

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN



" DISEÑO Y FABRICACIÓN DE
CIRCUITOS DE MICROONDAS MEDIANTE
TÉCNICAS DE ESTEREOLITOGRAFÍA E
IMPRESIÓN 3D "

TRABAJO FIN DE GRADO

Junio - 2021

AUTOR: Ángela E. Ortega Argüello

DIRECTOR: Germán Torregrosa Penalva

CODIRECTOR: Héctor García Martínez



*“Don’t stop when you’re tired,
stop when you’re done”*





RESUMEN

El objeto de estudio de este proyecto se basa en la puesta en marcha de una nueva tecnología de impresión 3D para la fabricación de sustratos de alta frecuencia: la estereolitografía. Esta tecnología emplea como material resina fotosensible que se solidifica mediante una matriz de luces LED capa a capa. Además, diseñaremos y fabricaremos unos circuitos sencillos de test para la caracterización de la resina (constante dieléctrica y tangente de pérdidas) mediante la puesta en marcha de una estación de puntas para la medición de las respuestas. Finalmente, conociendo el comportamiento del material, mostraremos el potencial que tiene el uso de esta tecnología creando una estructura periódica con un perfil sinusoidal de alturas.

Palabras clave: impresión 3D, estereolitografía, fabricación circuitos de microondas, caracterización de materiales.





ABSTRACT

The object of study of this project is based on the implementation of a new 3D printing technology for the manufacture of high frequency substrates: stereolithography. This technology uses photosensitive resin as a material that is solidified by a layer-by-layer matrix of LED lights. In addition, we will design and manufacture simple test circuits for the characterization of the resin (dielectric constant and loss tangent) by setting up a tip station to measure the responses. Finally, knowing the behavior of the material, we will show the potential of the use of this technology by creating a periodic structure with a sinusoidal height profile.

Key words: 3D printing, stereolithography, manufacture of microwave circuits, characterization of materials.





AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, y sin lugar a duda, me gustaría dar las gracias mi tutor, Germán Torregrosa por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto y por su total implicación y dedicación, así como la atención inmediata prestada siempre que la he necesitado. También, agradecer a Héctor García toda su ayuda, tiempo y conocimientos sobre el mundo de la impresión 3D.

Dar las gracias a mis padres por todo su esfuerzo durante todos estos años para que nunca me faltase de nada y permitirme dedicar todo mi tiempo al estudio. A mi hermana, por estar ahí y darme un abrazo cuando más lo necesitaba.

Gracias a mis amigas, en especial a Teresa, por todo el apoyo que me ha brindado siempre, por estar ahí incluso cuando daba todo por perdido.

Por último, no olvidar a todos los compañeros y amigos que me han acompañado y ayudado hasta el final de esta etapa. Por hacer vida en la universidad, y no vida universitaria, por todas las horas en la sala de estudio y por todas las risas y momentos en la cafetería.

A todos ellos, gracias.



CONTENIDO

RESUMEN	V
ABSTRACT	VII
AGRADECIMIENTOS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE GRÁFICAS	XVII
LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	XVIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	3
2.1. HISTORIA DE LA IMPRESIÓN 3D	3
2.2. TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D	5
2.2.1. Impresión por extrusión de material (FDM)	6
2.2.2. Impresión por fusión en lecho de polvo mediante polímeros (SLS).....	12
2.2.3. Impresión por polimerización VAT (DLP, SLA, MSLA)	17
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	28
3.1. IMPRESORA 3D	28
3.2. RESINA Y LIMPIADOR	30
3.3. UNIVERSAL TEST FIXTURE	31
3.4. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	33
3.4. PROGRAMAS SOFTWARE	35
3.5. PROCESO DE CALIBRADO Y MANTENIMIENTO DE LA IMPRESORA .	41
3.6. PROCESO DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SUSTRATO	43
3.6.1. Diseño en HFSS	43
3.6.2. División en capas mediante el slicer CHITUBOX.....	44
3.6.3. Impresión del sustrato	46
3.7. PRUEBAS PRELIMINARES DE SUSTRATOS	47
CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA RESINA MEDIANTE CIRCUITOS DE TEST	51
4.1. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LOS CIRCUITOS DE TEST	51
4.1.1. Diseño en ADS de los circuitos de test	51

