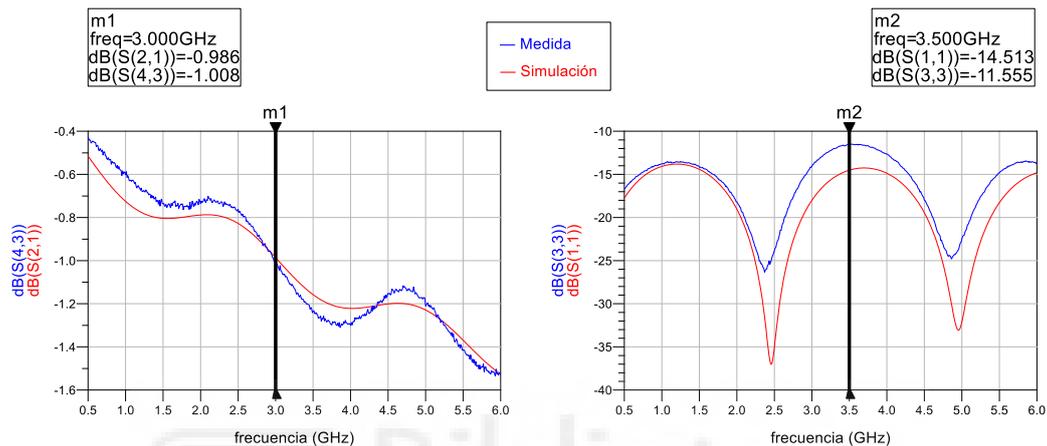
En este apartado se realizará la caracterización de la pintura de plata una vez aplicada sobre ella la galvanoplastia. Se compararán los resultados simulados en ADS con las soluciones reales medidas con el VNA y se ajustarán optimizando las variables con el fin de obtener un valor para la conductividad de la pintura más *electroplating*.

Esto lo haremos primero para la línea de transmisión, y después para el resonador corto de longitud 10mm y el largo de longitud 15mm.

### 5.5.1. LÍNEA DE TRANSMISIÓN

En esta sección procederemos de la misma manera que en el apartado anterior, con los mismos diseños de ADS, modificando solamente el archivo S2P que en este caso contendrá las medidas realizadas sobre la placa con pintura metalizada.

Después de haber optimizado las variables para ajustar medida y simulación, el resultado obtenido es el siguiente:



Como podemos ver en la gráfica de la izquierda, están representados los parámetros S de transmisión y ambas curvas se corresponden de manera aproximada. Por otro lado, en la curva de la derecha vemos los parámetros de reflexión que nos indican que ambas líneas están adaptadas ya que están por debajo de -10dB.

También cabe destacar que los resultados de la pintura de plata con galvanoplastia están más adaptados que en el caso de la pintura solamente, proporcionando un resultado de -14.513dB frente a -12.235dB.

En cuanto a la fase, ocurre lo mismo que en el apartado anterior, ya que las simulaciones de ADS no se corresponden con el diseño real que se ha fabricado. Por lo tanto, no analizaremos las fases en este capítulo tampoco.

Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad de la pintura de plata en esta línea de transmisión es:

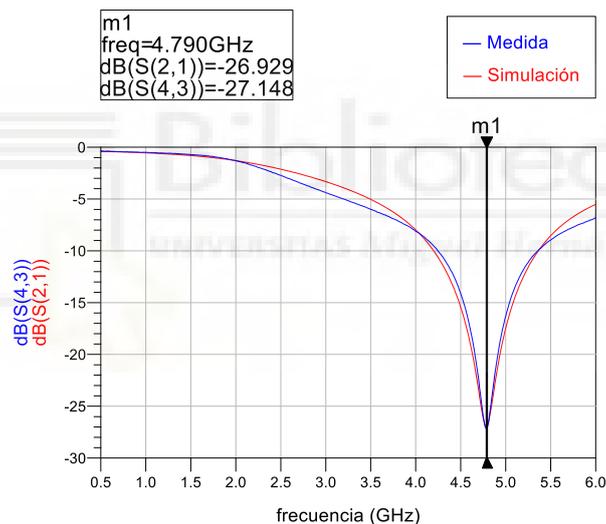
$$\text{Cond}[\text{pintura de plata}] = 221736.5.$$

Como podemos ver, el valor de la conductividad ha aumentado aproximadamente 5 veces con la aplicación de la galvanoplastia.

### 5.5.2. RESONADOR CORTO DE LONGITUD 10MM

En este apartado procederemos de la misma manera que en la línea de transmisión anterior. Primero creamos el diseño en ADS para optimizar y ajustar las variables. Y una vez ajustadas estas variables visualizamos los resultados para comprobar si ambas curvas (simulación y medida real) se corresponden.

En la Gráfica 19 podemos ver los parámetros S de transmisión entre dos puertos. Este resonador produce una resonancia a la frecuencia de 4.79GHz que está desplazada un valor de 0.05GHz con respecto al resonador con pintura de plata sin galvanoplastia.



Gráfica 19. Representación de parámetros S del resonador corto de 10mm de pintura de plata más electroplating.

Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad de la pintura de plata en este resonador de longitud 10mm es:

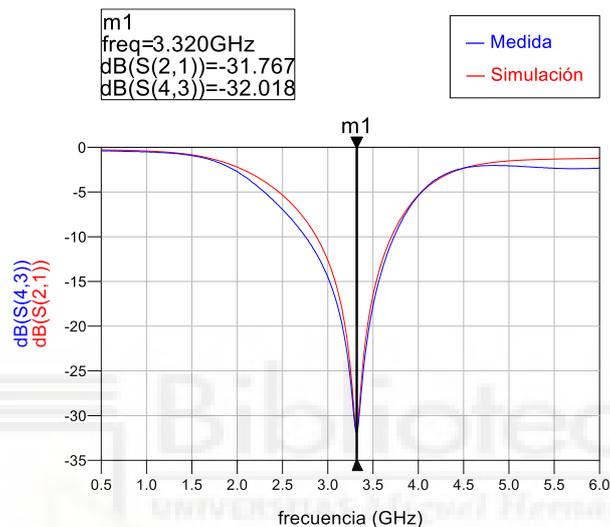
$$\text{Cond[pintura de plata]} = 284718.$$

Como podemos ver, en este caso también, el valor de la conductividad ha aumentado aproximadamente 5 veces con la aplicación de la galvanoplastia.

### 5.5.3. RESONADOR LARGO DE LONGITUD 15MM

Seguimos el mismo procedimiento que en el apartado anterior, con la diferencia de la longitud de los resonadores. Después de optimizar las variables, procedemos a visualizar los resultados obtenidos.

En la siguiente Gráfica 20 podemos ver que el circuito provoca una resonancia a la frecuencia de 3.32GHz que está desplazada 0.12GHz con respecto al resonador fabricado con pintura de plata sin *electroplating*.



Gráfica 20. Representación de parámetros S del resonador largo de 15mm de pintura de plata más electroplating.

Finalmente, el resultado óptimo del valor de la conductividad de la pintura de plata en este resonador de longitud 15mm es:

$$\text{Cond}[\text{pintura de plata}] = 9440000.$$

Como podemos ver, en este caso también, el valor de la conductividad ha aumentado considerablemente con la aplicación de la galvanoplastia.

#### 5.5.4. CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD DE LA PINTURA DE PLATA+GALVANOPLASTIA DE ESPIGAS

Como se ha dicho anteriormente, para el cálculo del valor de la conductividad de la pintura de plata que se ha utilizado se realizará una media de los tres valores obtenidos en los apartados anteriores.

De esta manera, el valor final estimado de la conductividad es:

$$\text{Conductividad[Pintura de plata]} = 3315485 = 3.3E+6 \text{ S/m}$$

Teniendo en cuenta el resultado obtenido y comparándolo con la conductividad del filamento Multi3D, podemos ver que la conductividad de la pintura de plata es cuarenta y cuatro veces mayor que la del filamento:

$$\frac{\text{Cond}[Pintura de plata + galvanoplastia]}{\text{Cond}[Multi3D]} = \frac{3.3E + 6}{7.5E + 4} = 44$$

Por otro lado, si comparamos la conductividad de la pintura de plata antes y después del proceso de galvanoplastia, podemos concluir que con el *electroplating* hemos aumentado la conductividad veintidós unidades más.

$$\frac{\text{Cond}[Pintura de plata + galvanoplastia]}{\text{Cond}[Pintura de plata]} = \frac{3.3E + 6}{1.5E + 5} = 22$$

#### 5.6. CONCLUSIONES

Después de todas las pruebas, medidas y cálculos realizados podemos concluir, por lo tanto, que el uso del material PLA impreso y pintado con pintura de plata galvanizada es la mejor solución en cuanto a la implementación de circuitos eléctricos de alta frecuencia. Esto es debido a que esta solución es la que ofrece una gran conductividad, y en la que el proceso de fabricación y diseño es sencillo e implica pocos materiales e instrumentos, además de la gran ventaja de que los costes son bastante reducidos. En el caso de utilizar el filamento conductor Multi3D tendríamos un coste de 206€ por una bobina de 100 gramos y 17 metros de longitud, mientras que con el uso de la pintura de

plata sería un coste de 134€ por un bote de 5 gramos que es capaz de trazar numerosos circuitos.