4.1.2. Diseño en AUTOCAD de los circuitos de test.....	53
4.1.3. Diseño de los sustratos e impresión	54
4.1.4. Metalización de los sustratos.....	56
4.1.5. Fresado del circuito	58
4.1.6. Acabado.....	61
4.2. CARACTERIZACIÓN DEL EPOXI	64
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA RESINA.....	71
CAPÍTULO 5. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA MEDIANTE IMPRESIÓN 3D.	82
5.1. DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA CON PERFIL SINUSOIDAL.	82
5.2. FABRICACIÓN DEL SUSTRATO	88
5.3. METALIZACIÓN DEL SUSTRATO	90
5.4. FRESADO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN	91
5.5. ACABADO.....	92
5.6. MEDICIÓN DEL CIRCUITO	93
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.	100
6.1. CONCLUSIONES DEL PROYECTO	100
6.2. LÍNEAS FUTURAS	101
ANEXOS.	102
ANEXO A: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LA RESINA 3DJAKE AZUL OSCURO	102
ANEXO B: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DEL ADHESIVO EPOXI.....	103
ANEXO C: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DEL UNIVERSAL TEST FIXTURE	111
ANEXO D: CÓDIGO DE MATLAB EMPLEADO PARA LAS SIMULACIONES	115
BIBLIOGRAFÍA	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso básico de separación de un objeto en capas.....	5
Figura 2. Proceso de extrusión de material. [3].....	6
Figura 3. Bobinas de filamentos de colores. [8].....	9
Figura 4. Esquema tecnología FDM.....	11
Figura 5. Impresora FMD de uso doméstico. Modelo <i>Ultimaker 2+</i> . (a) Parte delantera de la impresora. (b) Parte posterior de la impresora.....	11
Figura 6. Proceso de fusión en lecho de polvo. [3]	12
Figura 7. Polvo PA12 del fabricante SINTERIT. [12].....	14
Figura 8. Esquema tecnología SLS.....	15
Figura 9. Impresora SLS modelo <i>Fuse 1</i> de FORMLABS.	16
Figura 10. Proceso de polimerización VAT. [3]	17
Figura 11. Objeto creado mediante resina fotosensible flexible. [14].....	18
Figura 12. Prótesis dental creada con resina dental. [14]	19
Figura 13. Esquema del principio de fotopolimerización. [15].....	20
Figura 14. Esquema tecnología SLA de arriba abajo. [16]	21
Figura 15. Partes de impresora SLA de arriba abajo. [16]	22
Figura 16. Partes de impresora SLA de abajo a arriba. [16]	23
Figura 17. (a) Proceso de impresión de una pieza mediante SLA. (b) Proceso de posacabado en una cámara de luz UV. [16]	24
Figura 18. Esquema de solidificación de resina mediante pantalla LCD.....	25
Figura 19. Esquema tecnología DLP. [18]	26
Figura 20. Comparativa entre SLA y DLP según el trazado la fuente de emisión. [15]27	
Figura 21. Comparativa entre SLA, DLP y MSLA según la fuente de luz. [19]	27
Figura 22. Parte frontal impresora ELEGOO MARS PRO.....	28
Figura 23. Partes de la impresora ELEGOO MARS PRO.	29
Figura 24. (a) Resina 3DJAKE. (b) Limpiador resina 3DJAKE.....	30
Figura 25. UTF modelo 3680-20 de Anritsu.	31
Figura 26. Esquema medición mediante el UTF y VNA. [20].....	32
Figura 27. Analizador de redes vectorial de Anritsu.	33
Figura 28. Cámara USB del <i>DinoCapture 2.0</i>	34
Figura 29. Apartado de generación de soportes en CHITUBOX.....	36
Figura 30. Valores recomendados para la impresora ELEGOO MARS PRO.	37

Figura 31. Valores de impresión recomendados para la MARS PRO.....	39
Figura 32. Previsualización del objeto a imprimir en CHITUBOX.	40
Figura 33. Proceso de calibración de la impresora MARS PRO.....	41
Figura 34. Calibración de la impresora mediante un folio de 125 micras.....	42
Figura 35. Confirmación de la calibración establecida.	42
Figura 36. Ejemplo diseño sustrato mediante <i>HFSS</i>	43
Figura 37. Modelo de impresión de 2 sustratos en paralelo.	45
Figura 38. Modelo de impresión de un sustrato con soportes.	45
Figura 39. Ejemplos de sustratos fabricados de distintas alturas.	47
Figura 40. Sustrato fabricado con capas inferiores.....	48
Figura 41. Distintos sustratos de prueba.....	49
Figura 42. Escalera de 200 μ m hasta 3mm en pasos de 200 μ m.....	49
Figura 43. Mediciones de los primeros escalones (200 μ m, 400 μ m, 600 μ m y 800 μ m).	49
Figura 44. Diseño resonador $\lambda/4$ en <i>ADS</i>	52
Figura 45. Representación Parámetros S del resonador $\lambda/4$ en <i>ADS</i>	53
Figura 46. Diseño CAD de los circuitos de test. (a) Diseño líneas de transmisión. (b) Diseño de resonadores $\lambda/4$ y $\lambda/2$	54
Figura 47. Diseño sustrato de 60x50x1.5mm en <i>HFSS</i>	55
Figura 48. Diseño de los sustratos en paralelo para su impresión.....	55
Figura 49. Adhesivo epoxi Scotch-Weld 3M 2216 gris.	56
Figura 50. Sustrato adherido al cobre mediante una capa de epoxi.	57
Figura 51. Proceso de pegado del cobre al sustrato de resina.	57
Figura 52. Sustrato de resina metalizado.....	58
Figura 53. (a) Fresa de perfilar. (b) Fresa de cortar.....	58
Figura 54. Posicionamiento del sustrato en la base de la fresadora.	59
Figura 55. Comprobación profundidad de penetración de la fresa.....	60
Figura 56. Circuitos fresados en los sustratos. (a). Resonadores. (b) Líneas de transmisión.	60
Figura 57. Proceso de posacabado mediante el microscopio.	61
Figura 58. Acabado de los circuitos de test (parte delantera).....	61
Figura 59. Acabado de los circuitos de test (parte posterior).	62
Figura 60. Captura del ancho de línea del resonador $\lambda/4$	62
Figura 61. Captura del puerto de entrada del resonador $\lambda/4$	63

Figura 62. Captura del plano transversal del circuito.....	63
Figura 63. Estructura en capas del FR4 de doble cara.....	64
Figura 64. Resonador $\lambda/4$ fabricado con FR4.....	65
Figura 65. (a) Proceso de medición con <i>DinoCapture</i> . (b) Medición de las anchuras de las pistas del resonador $\lambda/4$	65
Figura 66. Medición transversal del resonador $\lambda/4$ en FR4 (1 capa).....	66
Figura 67. Red de 2 puertos con los resultados medidos del VNA.....	66
Figura 68. Diseño del resonador $\lambda/4$ en <i>ADS</i>	67
Figura 69. Estructura en capas de 2 placas de FR4 unidas mediante epoxi.	68
Figura 70. Medición transversal del resonador $\lambda/4$ en FR4 (2 capas+epoxi).	69
Figura 71. (a) Representación Magnitud-Frecuencia de los puertos del resonador. (b) Representación Fase-Frecuencia del resonador.....	70
Figura 72. Captura del pin conductor del UTF en contacto con la línea del circuito....	71
Figura 73. Medición del resonador $\lambda/4$ mediante el UTF y VNA.....	72
Figura 74. Resultados obtenidos mediante el VNA.	72
Figura 75. Red de 2 puertos con los resultados medidos del VNA.....	73
Figura 76. Diseño del resonador $\lambda/4$ para la caracterización de la resina.	73
Figura 77. Diseño línea de transmisión de longitud 50mm en <i>ADS</i>	77
Figura 78. Diseño línea de transmisión de longitud 75.2mm en <i>ADS</i>	78
Figura 79. Sustrato con perfil rectangular.	80
Figura 80. Sustrato con perfil sinusoidal.	80
Figura 81. Patrón de impresión lineal 3D con diferentes densidades de llenado: (a) 100%, (b) 50% y (c) 15%, mediante tecnología FDM. [21]	81
Figura 82. Diseño sinusoide según las dimensiones en <i>HFSS</i>	82
Figura 83. Parámetros de la sinusoide en <i>HFSS</i>	83
Figura 84. Cálculo de la altura del sustrato en los extremos mediante <i>LineCalc</i>	83
Figura 85. Dimensiones transversales del sustrato sinusoidal en milímetros.....	84
Figura 86. Estructura del diseño del en <i>HFSS</i>	85
Figura 87. Diseño del sustrato en <i>HFSS</i>	88
Figura 88. Dimensiones transversales del sustrato adicional en milímetros.	88
Figura 89. Diseño sustrato adicional en <i>HFSS</i>	89
Figura 90. Diseño de ambos sustratos complementarios en <i>HFSS</i>	89
Figura 91. Sustrato de perfil sinusoidal impreso.	89
Figura 92. Sustratos perfectamente ensamblados.....	90

Figura 93. Proceso de metalización. (a) Vista desde la superficie lisa. (b) Vista desde la superficie sinusoidal.	90
Figura 94. Metalizado de la superficie sinusoidal.	91
Figura 95. Fresado de la línea de transmisión en el sustrato metalizado.....	91
Figura 96. Circuito fabricado. (a) Cara superior. (b) Cara posterior.	92
Figura 97. Perfil del circuito fabricado.....	92
Figura 98. Medición de la anchura de la pista con <i>DinoCapture</i>	93
Figura 99. Medición altura sustrato tras su fabricación mediante <i>DinoCapture</i>	94
Figura 100. Medición de la estructura mediante el UTF.	95
Figura 101. Comparación dimensiones del sustrato metalizado y sin metalizar.....	98



ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. (a) Representación Magnitud-Frecuencia de los puertos del resonador. (b) Representación Fase-Frecuencia del resonador.....	67
Gráfica 2. Representación dB-Frecuencia de los resultados de la simulación.....	74
Gráfica 3. Aumento en torno a la frecuencia de interés.	75
Gráfica 4. Representación fase-frecuencia de la simulación.....	75
Gráfica 5. Aumento de la fase en torno a 2GHz.....	76
Gráfica 6. (a) Representación Parámetros S(db)-Frecuencia. (b) Representación Parámetros S(fase)-Frecuencia.....	77
Gráfica 7. (a) Representación Parámetros S(db)-Frecuencia. (b) Representación Parámetros S(fase)-Frecuencia.....	78
Gráfica 8. (a) Representación Parámetros S(db)-Frecuencia. (b) Representación Parámetros S(fase)-Frecuencia.....	79
Gráfica 9. Simulación de los Parámetros S en <i>HFSS</i>	85
Gráfica 10. Representación de los Parámetros S en MATLAB.....	86
Gráfica 11. (a) Perfil de alturas del sustrato en mm. (b) Perfil de la cte. dieléctrica efectiva relativa. (c) Perfil de la impedancia característica de la línea.....	87
Gráfica 12. (a) Segunda simulación en <i>HFSS</i> . (b) Segunda simulación en MATLAB..	94
Gráfica 13. Medición del circuito con el VNA.	95
Gráfica 14. Representación de los Parámetros S simulados y medidos en MATLAB. .	96
Gráfica 15. Simulación circuito <i>HFSS</i> con $\epsilon_r=2.1$	97

LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

μ	K
μm <i>Micrómetro</i> , 56	kg <i>Kilogramo</i> , 29
A	L
ABS <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> , 1	LCD <i>Liquid Crystal Display</i> , 24
ADS <i>Advanced Design System</i> , 35	M
C	MHz <i>Megahercios</i> , 72
CAD <i>Computer-Aided Design</i> , 5	min <i>Minuto</i> , 46
cm <i>Centímetros</i> , 29	mm <i>Milímetro</i> , 29
CPW <i>Coplanar Waveguide</i> , 31	MSLA <i>Mask Stereolithography</i> , 24
D	N
dB <i>Decibelios</i> , 75	nm <i>Nanómetro</i> , 30
DLP <i>Digital Light Processing</i> , 18	P
E	PA11 <i>Poliamida 11</i> , 13
EM <i>Electromagnético</i> , 35	PA12 <i>Poliamida 12</i> , 13
F	PA6 <i>Poliamida 6</i> , 13
FDM <i>Fused Deposition Modeling</i> , 4	PAC <i>Poliamida de Fibra de Carbono</i> , 14
FEP <i>Fluorinated Ethylene Propylene</i> , 23	PET <i>Polyethylene Terephthalate</i> , 7
FFF <i>Fused Filament Fabrication</i> , 10	PETG <i>Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified</i> , 8
G	PLA <i>Polylactic Acid</i> , 1
GHz <i>Gigahercio</i> , 32	R
H	RF <i>Radiofrecuencia</i> , 1
HFSS <i>High Frequency Structure Simulator</i> , 35	S
	s <i>Segundos</i> , 89