Concluido lo anterior, confirmamos que esta será la técnica que utilizaremos en el siguiente capítulo para la fabricación de un circuito más complejo que consistirá en una estructura periódica EBG (*Electronic Band Gap*) con perfil sinusoidal que presenta variaciones en altura. Y posteriormente se realizará otra estructura idéntica con variaciones también en la anchura de las líneas para analizar el efecto que provoca y las ventajas o desventajas que esto produce.



## CAPÍTULO 6. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA

En este capítulo realizaremos en primer lugar el diseño de una estructura periódica EBG (*Electronic Band Gap*) con perfil sinusoidal que presenta variaciones en altura, y posteriormente, mejoraremos los resultados obtenidos con el diseño otra estructura que presenta ambas variaciones en altura y anchura. Estas variaciones provocan cambios en el perfil de impedancias a lo largo de la línea *microstrip*, y esto produce alteraciones en el ancho de la banda de paso. [33] [34]

### 6.1. DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA CON PERFIL SINUSOIDAL QUE PRESENTA VARIACIONES EN ALTURA

Después de haber caracterizado la pintura de plata, podremos diseñar y fabricar una estructura con las dimensiones y forma que deseemos, mientras se cumplan las condiciones requeridas por la impresora 3D en cuanto a tamaño y geometría.

Esta estructura estará fabricada con material PLA sobre el que dibujaremos la línea de transmisión con las mismas dimensiones de anchura y profundidad que se utilizaron para caracterizar la pintura de plata del apartado anterior. También habrá un plano de masa compuesto de una lámina de cobre con espesor  $35\mu\text{m}$  en la cara inferior. Como se ha dicho anteriormente, la figura tendrá un perfil sinusoidal con variaciones en la altura del sustrato, y de esta manera, variará el perfil de impedancias a lo largo de la línea provocando una banda de paso en determinadas frecuencias.

La forma de la estructura será sinusoidal y, además, tendrá los extremos adaptados con una impedancia característica de  $50\Omega$  con las dimensiones adecuadas que permitan posicionar los conectores SMA para realizar posteriormente las medidas con el VNA.

Para la creación de la estructura se utilizará el programa HFSS donde describiremos la forma de onda de la senoide mediante una ecuación cuyos parámetros serán los siguientes: una función seno compuesta por 8 periodos de amplitud 5mm, la longitud será de 160mm a la que se añadirán los extremos planos de 10mm a cada lado y cuyo

espesor será de 0.8mm, el ancho de la línea de transmisión será de 1.3mm con profundidad de 0.2mm (al igual que en el apartado anterior donde se caracterizó la pintura de plata).

Por lo tanto, teniendo en cuenta las especificaciones descritas, el diseño de la estructura tendrá la siguiente forma y dimensiones en milímetros (mm):

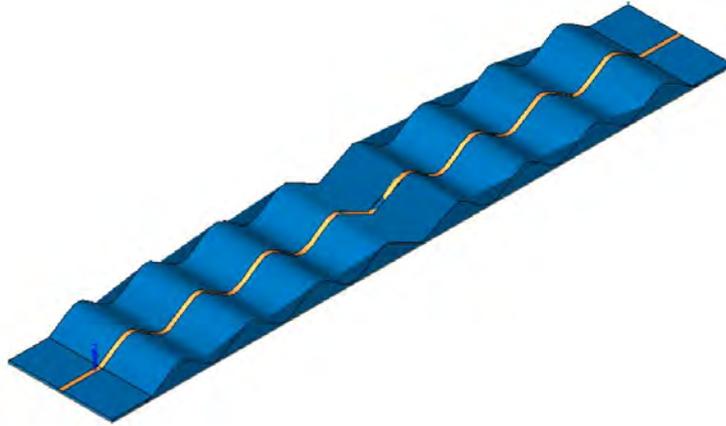


Figura 56. Diseño de estructura EBG con variaciones de altura en EMPro.

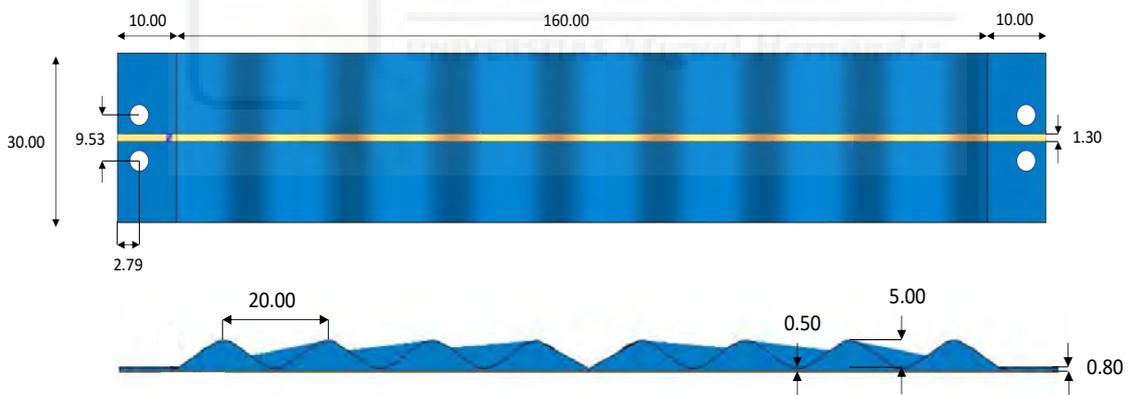
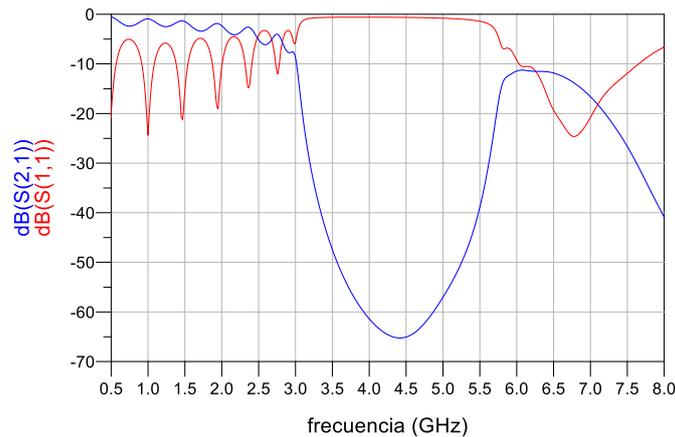


Figura 57. Dimensiones de la estructura EBG con variaciones de altura.

Después de realizar el diseño se simulará en HFSS para visualizar cómo se comporta el circuito diseñado y cómo afecta en él la variación de alturas que se ha implementado.

En la siguiente imagen podemos ver gráficamente la respuesta de nuestro circuito en un rango de frecuencias que va desde 500MHz hasta 8GHz.



Gráfica 21. Representación de la simulación de parámetros S de estructura EBG con variaciones en altura.

Tras analizar la simulación, se puede observar que la estructura periódica produce una banda prohibida o de rechazo a una frecuencia central de 4.5GHz aproximadamente. La frecuencia de corte inferior está en torno a 3GHz, de manera que a partir de esta frecuencia toda la potencia deja de transmitirse al puerto de salida y comienza a reflejarse tal y como indica el parámetro S(1,1) de reflexión. Esto ocurre hasta los 5.7GHz que es el valor de la frecuencia de corte superior que indica donde termina la banda de rechazo y vuelve a comenzar la siguiente banda de paso.

### 6.1.1. PROCESO DE FABRICACIÓN

Para la fabricación de la estructura debemos en primer lugar exportar los archivos al programa Ultimaker Cura para su impresión en la máquina 3D. Esta figura, a diferencia de los circuitos que hemos estado fabricando hasta ahora, es mucho más voluminosa por lo que el tiempo de impresión será mayor, de aproximadamente 3 horas.

Después de haber impreso la figura, se retirará delicadamente de la superficie de impresión haciendo uso de una espátula para despegarla ya que si se extrae bruscamente la figura podrá dañarse o incluso llegar a quebrarse.

Una vez extraída la figura de la impresora 3D, lijaremos la pieza usando un papel de lija para asegurarnos de que tiene un acabado liso y perfecto. A continuación, deberemos rellenar la línea de transmisión con la pintura de plata, y para ello haremos uso de la jeringa empleada en el apartado anterior. Debemos cubrir toda la superficie de la línea de forma uniforme y dejarla secar unos minutos. Posteriormente, metalizaremos la línea

mediante la técnica de la galvanoplastia de espigas que también se utilizó en el apartado anterior.