SLA *Stereo Litography Apparatus*, 1

SLS *Selective Laser Sinteting*, 3

SNA *Scalar Network Analyzer*, 32

STL *Stereo Litography*, 5

T

TPU *Thermoplastic Polyurethane*, 7

U

UTF *Universal Test Fixture*, 2

UV *Ultravioleta*, 3

V

VAT *Tank*, 17

VNA *Vector Network Analyzer*, 32





CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de las impresoras 3D (tres dimensiones) se ha popularizado debido a su sencillo manejo y gran versatilidad a la hora de diseñar y fabricar diferentes prototipos. Pero, sobre todo, por su bajo coste. Es por ello, que esta tecnología ha despertado un gran interés en los sectores tecnológicos, abriendo nuevas líneas de investigación tanto a nivel científico como en aplicaciones médicas, industriales, etc.

La impresión 3D es un tipo de tecnología basada en la fabricación por adición, es decir, cualquier objeto o prototipo tridimensional que queramos obtener es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material a partir de un diseño digital. Existe una gran variedad de materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas que se pueden emplear para la impresión. Los más usados son los filamentos plásticos, como el PLA (*Polylactic Acid*), ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) y la resina fotosensible. Además, gracias al avance y a las investigaciones llevadas a cabo en este campo, se están empleando materiales orgánicos con propiedades muy similares a las del tejido humano para aplicaciones médicas como trasplantes, prótesis, e incluso creación de órganos.

Pero no solo eso, también está teniendo gran repercusión en el ámbito de las telecomunicaciones, concretamente en la creación de los sustratos de circuitos planares de alta frecuencia. La impresión 3D abre la puerta a una infinidad de posibilidades para el diseño y creación de cualquier circuito, ya que podemos decidir sus dimensiones y geometría sin limitarnos a las medidas ya preestablecidas por los fabricantes. Es por ello, que en este proyecto vamos a profundizar en las características, funcionamiento y acabado que tiene este tipo de tecnología. Concretamente en la impresión 3D mediante resina fotosensible, la cual emplea una técnica de estereolitografía (*Stereo Litography Apparatus*, SLA) para la creación de los objetos en tres dimensiones, en nuestro caso para la creación de los sustratos que posteriormente emplearemos para elaborar circuitos de alta frecuencia.

Nuestro objeto de estudio será la caracterización de la resina que vayamos a emplear y la posterior aplicación de esta técnica para la elaboración de sustratos para el diseño de circuitos de radiofrecuencia (RF), microondas o alta frecuencia.

Primero, haremos una breve introducción acerca de su funcionamiento y de los distintos

parámetros en los que se basa la impresión 3D, profundizando en la estereolitografía. Así como los tipos de impresión 3D, materiales, etc.

Seguidamente, diseñaremos y fabricaremos varios modelos de sustratos para posteriormente, metalizar y fresar en una de sus superficies algunos circuitos básicos de prueba (Circuitos de Test). De esta forma podremos caracterizar el material empleado obteniendo su constante dieléctrica (ϵ_r), sus pérdidas, etc.

Sabiendo cómo se comporta el material, pasaremos a diseñar y fabricar un sustrato concreto para un circuito de microondas y analizaremos su respuesta mediante el *Universal Test Fixture* (UTF), dispositivo mediante el cual no será necesario soldar conectores en los puertos de entrada y salida de nuestro circuito.

Para acabar, realizaremos una comparación entre los resultados obtenidos mediante el análisis empírico y las simulaciones previas. Las conclusiones que obtengamos serán un punto de partida para futuros estudios y profundización de esta técnica para la creación de circuitos.



CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se expondrán y desarrollarán los conceptos más importantes en los que se fundamenta nuestro proyecto.

Se tratará de forma breve los orígenes de la impresión 3D y cómo han ido progresando y mejorando las diferentes técnicas a lo largo de los últimos años. Además, se explicará en detalle los métodos y principios en los que se fundamenta dicha tecnología para la creación de objetos tridimensionales, así como la gran cantidad de materiales diferentes que se pueden usar dependiendo del tipo de impresora y método de impresión.

2.1. HISTORIA DE LA IMPRESIÓN 3D

El concepto de impresión 3D surge a finales de la década de los 70, concretamente en 1976 cuando se inventó la primera impresora de inyección de tinta. Ésta era capaz de expulsar gotas de tinta desde el cabezal de impresión al papel recorriendo la página en líneas horizontales. Obviamente esta tecnología solo era capaz de reproducir diseños en dos dimensiones.

Sin embargo, fue en 1982 cuando Chuck Hull inventa la estereolitografía (SLA), un proceso de impresión que permite la creación de objetos tridimensionales a partir de datos digitales. Su funcionamiento consistía en depositar el material deseado en una serie de capas sucesivas cuyos fotopolímeros (líquido viscoso) se iban solidificando gracias a la luz ultravioleta (UV) emitida por un láser.

Dos años más tarde, Hull patenta y funda 3D Systems, la primera compañía del sector y la primera empresa en comercializar las impresoras SLA. A pesar de las imperfecciones, defectos y la robusta tecnología, ya era posible fabricar en una sola noche un objeto. [1]

El mundo de la impresión 3D fue evolucionando hasta que en 1987 los investigadores Breaman y Deckard inventaron un nuevo sistema de impresión 3D: la sinterización selectiva por láser (SLS, *Selective Laser Sintering*), sistema que es capaz de sintetizar polvo de resina para convertirlo en un sólido. A pesar de que este método surgiera hace bastante tiempo, no fue hasta 2006 cuando se comercializó la primera impresora

3D SLS comercial.

Seguidamente, en 1989 el matrimonio Lisa y Scott Crump crean la técnica de fabricación de modelado por deposición fundida (FDM, *Fused Deposition Modeling*). El objetivo principal de Scott era poder fabricar de forma sencilla una rana de juguete para su hija con ayuda de una pistola de pegamento caliente, fundiendo el plástico y depositándolo en finas capas. Es así como nació esta tecnología, basándose en la fundición de un filamento de polímero y depositándolo capa a capa en una plataforma caliente. El objeto finalmente es creado cuando se enfría el material. Al año siguiente fundan Stratasys que hoy en día es una de las empresas más importantes del sector a nivel de impresoras 3D profesionales. [2]

Durante la década de los 90, se fue mejorando y evolucionando las distintas técnicas de impresión 3D hasta llegar a sectores profesionales como la medicina o la odontología para la creación de prótesis, e incluso órganos, usando una técnica basada en la regeneración del órgano a través de sus propias células. Este fue el primer paso que se dio en el campo de la biopresión 3D.

Con la entrada del siglo XXI, las impresoras 3D seguían siendo un producto caro y destinado a los sectores profesionales, pero iba abriendo la puerta a nuevos campos como la construcción, joyería, automoción y muchos otros. No fue hasta 2005 cuando Adrian Bowyer funda el proyecto RepRap (*Replicating Rapid-Prototypers*), una iniciativa que pretende crear una impresora de código abierto y autorreplicable, es decir, que sea capaz de imprimir la mayoría de sus propios componentes con la finalidad de poder fabricar otros modelos. Sin embargo, fue la Universidad de Cronwell (Nueva York) mediante la iniciativa Fab@home la que sacó al mercado la primera impresora 3D de código abierto al mercado.

Todo esto supone un gran paso a la hora de poder adquirir una impresora 3D para el ámbito doméstico o académico, ya que hoy en día el precio de estos dispositivos es bastante más asequible.

2.2. TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

Como bien hemos nombrado en la introducción, la impresión 3D es considerada una tecnología de fabricación por adición. Un objeto es creado mediante la superposición de finas capas superpuestas de material. Para ello, previamente es necesario crear un diseño asistido por ordenador (CAD, *Computer Aided Design*) o empleando cualquier otro software de modelado. De esta forma, tendremos el diseño 3D virtual del objeto que queremos reproducir. Para que dicho diseño pueda ser impreso por cualquier máquina 3D, necesitaremos de una interfaz entre el software CAD y la impresora. En el caso de la impresión 3D, es el formato STL (*Stereo Litography*), inventado por la empresa de Chuck Hull (3D Systems). Este tipo de archivo es capaz de almacenar la geometría del objeto en 3D, excluyendo la información relativa al color, textura o propiedades físicas, por lo que no es suficiente para la reproducción del objeto. Necesitaremos además de un software específico encargado de transformar el modelo 3D (.stl) en el lenguaje que emplean las impresoras 3D: un lenguaje “a capas”. Este software es conocido como *Slicer* (o rebanador), cuya función principal es proporcionar un patrón transversal del objeto para su impresión, dividiéndolo en un conjunto de capas horizontales de una determinada altura por capa. Hoy en día, hay disponible una gran cantidad de *Slicers*, algunos de ellos específicos para ciertas impresoras según la marca o el tipo de tecnología que emplee. En la Figura 1, podemos observar un esquema de los pasos necesarios para la obtención en capas de un modelo 3D para su posterior impresión.

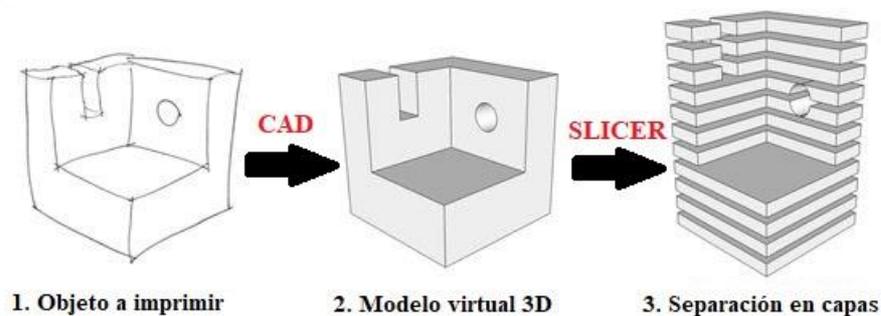


Figura 1. Proceso básico de separación de un objeto en capas.

A continuación, expondremos las diferentes tecnologías de impresión 3D que existen y profundizaremos en las más importantes y que más emplean actualmente.

Según la forma en la que se van creando las diferentes capas y se va depositando o curando el material, podemos distinguir entre varios tipos de impresión 3D que darán lugar a diferentes tipos de tecnologías.

2.2.1. Impresión por extrusión de material (FDM)

La extrusión de material hace referencia a un proceso de impresión 3D en el que se va fundiendo un filamento de material termoplástico sólido a través de una boquilla calentada. La impresora, va depositando el material derretido en una plataforma según la trayectoria que pautó el diseño empezando desde la base. Dicha plataforma va descendiendo según se van creando las sucesivas capas. La obtención del objeto se da cuando el filamento se enfría y se solidifica.