Después de galvanizar la pieza debemos enjuagarla en agua destilada, ya que el agua común contiene minerales que pueden oxidar el cobre depositado, y la secaremos con un secador de aire frío debido a que el calor puede dañar la pieza. También debemos medir con un multímetro y comprobar que hemos conseguido el menor valor de resistividad posible, que estará en torno a  $0.1-0.2\Omega$ .

Para terminar el proceso de fabricación, debemos pegar una lámina de cobre que representa el plano de masa en la superficie inferior de la pieza. Para ello, cortaremos un fragmento de lámina con las dimensiones de la placa y la pegaremos a ésta utilizando pegamento de barra. Después, posicionamos la placa entre dos láminas de madera sujetadas por un sargento cuya función es hacer presión para que el pegamento quede distribuido de manera uniforme por toda la superficie. Esperaremos un tiempo de 15 minutos y nuestra placa ya estará lista para colocarle los conectores SMA y realizar las medidas necesarias.



Figura 58. Estructura EBG fabricada con variaciones de altura cara top.



Figura 59. Estructura EBG fabricada con variaciones de altura cara bottom.



Figura 60. Estructura EBG fabricada con variaciones de altura vista de perfil.

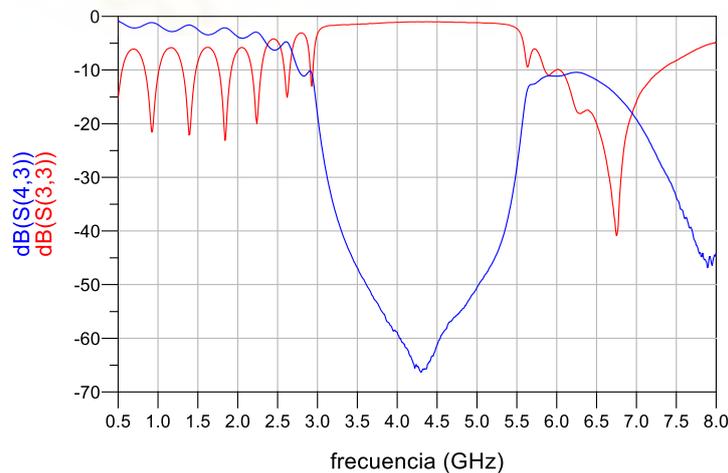
### 6.1.2. PROCESO DE MEDIDA

Para realizar las medidas de esta figura utilizaremos el mismo procedimiento que en los casos anteriores, para ello en primer lugar debemos colocar los conectores SMA y asegurarnos de que existe contacto eléctrico con la línea que deseamos medir. A continuación, conectamos el VNA que está previamente calibrado y medimos los parámetros S de transmisión y de reflexión del circuito.

En la siguiente gráfica podemos ver representados el parámetro  $S(3,3)$  que hace referencia a la reflexión en el puerto de entrada del filtro y  $S(4,3)$  que corresponde a la transmisión que se produce desde el puerto de entrada al de salida. Desde 0.5GHz hasta 3GHz la potencia se refleja en una proporción de una sexta parte, por lo tanto, se produce una banda de paso hasta los 3GHz que corresponde a la frecuencia de corte inferior del Band-Gap. Esta banda de rechazo tiene un ancho de banda de 2.7GHz donde la frecuencia central está en 4.3GHz. A partir de la frecuencia de corte superior (5.7GHz) se encuentra la siguiente banda de paso.

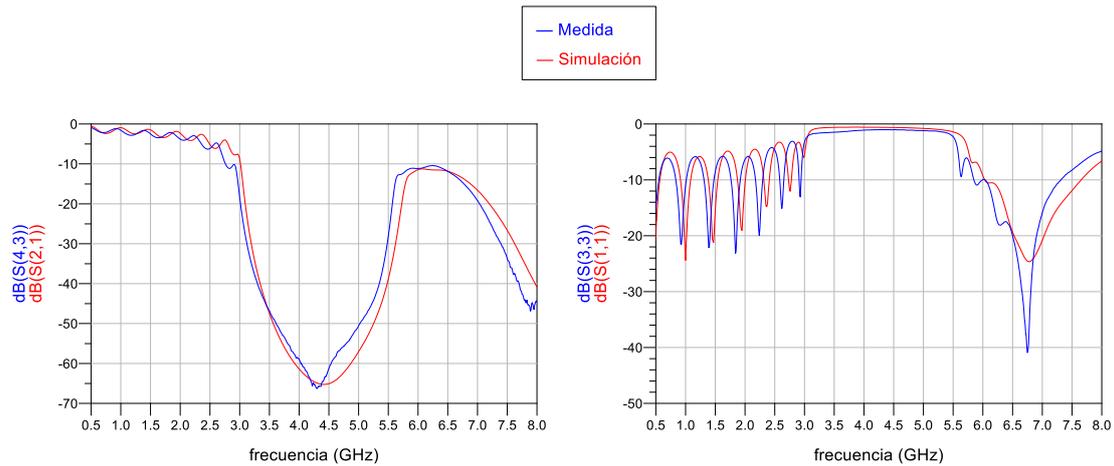
En cuanto a la adaptación del circuito, podemos decir que no se encuentra perfectamente adaptado. De manera que la transmisión de la señal no será óptima.

También podemos predecir que este comportamiento se repite ya que a la frecuencia de 8GHz se produce de nuevo un *Band-Gap*.



Gráfica 22. Representación de la medida de parámetros S de estructura EBG con variaciones en altura.

A continuación, en la siguiente gráfica podemos ver una comparativa de los parámetros de transmisión y reflexión obtenidos en las simulaciones teóricas con respecto a las medidas reales realizadas.



Gráfica 23. Comparativa entre la medida y simulación de la estructura EBG con variaciones de altura.

Finalmente podemos concluir que los resultados medidos sobre el circuito real son los que se esperaban, ya que las curvas tienen comportamientos prácticamente idénticos y esto es debido al acabado perfecto de la pieza de fabricación.

## 6.2. DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA CON PERFIL SINUSOIDAL QUE PRESENTA VARIACIONES EN ALTURA Y ANCHURA

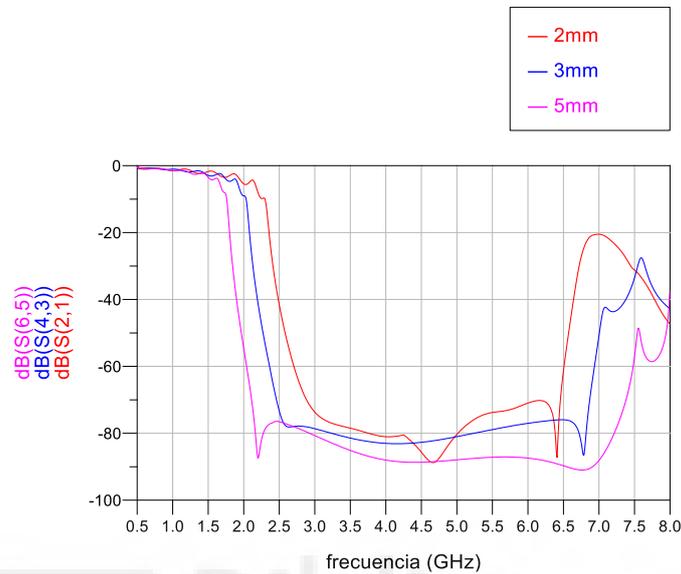
En este apartado pretendemos realizar una mejora del diseño anterior en el que se implementó una estructura sinusoidal con variaciones únicamente en la altura. Para ello, diseñaremos una nueva figura en la que se incluirán cambios en la anchura de la línea, además de las variaciones que provoca la senoide por su forma.

El diseño lo implementaremos en HFSS también, y realizaremos un perfil de variaciones de anchuras con forma sinusoidal. Esto evita los cambios abruptos en los valores de impedancia, permitiendo que el cambio entre la impedancia máxima y mínima se realice progresivamente. Los extremos también estarán adaptados con una impedancia característica de  $50\Omega$ .

Para empezar, debemos escoger el valor máximo de anchura de la línea, es decir, la amplitud de la onda sinusoidal. Para ello realizaremos tres diseños distintos para comprobar cuál de ellos ofrece mejores resultados. El primer diseño estará compuesto

por una línea de transmisión con perfil sinusoidal de amplitud 2mm, el segundo poseerá una amplitud de 3mm y el tercero tendrá un valor de 5mm.

En la Gráfica 24 podemos ver un gráfico de las simulaciones realizadas para cada uno de los circuitos:



Gráfica 24. Comparativa de distintas amplitudes de la estructura EBG.

Como podemos ver en la gráfica anterior, hemos representado los parámetros S de transmisión desde un puerto de entrada a la salida. En ella podemos apreciar que el ancho de la banda de rechazo correspondiente a la figura de 2mm de amplitud es el más pequeño con un valor de 4.37GHz. A continuación, la siguiente curva de color azul corresponde a una amplitud de 3mm y tiene un ancho de banda superior de 5.3GHz. Por último, la curva de color violeta corresponde a una amplitud de 5mm y ofrece un ancho de banda de 5.8GHz.