Las principales ventajas que presentan este tipo de impresoras es su bajo coste y facilidad de uso en comparación con otras impresoras. Además, es compatible con una amplia gama de materiales y colores. Por otra parte, no es necesario un proceso de posacabado, lo que nos ahorra mucho tiempo. Otras técnicas necesitan un proceso de posacabado para que las capas se terminen de curar de forma óptima. [3]

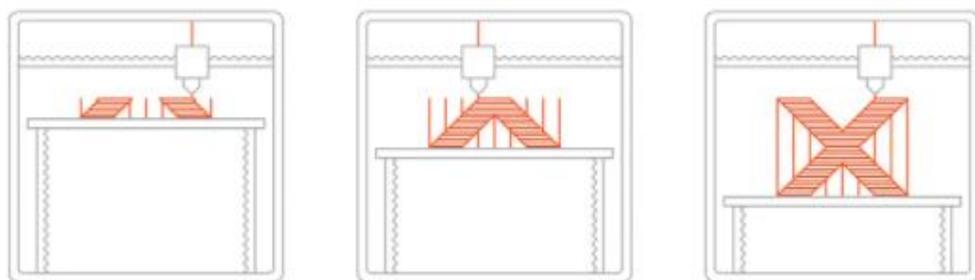


Figura 2. Proceso de extrusión de material. [3]

Los materiales que más se emplean para este método de impresión son los filamentos termoplásticos, como por ejemplo PLA, ABS, PET (*Polyethylene Terephthalate*) y TPU (*Thermoplastic Polyurethane*). Todos ellos vienen enrollados en unas bobinas, facilitando la salida del material hacia el extrusor. A continuación, describiremos brevemente las características de dichos materiales:

- Filamento ABS:

Se trata de un polímero termoplástico muy resistente al impacto y bastante rígido, con cierta flexibilidad y con una elevada resistencia térmica, desde los -20°C hasta los 80°C aproximadamente. Estas propiedades lo convierten en el material ideal para piezas industriales y de automoción al soportar temperaturas altas. No obstante, al tratarse de un plástico no biodegradable a base de petróleo, durante la impresión puede producir humos desagradables. Por ello se recomienda instalar la impresora en un lugar con buena ventilación o con una campana extractora. El ABS tiene un punto de fusión entre los 230°C y 260°C . Debemos tener en cuenta que este material se contrae al estar en contacto con el aire, por lo que es necesaria una cama caliente para evitar deformaciones (efecto *wrapping*) durante la impresión. Así mismo, se recomienda sellar la impresora para evitar que las partículas nocivas del material puedan salir al exterior y guardar el material en un recipiente hermético, ya que éste absorbe la humedad. [4]

- Filamento PLA:

Es conocido como ácido poliláctico y se trata de un polímero semicristalino procedente de materias primas renovables como el almidón de maíz. Es por ello que, entre las opciones, es la más respetuosa con el medio ambiente, ya que el resto de termoplásticos son derivados del petróleo, como el ABS. Esto lo convierte en una de las mejores opciones para la impresión doméstica, puesto que el

ligero olor que emite no es desagradable por ser un derivado de materias primas biodegradables. El PLA tiene una temperatura de extrusión entre 160°C y 220°C y no necesita de una plataforma de impresión caliente, aunque es recomendable para evitar que el material se desprenda o se deforme durante la impresión. Éste presenta una resistencia mecánica baja, es decir, se trata de un material duro, pero se puede quebrar si se manipula de forma incorrecta recién impreso. Se recomienda esperar a que se enfríe y solidifique bien el objeto antes de lijarlo o pintarlo. Además, se trata de un material que no soporta mucho el calor y absorbe la humedad del aire. A temperaturas de 50°C comienza a ser endeble, por lo que no se puede emplear para piezas cuyo ambiente esté a temperaturas muy elevadas. Por todo ello, el PLA es el material más popular y más usado en el ámbito de la impresión 3D para piezas decorativas, maquetas, envases de alimentos, etc. [5]

- Filamento PET:

El tereftalato de polietileno, o PET es un tipo de poliéster muy usado en envases de alimentos y botellas desechable debido a que no libera ningún tipo de olor y es 100% reciclable. Se trata de un material con una elevada transparencia incluso en filamentos de color. Además, presenta una buena resistencia al desgaste y la corrosión y es ligeramente flexible. Su rango de temperatura de impresión va desde los 215°C hasta los 250°C. No es necesario una cama caliente de impresión, como en el caso del PLA. [5]

Una de sus variantes es el PETG (*Polyethylene Terephthalate Gglycol-modified*), al que se le ha añadido glicol para dotarlo de una mayor dureza y resistencia y reducir su fragilidad. Conserva las propiedades del PET salvo por su densidad. Ésta aumenta un poco debido al glicol, lo que podría complicar un poco la extrusión si no se ajustan los parámetros de impresión correctamente. [6]

- Filamento TPU:

Es considerado un termoplástico flexible y resistente, muy parecido a una especie de “caucho imprimible”, por lo que es posible la creación de diseños elásticos de cierta complejidad. Gracias a una gran variedad de diferentes durezas de este material, se puede variar la flexibilidad que queremos que tenga nuestro modelo, asegurándonos que no se va a quebrar. Pero esta cualidad, la flexibilidad, convierte al TPU en un material más difícil de imprimir en comparación con otro tipo de filamentos, ya que es posible que se obstruya en el extrusor. Por otra parte, la temperatura a la que se debe extraer el filamento TPU es entre 220°C y 250°C, sin necesidad de una plataforma de impresión calentada. Debido a la flexibilidad y resistencia de este material, es capaz de soportar impactos y tolerar ciertos productos químicos lo que lo hace perfecto para su uso en industrias como la automotriz y la fabricación de muchos tipos de objetos como ruedas, dispositivos médicos, calzado, etc. [7] [8]



Figura 3. Bobinas de filamentos de colores. [8]

Una vez sabemos cómo funciona este tipo de impresión y los diferentes materiales que puede emplear, vamos a conocer la tecnología más importante asociada a esta impresión, la cual es también la más popular en este sector: el modelado por deposición fundida (FDM).

- Modelado por deposición fundida (FDM):

Esta tecnología también se conoce como fabricación con filamento fundido (FFF, *Fused Filament Fabrication*). Como hemos nombrado anteriormente, se trata de un proceso de fabricación aditivo mediante la extrusión de polímeros termoplásticos en forma de filamentos.

Para la impresión de cualquier diseño mediante esta tecnología, primero deberemos cargar una bobina del material deseado en la impresora 3D. Debemos esperar unos instantes a que la boquilla del cabezal de extrusión alcance la temperatura idónea, dependiendo del tipo de filamento, esta temperatura variará. A continuación, el motor llevará el filamento desde la bobina hasta la boquilla (pasando por el cabezal de extrusión) donde a medida que vaya avanzando el material, se irá derritiendo. Así mismo, la impresora 3D va desplazando el cabezal de extrusión siguiendo las coordenadas del modelo previamente cargado. Poco a poco, va depositando el filamento fundido sobre la cama de impresión donde se va enfriando y solidificando la capa. Una vez que se ha completado una capa entera, la impresora deposita otra capa de material de la misma forma. Este proceso de capas se va repitiendo hasta que el objeto es impreso en su totalidad. Se debe contemplar la posibilidad de un sistema de soportes que podemos añadir a nuestro modelo, en el caso que su geometría lo necesite. Dichos soportes podrán retirarse de forma sencilla una vez haya finalizado la impresión del objeto.

Uno de los parámetros a tener en cuenta a la hora de emplear FDM es la altura que tendrá cada una de las capas que compongan el objeto. Para esta tecnología, dichos valores están entre 50 y 400 micras. Una altura de capa más pequeña produce piezas más precisas y lisas. En cambio, si la altura de capa es elevada, reproducirá figuras con menos detalle y, en consecuencia, en un menor tiempo. La altura de capa comúnmente utilizada es de

alrededor de 200 micras.

Las piezas FDM pueden ser tratadas una vez su enfriamiento y solidificación. Pueden ser lijadas y pulidas, pintadas, se pueden recubrir de epoxi y metalizar.

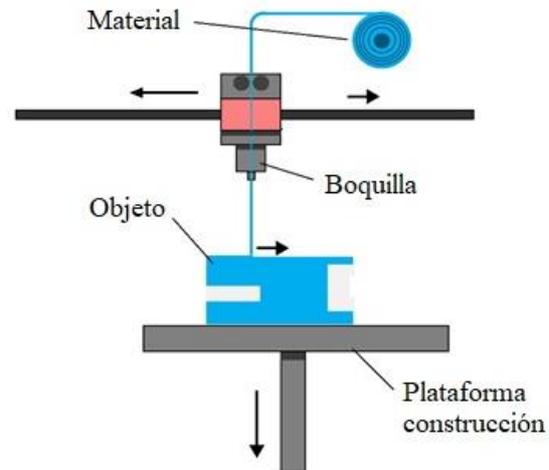


Figura 4. Esquema tecnología FDM.

Esta técnica es una de las más empleadas en la industria a la hora de crear prototipado de forma rápida y sencilla.

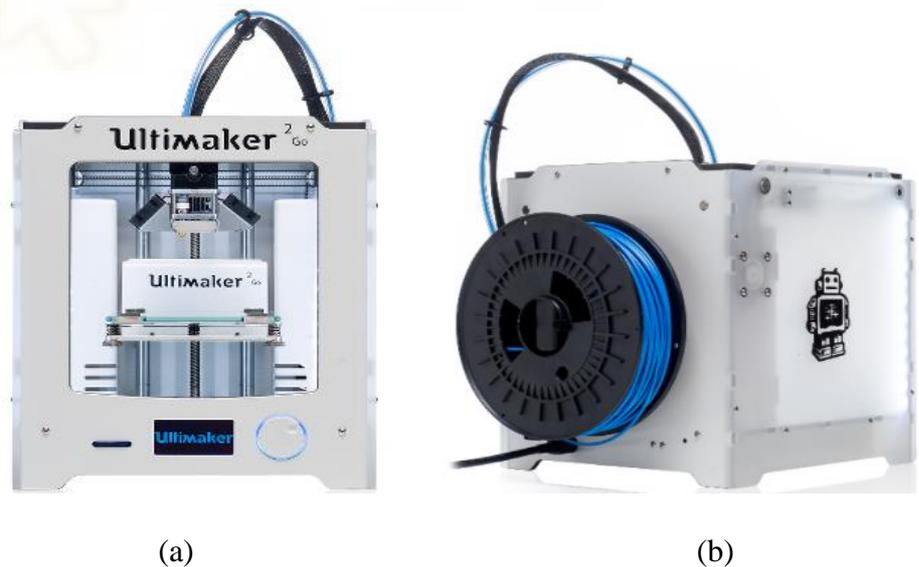


Figura 5. Impresora FMD de uso doméstico. Modelo *Ultimaker 2+*. (a) Parte delantera de la impresora. (b) Parte posterior de la impresora.