Con esta comparativa podemos concluir que a medida que aumentamos la amplitud de la onda sinusoidal que conforma la línea de transmisión, se obtienen mejores resultados con un aumento del ancho de la banda de rechazo del circuito. Esto ocurre porque la impedancia de la línea es dependiente de la anchura y la altura, de manera que cuanto más ancha es la línea de transmisión, menor impedancia posee y cuanto más estrecha la línea, mayor impedancia. Y esta variación en mayor medida entre la impedancia mínima y la máxima provoca un ancho mayor de la banda de rechazo.

En cuanto al diseño final lo realizaremos con una amplitud máxima de 5mm. Los extremos están adaptados con una impedancia característica de  $50\Omega$ , de manera que la señal entra con  $50\Omega$  y a continuación tiene una baja impedancia que va aumentando hasta que llega al pico de la sinusoidal en altura, y en ese punto alcanza la máxima impedancia posible. Los parámetros que sigue esta estructura son los siguientes: una función seno compuesta por 8 periodos de amplitud 5mm, la longitud será de 160mm a la que se añadirán los extremos planos de 10mm a cada lado y cuyo espesor será de 0.8mm, el ancho de la línea de transmisión irá variando según otra función seno donde la amplitud de onda máxima es de 5mm y la mínima de 1mm. Además, al igual que en los casos previos, la línea de transmisión tendrá una profundidad constante de 0.2mm.

Por lo tanto, teniendo en cuenta las especificaciones descritas, el diseño de la estructura tendrá la siguiente forma:

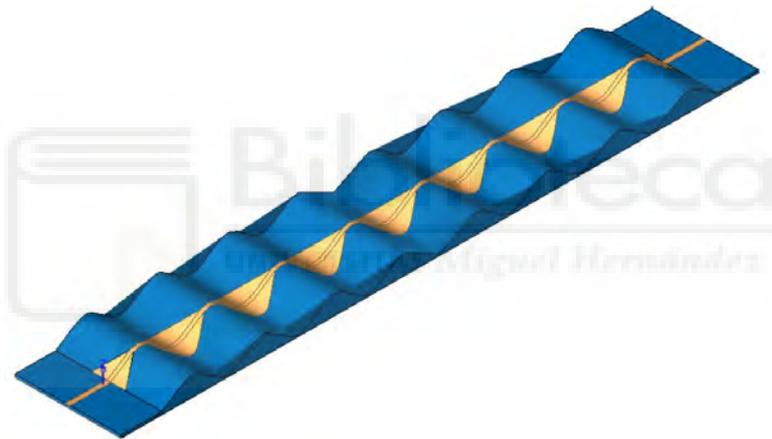


Figura 61. Diseño de estructura EBG con variaciones de altura y ancho en EMPro.

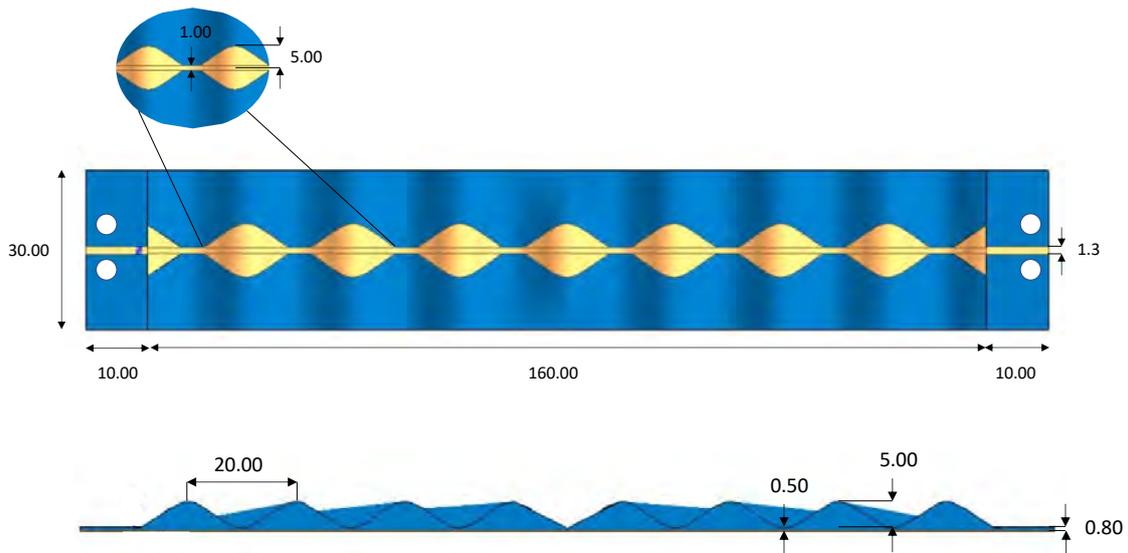
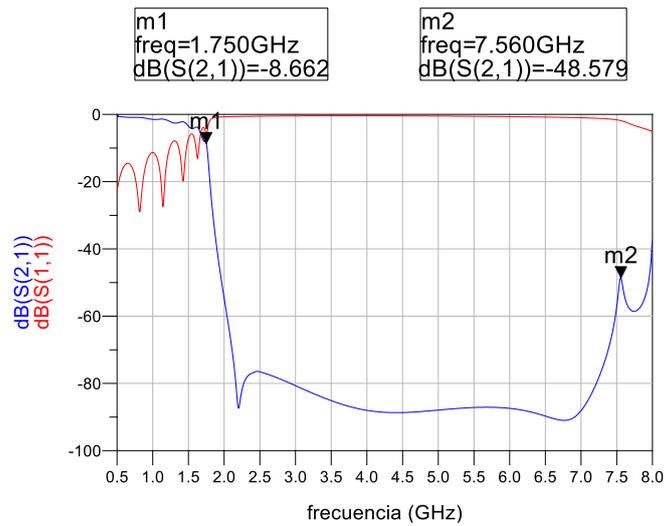


Figura 62. Dimensiones de la estructura EBG con variaciones de altura y ancho.

Después de realizar el diseño se simulará en HFSS para visualizar cómo se comporta el circuito diseñado y cómo afecta en él la variación de altura más anchura que se ha implementado.

En la siguiente gráfica podemos ver el comportamiento del circuito en un rango de frecuencias que va desde 500MHz hasta 8GHz. En él se puede observar que la estructura periódica produce una amplia banda prohibida o de rechazo en la que a partir de la frecuencia de corte inferior en 1.75GHz toda la potencia deja de transmitirse al puerto de salida y comienza a reflejarse hasta la frecuencia de corte superior situada en 7.56GHz. De esta manera, el ancho de banda del *Band-Gap* producido será de 5.8GHz. Si realizamos una comparación este resultado con el apartado anterior (donde la estructura EBG no tiene cambios en anchura) podemos concluir que se ha duplicado el ancho de la banda de rechazo pasando de 2.7GHz a 5.8GHz. Además, también se producen mejoras en el parámetro S(1,1) de reflexión ya que en este caso el parámetro S(1,1) es inferior a -10dB.



Gráfica 25. Representación de la simulación de parámetros S de estructura EBG con variaciones en altura y ancho.

### 6.2.1. PROCESO DE FABRICACIÓN

En este apartado se procederá exactamente de la misma manera que en el apartado 6.1.1 para el proceso de fabricación de la pieza.

Los resultados obtenidos son los siguientes:



Figura 63. Estructura EBG fabricada con variaciones de altura y ancho cara top.



Figura 64. Estructura EBG fabricada con variaciones de altura y ancho cara bottom.

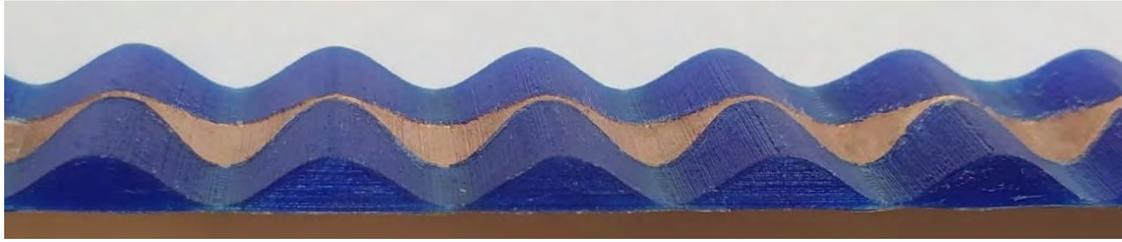


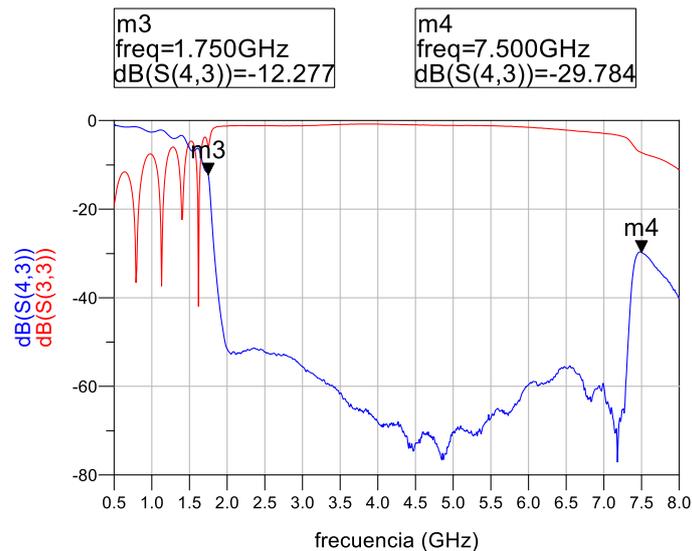
Figura 65. Estructura EBG fabricada con variaciones de altura y ancho vista de perfil.

### 6.2.2. PROCESO DE MEDIDA

Para realizar las medidas de esta figura utilizaremos el mismo procedimiento que en los casos anteriores, para ello en primer lugar debemos colocar los conectores SMA y asegurarnos de que existe contacto eléctrico con la línea que deseamos medir. A continuación, conectamos el VNA que está previamente calibrado y medimos los parámetros S de transmisión y de reflexión del circuito.

En la siguiente gráfica podemos ver representados el parámetro  $S(3,3)$  que hace referencia a la reflexión en el puerto de entrada del filtro y  $S(4,3)$  que corresponde a la transmisión que se produce desde el puerto de entrada al de salida. Desde 0.5GHz hasta 1.75GHz la potencia se refleja en una proporción de una décima parte, por lo tanto, se produce una banda de paso hasta 1.75GHz que corresponde a la frecuencia de corte inferior del *Band-Gap*. Esta banda de rechazo tiene un ancho de banda de 5.75GHz. A partir de la frecuencia de corte superior (7.5GHz) se encuentra la siguiente banda de paso.

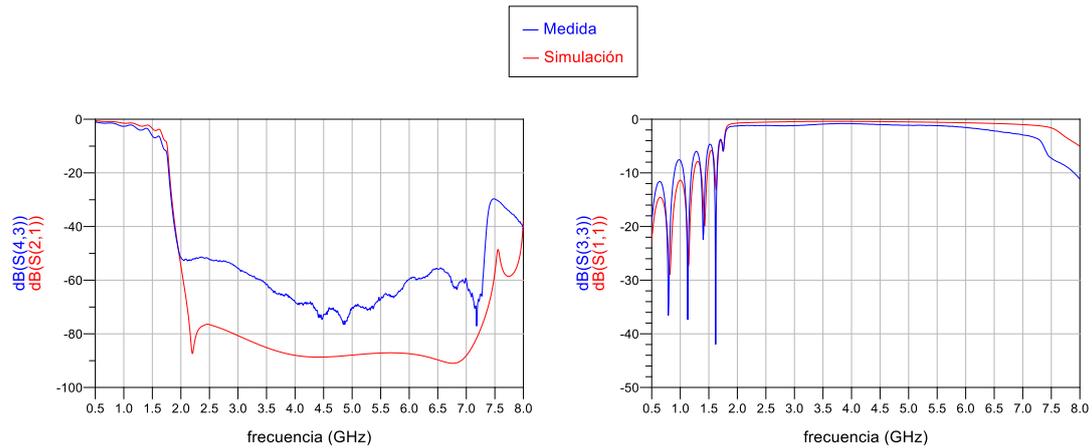
En cuanto a la adaptación del circuito, podemos decir que a diferencia del circuito EBG anterior que estaba desadaptado, nos encontramos con una mejora de este parámetro, ya que en este nuevo circuito se reduce la reflexión provocando una mejor adaptación.



Gráfica 26. Representación de la medida de parámetros S de estructura EBG con variaciones en altura y ancho.

A continuación, visualizaremos una comparativa donde incluiremos por un lado los resultados de las simulaciones iniciales y, por otro lado, las medidas reales realizadas sobre el circuito fabricado. De esta manera, podremos ver que tan influyente es la precisión en el proceso de fabricación, y también, la existencia de parásitos que provocan pérdidas en el proceso de medida.

Como podemos ver en la siguiente figura, los resultados de ambas curvas son bastante similares, en la gráfica de la izquierda tenemos representados los parámetros S de transmisión donde se puede apreciar que, tanto en la simulación como en la medida, el ancho de banda de la banda de rechazo es prácticamente el mismo, con una diferencia mínima de 0.06GHz (debido a que la frecuencia de corte superior en la simulación es de 7.56GHz y en la medida disminuye a 7.5GHz). Por otro lado, en la gráfica de la derecha tenemos representamos los parámetros S de reflexión donde los resultados también son sumamente similares, aunque se puede apreciar que en el caso de las medidas reales se produce una reflexión mayor que en la simulación debido a los parásitos que provocan los conectores de medida, a la precisión en las dimensiones de la pieza y su acabado, etc.



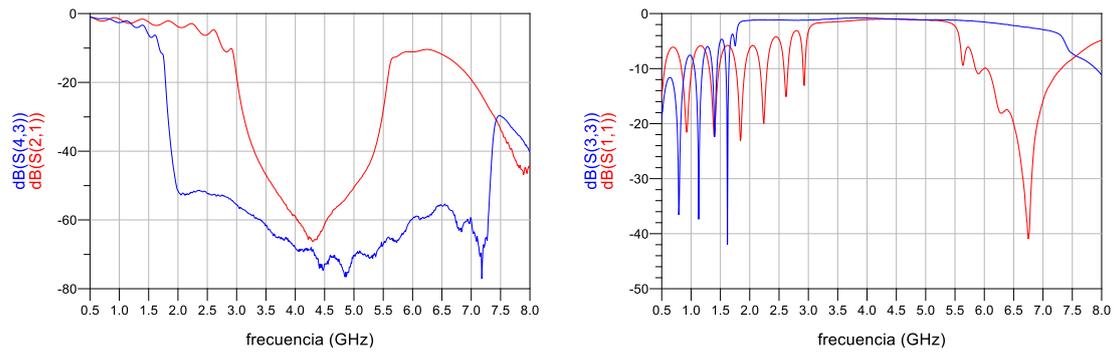
Gráfica 27. Comparativa entre la medida y simulación de la estructura EBG con variaciones de altura y ancho.

Podemos concluir, por lo tanto, que el diseño de la estructura periódica EBG que se ha fabricado cumple con todas las expectativas deseadas, ya que la respuesta del circuito se adapta perfectamente a las simulaciones previas realizadas.

### 6.3. COMPARATIVA Y CONCLUSIONES

En este apartado realizaremos una comparación entre las dos estructuras periódicas que se han fabricado anteriormente. Para ello, incluiremos los gráficos que contienen los parámetros S que se han podido medir a través del VNA.

Como podemos ver en la siguiente figura hemos representado las respuestas de ambos filtros. En ella, las curvas de color rojo hacen referencia al primer filtro donde solo se producen variaciones en la altura, y las curvas de color azul pertenecen al segundo filtro donde se producen variaciones en la altura además de cambios en la anchura de la línea. En el gráfico de la izquierda tenemos representados los parámetros S de transmisión donde se ve claramente que con el segundo filtro hemos conseguido ampliar el ancho de banda del *Band-Gap*. Esta mejora se puede apreciar también en el gráfico de la derecha donde hemos representado los parámetros S de reflexión. La curva de color azul nos indica que al inicio se produce una menor reflexión de la potencia con respecto a la curva de color rojo, de manera que el circuito está mejor adaptado.



Gráfica 28. Comparativa de las medidas de ambas estructuras EBG.

Podemos concluir, por lo tanto, que la segunda estructura EBG ofrece mejores resultados que la primera por el simple hecho de incluir en ella variaciones en el ancho de la línea de transmisión. Como hemos dicho anteriormente, estos cambios en el ancho suponen una variación de la impedancia que en mayor medida provoca un ancho de banda de rechazo mayor.



## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado se explicarán las conclusiones obtenidas del proyecto una vez finalizado. Además, se comentarán las líneas futuras de investigación tomando como base las conclusiones obtenidas.

### 7.1. CONCLUSIONES DEL PROYECTO

Inicialmente, el objeto de estudio de este Trabajo Fin de Grado era caracterizar un nuevo filamento 3D conductor con el fin de determinar si es una buena solución para la fabricación de circuitos de microondas. Para ello se han diseñado unos circuitos simples de Test compuestos por una línea de transmisión que permitirá calcular la tangente de pérdidas del material y dos resonadores de distinta longitud que permiten calcular la permitividad relativa a dos frecuencias diferentes. Después de las medidas y ajustes necesarios, se ha conseguido caracterizar correctamente el material obteniendo una conductividad de valor  $7.5E+4$  S/m, que supone una conductividad 1000 veces menor que la del cobre siendo ésta de  $5.8E+7$  S/m. De esta manera, se investigaron otras soluciones que puedan ofrecer mejores resultados de conductividad reduciendo las pérdidas en los circuitos diseñados.

A continuación, se ha descubierto otro material conductor que será la pintura de plata, que tras ser caracterizada utilizando también los circuitos simples de Test, ofrece un valor de conductividad de  $1.5E+5$  S/m. Este valor obtenido se mejoró mediante la aplicación de la técnica de galvanoplastia de espigas a través de la cual se deposita cobre sobre la pintura de plata metalizando toda la superficie de las líneas. De esta manera, la conductividad aumenta a un valor de  $3.3E+6$  S/m. Este valor se considera suficientemente válido para el correcto funcionamiento de los circuitos de microondas que se diseñarán posteriormente, ya que la resistividad es mínima y las pérdidas se reducen en gran medida.

Por último, tras haber caracterizado la pintura de plata, hemos diseñado y fabricado una estructura periódica de perfil sinusoidal que presenta variaciones en la altura y en la cual el ancho de la línea de transmisión es constante. Esta estructura tiene el comportamiento

de un filtro rechaza banda donde el ancho de banda es de 2.7GHz. A continuación, con el fin de seguir mejorando el comportamiento del circuito se diseña una segunda estructura periódica de perfil sinusoidal también, pero en este caso además de presentar variaciones en altura, también presenta variaciones en el ancho de la línea de transmisión. De esta manera, con las variaciones de los anchos estamos modificando la impedancia de la línea y provocando un ancho de banda mayor. Después de realizar diversos diseños para obtener el óptimo, se ha conseguido ampliar la banda de rechazo a un valor de 5.75GHz.

Con este proyecto podemos concluir, que el uso de impresoras 3D abre un mundo infinito de posibilidades en este sector, ya que permite fabricar cualquier circuito de alta frecuencia con la geometría, dimensiones, materiales y características que el ingeniero desee, siempre y cuando sea capaz de diseñarlo previamente mediante un software de simulación. Además, algunas de las ventajas más importantes de la fabricación aditiva 3D son la rapidez en el proceso de fabricación, la facilidad de manejo que proporciona y el bajo coste que supone, pudiendo fabricar grandes circuitos con un solo instrumento: la máquina 3D.

## 7.2. LÍNEAS FUTURAS

Una vez finalizado el proyecto y analizados los resultados, se presenta la posibilidad de mejorar algunos aspectos de este, para lo que propondremos una serie de líneas futuras de investigación que pueden dar continuidad a este Trabajo Fin de Grado.

En primer lugar, en cuanto al diseño de las líneas *microstrip* las hemos diseñado siempre posicionando el plano de masa en la parte inferior. Sin embargo, si lo modificamos ubicándolo por encima de la línea de transmisión conseguiríamos reducir las pérdidas realizando una línea de *microstrip* invertida. Esto se debe a que los campos se propagarán por el aire que posee una constante dieléctrica  $\epsilon_r=1$  que es menor a la constante dieléctrica del material PLA que tiene un valor de  $\epsilon_r=2.8$ .

El diseño y fabricación de esta nueva técnica es aparentemente más complicada, pero con ella conseguiríamos mejorar las respuestas de los circuitos reduciendo las pérdidas.

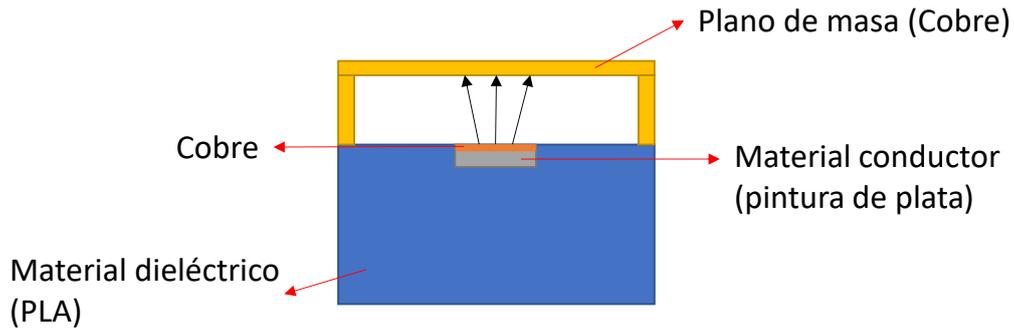


Figura 66. Diseño de línea microstrip con plano de masa superior.

En segundo lugar, podríamos mejorar la adaptación de la banda no atenuada mediante el uso de técnicas de apodización. Estas técnicas consiguen mejorar la adaptación de la banda de paso de la estructura periódica, suavizando la variación en amplitud de los distintos periodos. [35]

Por último, una línea futura sería investigar nuevas pinturas de plata en el mercado. Como hemos podido ver durante el desarrollo del proyecto, es importante que el material empleado tenga un alto valor de conductividad, de manera que cuanto más conductiva sea la pintura empleada, menores pérdidas ocasionará en el circuito provocando una respuesta óptima del mismo.

## ANEXOS

### ANEXO A: PROCESO DE CALIBRADO Y MANTENIMIENTO DE LA IMPRESORA 3D

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta antes de comenzar a imprimir las piezas en la máquina 3D es comprobar el calibrado de la misma. Para ello, en primer lugar, debemos realizar la nivelación de la cama de impresión, de manera que ordenaremos (a través del menú de la pantalla de control) a la impresora que lleve todos los ejes a la posición de origen o “*Auto Home*”, que es desde donde comienzan todas las impresiones. Una vez realizado esto, debemos poner una hoja de papel de 80g/m<sup>2</sup> entre la boquilla y la cama de impresión e iremos regulando la altura de la cama de forma que podamos pasar la hoja sin dificultad, pero con cierta resistencia. Después debemos repetir este procedimiento situando el cabezal de la impresora en distintos puntos de la cama de impresión (tres o cuatro puntos diferentes serán suficientes) para proporcionar una base de impresión plana y nivelada.

Después de ajustar la cama de impresión con respecto al eje Z debemos calibrar los ejes de movimiento y el flujo de impresión. Estas características dependen del material que se vaya a utilizar para la impresión, de manera que cuando cambiemos el filamento, debemos volver a realizar el ajuste. Para ello, un clásico de calibración es la fabricación de un cubo de dimensiones 1 x 1 x 1cm, y una vez impreso se mide con un pie de rey para comprobar las dimensiones reales y ajustar los parámetros de impresión (posiciones de los ejes, flujo de impresión, etc).

Por último, cabe destacar que el buen mantenimiento de la impresora también es un aspecto importante para la obtención de figuras con un acabado perfecto. Por ello, debemos mantener la cama de impresión y la boquilla del extrusor limpias de impurezas. [36]

# ANEXO B: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LOS CONECTORES SMA

DWG No.: **91Y60930**

NOTE: Information herein is believed by Southwest Microwave, Inc. to be accurate. However, Southwest Microwave assumes no responsibility for any omissions or errors or inaccuracies for its use or for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Data is intended for informational purpose only and does not constitute a contract of sale or any express or implied warranty, including any warranty of merchant ability or fitness for a particular purpose.

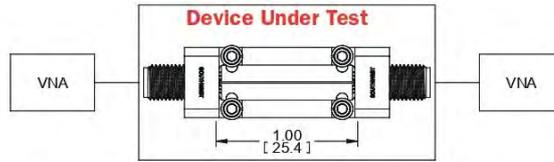
Model	Ø A	Ø B	Ø C	D
292-04A-6	.010	.020	.0635	.050
292-05A-6	.007	.015	.0480	.030
292-06A-6	.007	.012	.0390	.030
292-07A-6	.005	.009	.0290	.030

ITEM	MATERIAL & FINISH
HOUSING:	STEEL, CRES ALLOY UNS-30300 PER ASTM A582, PASSIVATED PER ASTM A967-99
CONTACT:	BeCu UNS-C17300 PER ASTM B196, GOLD PLATE PER MIL-DTL-45204
DIELECTRIC:	VIRGIN PTFE FLUOROCARBON PER ASTM D1710 TYPE 1, GRADE 1, CLASS B
CAPTURE BEAD:	ULTEM 1000 PER ASTM D5205
<b>SMA CONNECTOR</b>	
TRANSITION BLOCK, GROUNDING PLATE, THREADED CLAMPING PLATE	C360 BRASS ALLOY UNS-C36000 PER ASTM B16, NICKEL PLATE PER AMS 2404B
LAUNCH PIN:	BeCu UNS-C17300 PER ASTM B196, GOLD PLATE PER MIL-DTL-45204
TRANSITION BLOCK, DIELECTRIC:	VIRGIN PTFE FLUOROCARBON PER ASTM D1710, TYPE 1, GRADE 1, CLASS B
<b>TRANSITION BLOCK</b>	

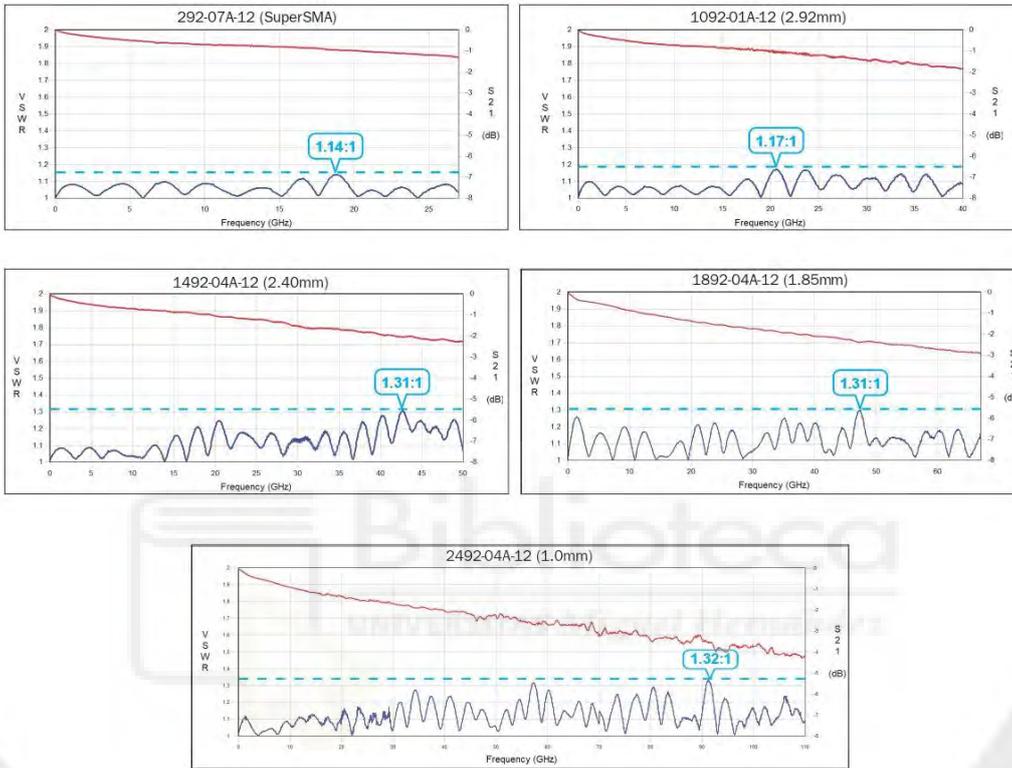
1. ALL DIMENSIONS ARE IN INCHES. ALL ANGLES ARE IN DEGREES. DIMENSIONS SHOWN IN BRACKETS [XXX] ARE IN MILLIMETERS. NOTES: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED.

REV. A	RELEASE	APRVD.	DATE:	TITLE
				<b>SMA JACK (FEMALE) END LAUNCH CONNECTOR LOW PROFILE</b>
		Southwest Microwave, Inc. 9055 South McKerny Street Tempe, Arizona 85284-2946 Telephone (480) 783-0201 Fax (480) 783-0360		DRN BY: EAG DATE: 09/26/12 SHEET: 1 OF 1
			DWG NO. <b>91Y60930</b>	REV. <b>A</b>

TYPICAL TEST DATA



Typical test data shown below represent two End Launch Connectors mounted on 1-inch long test board as shown in the set-up above.



2 0 2 1 - 2 0 2 2

THE PERFORMANCE LEADER IN  
**MICROWAVE CONNECTORS**



©2021 | Southwest Microwave, Inc. | Tempe, Arizona, USA | +1 (480) 783-0201 | southwestmicrowave.com

# ANEXO C: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LA PINTURA DE PLATA



## Technical Data Sheet

Rev. K (5/19) Page 1 of 2

### CircuitWorks® Conductive Pens & Paint

Product# CW2200STP, CW2200MTP, CW2205

#### Product Description

CircuitWorks® Conductive Pens and Paint make instant highly conductive silver traces on circuit boards and are used in prototype, rework, and repair of circuit boards by linking components, repairing defective traces, making smooth jumpers and patching EMI shielding. The silver traces dry in minutes and have excellent adhesion to most electronic materials. Engineers, repair technicians, and manufacturers will find that the CircuitWorks Conductive Pens and Paint speed project completion and cuts rework time.

- Single component system
- High electrical conductivity
- Fast drying
- Highly adherent to circuit boards
- Operating temperature to 400°F (205°C)

#### Typical Applications

CircuitWorks Conductive Pens & Paint may be used for electronics applications including:

- Circuit trace repair
- Solderless linking of components
- EMI shielding
- Solderable terminations
- Quick prototype modifications

#### Compatibility

CircuitWorks conductive material has excellent compatibility with materials used in printed circuit board fabrication. As with any chemical system, compatibility with the substrate must be determined on a non-critical area prior to use.



#### Typical Product Data and Physical Properties

<b>COMPOSITION:</b>	
Material:	Silver Filled Polymer
Silver Concentration:	55% +/-2%
Silver Particle Size:	<20 microns
Color:	Silver Gray
Settle Rate:	< 2mm/hr.
<b>PROPERTIES:</b>	
Conductivity:	0.02-0.05 ohms/sq/mil 0.00005-0.000125 ohm cm
Max. Temperature:	400°F (205°C)
Tack-Free Time: @25°C	3 to 5 minutes
Full Cure Time: @25°C	20 to 30 minutes
Solder Wetting:	2 to 3 seconds
Electrical Conductivity:	Excellent
Adhesion:	Excellent
Flexibility:	Good
Chemical Resistance:	Good
<b>Tip Diameters:</b>	
MTP:	0.8 mm (0.03 inches)
STP:	1.2 mm (0.05 inches)
Shelflife	15 months
RoHS Compliant	Yes



1-770-424-4888 • www.chemtronics.com

## CircuitWorks® Conductive Pens & Paint

Product# CW2200STP, CW2200MTP, CW2205

### Usage Instructions

*For industrial use only. Read SDS carefully prior to use.*

**Cleaning:** For best adhesion, clean board with one of Chemtronics Electro-Wash or Pow-R-Wash solvents in order to remove any surface contamination which may prevent adequate material contact.

**Mixing:** Although this system has been formulated to resist hard-packing, it should be shaken vigorously for 30 seconds to insure the proper dispersion of the silver flakes. If pen has been allowed to sit idle for a long period of time, the mixing ball may seize in the barrel. To free the ball use force to tap the barrel end of the pen until the ball begins to move inside the pen.

### Application:

**Pen (CW2200 STP/MTP) -** Squeeze the pen body while pressing down on the surface to allow the material to flow, enabling the trace to be drawn. Practice with the pen before attempting detail work.



**Bottle (CW2205) -** The bulk form of this material may be applied with a brush, pick, or swab.



**Thinning:** The conductive ink has been optimized for the CircuitWorks Conductive Paint and thinning is not normally necessary. However, Butyl Acetate may be added with thorough mixing to make slight adjustments for ease of application.

**Clean-up/Removal:** The conductive ink may be cleaned or removed using a strong organic solvent such as Chemtronics Electro-Wash PX

**Curing:** Tack-free in 3 to 5 minutes at room temperature. Achieves electrical conductivity within 30 minutes. Heat cure for 5 minutes at 250 to 300°F (120 to 150°C) for maximum conductivity, durability and chemical resistance.

**Soldering:** Low temperature soldering is possible to the *heat-cured* silver conductive traces if done at 350°F (177°C) for <5 seconds.

### Availability

**CW2200STP** 8.5 g (0.3 oz.) pen, Standard 1.2 mm tip  
**CW2200MTP** 8.5 g (0.3 oz.) pen, MicroTip 0.8 mm tip  
**CW2205** 5 g (0.18 oz) bottle, 1 pick, 2 brushes & 2 swabs

### Technical and Application Assistance

Chemtronics provides a technical hotline to answer your technical and application related questions.

*The toll free number is: 1-800-TECH-401.*

### Note:

This information is believed to be accurate. It is intended for professional end users having the skills to evaluate and use the data properly. CHEMTRONICS does not guarantee the accuracy of the data and assumes no liability in connection with damages incurred while using it.

Chemtronics®, Electro-Wash® and CircuitWorks® are registered trademarks of Chemtronics. All rights reserved.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] García-Martínez H;Ávila-Navarro E;Torregrosa-Penalva G;Rodríguez-Martínez A;Blanco-Angulo C;de la Casa-Lillo M; (no date) Low-cost additive manufacturing techniques applied to the design of planar microwave circuits by fused deposition modeling, *Polymers*. U.S. National Library of Medicine. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32872172/> (Accessed: May 2022).
- [2] abax3d (2022) La Historia de la Impresora 3D: Los Orígenes de las primeras máquinas, Abax Innovation Technologies. Available at: <https://abax3dtech.com/2020/07/24/historia-de-la-impresora-3d/> (Accessed: October 2022).
- [3] Moya, R. (2019) La Historia de la impresión 3D, Bitfab. Available at: <https://bitfab.io/es/blog/historia-impresion-3d/> (Accessed: October 2022).
- [4] S., S. (2022) FDM O modelado por deposición fundida, Te Explicamos Todo!, 3Dnatives. Available at: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/#!> (Accessed: October 2022).
- [5] Impresión 3D para la personalización de medicamentos ... - UPV/EHU (no date). Available at: [https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/54286/TFG\\_Huidobro.pdf?sequence=1](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/54286/TFG_Huidobro.pdf?sequence=1) (Accessed: October 2022).
- [6] impresoras3d.com (2020) ▷Filamento Pla para impresoras 3D - Trucos, consejos y características, impresoras3d.com. Available at: <https://www.impresoras3d.com/filamento-pla-consejos-caracteristicas-y-muchomas/> (Accessed: October 2022).
- [7] Los Mejores Filamentos Para impresoras 3D de 2022 (2022) All3DP. Available at: <https://all3dp.com/es/1/filamento-3d-filamento-impresora-3d/> (Accessed: October 2022).
- [8] impresion3d (no date) Pet impresión 3D: Qué Es y todo lo que debes de sabe sobre ella, MANUFACTURAS DE PRECISIN I3D SERVICIO DE IMPRESIN 3D. Available at: <https://impresioni3d.com/pet-impresion-3d/#:~:text=Cuando%20se%20trata%20de%20PET,%C2%B0%20y%20250%C2%B0%20C.> (Accessed: October 2022).
- [9] M., A. (2022) ¿Qué características tiene el nylon en la impresión 3D?, 3Dnatives. Available at: <https://www.3dnatives.com/es/caracteristicas-tiene-nylon-en-impresion-3d-120320202/#!> (Accessed: October 2022).
- [10] Electrifi conductive filament (2022) Multi3D. Available at: <https://www.multi3dllc.com/product/electrifi/> (Accessed: October 2022).

- [11] C., L. (2022) Tipos de impresoras 3D FDM: Delta, cartesiana, Polar y Brazo Robótico, 3Dnatives. Available at: <https://www.3dnatives.com/es/tipos-impresoras-3d-fdm-190620172/> (Accessed: October 2022).
- [12] 3Daily, P.porI. (2016) Ultimaker 2, 3d con Capas Inapreciables, impresion3daily.es. Available at: <https://www.impresion3daily.es/ultimaker-2-la-impresora-con-capas-inapreciables/> (Accessed: October 2022).
- [13] Anycubic Kossel Impresora 3D Inacabada de Versión de Polea Actualizada: Gearbest España (no date) Gearbest. Available at: [https://es.gearbest.com/3d-printers-3d-printer-kits/pp\\_640022.html](https://es.gearbest.com/3d-printers-3d-printer-kits/pp_640022.html) (Accessed: October 2022).
- [14] R/3dprinting - Polar 3D: What are the benefits of a Polar FDM 3D printer, as opposed to Cartesian or Delta? (no date) reddit. Available at: [https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/44wykr/polar\\_3d\\_what\\_are\\_the\\_benefits\\_of\\_a\\_polar\\_fdm\\_3d/](https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/44wykr/polar_3d_what_are_the_benefits_of_a_polar_fdm_3d/) (Accessed: October 2022).
- [15] M., A. (2020) Creality Lanza La Impresora 3d Con Cinta Transportadora para la impresión continua de Piezas, 3Dnatives. Available at: <https://www.3dnatives.com/es/creality-3dprintmill-cinta-transportadora-151220202/#!> (Accessed: October 2022).
- [16] Guía sobre impresión 3D por estereolitografía (SLA) de 2020 (no date) Formlabs. Available at: <https://formlabs.com/es/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/> (Accessed: October 2022).
- [17] 3D Newworld (2018) La Guía de impresión de estereolitografía (SLA) en 3d, 3D Newworld. 3D Newworld. Available at: <https://3dnewworld.com/la-guia-de-impresion-de-estereolitografia-sla-en-3d/> (Accessed: October 2022).
- [18] P., M. (2022) What is the difference between SLA and MSLA 3D printing?, 3Dnatives. Available at: <https://www.3dnatives.com/en/difference-between-sla-and-msla-020820224/> (Accessed: October 2022).
- [19] Sla O DLP: Guía comparativa de impresoras 3D de resina (no date) Formlabs. Available at: <https://formlabs.com/es/blog/comparacion-impresoras-3d-resina-sla-dlp/> (Accessed: October 2022).
- [20] Impresión 3D Y Discapacidad (no date) Agredace. Available at: <https://agredace.es/impresion-3d-y-discapacidad> (Accessed: October 2022).
- [21] Guía de impresión 3d mediante sinterizado selectivo por láser (SLS) (no date) Formlabs. Available at: <https://formlabs.com/es/blog/que-es-sinterizado-selectivo-laser/> (Accessed: October 2022).

- [22] Park, R. (2018) How the next gen of affordable systems is making PBF 3D printing available to all, 3D Printing Media Network - The Pulse of the AM Industry. Available at: <https://www.3dprintingmedia.network/3d-printing-benchtop-sls-rachel-park/> (Accessed: October 2022).
- [23] Regidor, P.porA. (2016) Electrifi, El filamento para hacer tus Circuitos Impresos, impresion3daily.es. Available at: <https://www.impresion3daily.es/electrifi-el-filamento-para-hacer-tus-circuitos-impresos/> (Accessed: October 2022).
- [24] Impresora 3D BQ Hephestos, volumen de Impresión 215 x 210 x 180mm (no date) RS. Available at: <https://es.rs-online.com/web/p/impresoras-3d/1362761> (Accessed: October 2022).
- [25] Fabrication (no date) Antennas & Propagation Lab. Available at: <https://gre.webs.upv.es/fabrication/> (Accessed: October 2022).
- [26] Künzl, P. (2017) Galvanoplastia de Espigas "Galvanopen" - kit básico, Tifoo Shop - Galvanotecnia. Available at: <https://www.tifoo.de/es/galvanoplastia-de-espigas-galvanopen-kit-basico> (Accessed: November 2022).
- [27] Dino-Lite Digital Microscope and stand (no date) Stuller, Inc. Available at: <https://www.stuller.com/products/29-1501/?groupId=99096> (Accessed: October 2022).
- [28] Keysight (2021) E8363B PNA network analyzer, 10 MHz to 40 GHz [obsolete], Keysight. Available at: <https://www.keysight.com/zz/en/product/E8363B/pna-series.html> (Accessed: October 2022).
- [29] 292-04A-6, SMA Female End Launch Connector - Standard Block (.500) (no date) HASCO COMPONENTS. Available at: <https://www.hasco-inc.com/connectors/292-04a-6-sma-27ghz-female-end-launch-low-profile/> (Accessed: October 2022).
- [30] The performance leader in microwave connectors - southwest microwave (no date). Available at: <https://mpd.southwestmicrowave.com/wp-content/uploads/2021/06/End-Launch-Test-Data.pdf> (Accessed: October 2022).
- [31] Jeringuilla Pintura conductora plata - 0.5ML (no date) Planetaelectronico.com - Tienda Electrónica online. Available at: <https://www.planetaelectronico.com/jeringuilla-pintura-conductora-plata-05ml-p-18463.html> (Accessed: September 2022).
- [32] Dielectric characterization of polylactic acid substrate in the ... (no date). Available at: [https://www.researchgate.net/publication/323978065\\_Dielectric\\_Characterization\\_of\\_Polylactic\\_Acid\\_Substrate\\_in\\_the\\_Frequency\\_Band\\_05-67\\_GHz](https://www.researchgate.net/publication/323978065_Dielectric_Characterization_of_Polylactic_Acid_Substrate_in_the_Frequency_Band_05-67_GHz) (Accessed: May 2022).

- [33] Fully 3D printed high performance band-stop filters enabled by three ... (no date). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-8585/ac825a> (Accessed: July 2022).
- [34] J. Hester, E. Nguyen, J. Tice and V. Radisic, "A novel 3D-printing-enabled "roller coaster" transmission line," *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2017, pp. 2639-2640, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073362.
- [35] H. García-Martínez, G. Torregrosa-Penalva, E. Àvila-Navarro, N. Delmonte, L. Silvestri and M. Bozzi, "3D-Printed Electromagnetic Band-Gap Band-Pass Filter Based on Empty Single-Ridge Waveguide," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 53954-53962, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3175868.
- [36] Bercial, J. (2022) Cómo calibrar nuestra impresora 3D - guía, GEEKNETIC. GEEKNETIC. Available at: <https://www.geeknetic.es/Guia/2285/Como-calibrar-nuestra-impresora-3D.html> (Accessed: November 2022).