2.2.2. Impresión por fusión en lecho de polvo mediante polímeros (SLS)

La fusión en lecho de polvo es un proceso de impresión 3D en el que los objetos sólidos se crean a partir de una fuente de energía térmica que induce selectivamente la fusión entre partículas de polvo termoplástico (polímeros) en el interior de un recipiente de construcción. Cada capa se va formando en la superficie, por lo que una vez solidificada, la plataforma desciende, y se aplica una capa nueva de polvo mediante un rodillo para cubrir la capa sólida que acaba de ser creada. Se repite este proceso de forma sucesiva hasta obtener el objeto deseado (Figura 6). Éste quedará encapsulado y rodeado de polvo no utilizado. [3]

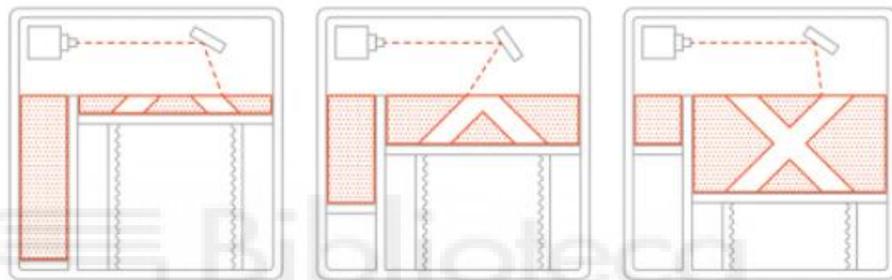


Figura 6. Proceso de fusión en lecho de polvo. [3]

En comparación con el resto de las tecnologías de impresión 3D, ésta permite el desarrollo de objetos cuya geometría es altamente compleja, debido a que el propio polvo ejerce de material de soporte, facilitando así su construcción sin necesidad de incorporar soportes adicionales. Por el contrario, las dimensiones de los modelos a crear dependerán directamente del tamaño del recipiente de construcción. Si se quieren obtener piezas de gran tamaño, será necesario una maquinaria mayor, y, en consecuencia, de mayor coste. Por otra parte, la fusión de lecho en polvo necesita de un proceso de posacabado, ya que será necesario extraer el objeto solidificado y retirar el exceso de polvo que se haya adherido en él. Eso sí, todo el polvo restante podrá ser reutilizado para futuras impresiones.

Los materiales más empleados para este tipo de impresión 3D son los polvos termoplásticos como el nylon 6, nylon 11 y nylon 12. Este último es el más conocido. Cada uno de ellos presenta unas características específicas:

- Nylon 6:

También conocido como Poliamida 6 (PA6). Se trata de un material termoplástico (polímero) semicristalino en forma de polvo. Posee una elevada resistencia mecánica, dureza y amortiguación mecánica ante impactos. Además, presenta una buena resistencia a bajas temperaturas (bajo cero) y presenta una elevada absorción de la humedad. Su temperatura de fusión es en torno a los 220°C. Por otra parte, su elasticidad permite la absorción de vibraciones o impactos, por lo que es ideal para la fabricación de piezas industriales como cojinetes, engranajes, poleas de rodadura... El nylon 6, comúnmente está fabricado por una mezcla de material nuevo y reciclado, por lo que reduce bastante su coste en comparación con otros tipos de nylon. [9]

- Nylon 11:

Este material, a diferencia de otros, se trata de un polvo de poliamida bioplástico fino fabricado a partir de materias primas renovables derivadas del aceite de ricino (aceite vegetal). El PA11 presenta una buena elasticidad y una alta resistencia al impacto y a productos químicos como los hidrocarburos, cetonas, combustibles... Es capaz de trabajar en un amplio rango de temperaturas sin perder sus propiedades, concretamente entre -60°C hasta los 150°C. Así mismo, presenta una gran resistencia a la presión. Se emplea principalmente en el sector de la automoción, para la creación de bisagras, piezas móviles, etc. [10]

- Nylon 12:

Esta Poliamida 12 (PA12) es la más utilizada en este tipo de impresión. El PA12 es un polvo fino sintético normalmente derivado

del petróleo. Se caracteriza por ser un material muy rígido, con una gran resistencia al agrietamiento y un excelente comportamiento a largo plazo. Además, presenta elevada resistencia química (consistencia ante aceites, combustibles...) y absorbe muy poco el agua y la humedad, por lo que se emplea mucho para aplicaciones de temperaturas por debajo del punto de congelación. En comparación con el PA6 y PA11, esta poliamida presenta una densidad muy baja, por lo que cualquier pieza que sea fabricada con este material presentará una gran ligereza. Este factor es ideal para el sector de las tecnologías relacionadas con la aeronáutica y aeroespacial. [11] [12]



Figura 7. Polvo PA12 del fabricante SINTERIT. [12]

Aparte de los materiales descritos anteriormente, también se emplean, aunque en menor medida, la poliamida de fibra de carbono (PAC) y el poliuretano flexible.

Conociendo ya cómo funciona este tipo de impresión, vamos a tratar a continuación la tecnología más destacable, el sinterizado selectivo por láser (SLS).

- Sinterizado selectivo por láser (SLS):

Esta técnica de impresión aditiva utiliza un láser para sintetizar las pequeñas partículas de polímero en polvo para convertirlo en una estructura sólida basada en un modelo 3D.

Para ello, será necesario un láser de elevada potencia, como un láser de CO₂, para ir fusionando las partículas de polvo siguiendo el modelo 3D del objeto a crear. Gracias a este tipo de láser, es posible realizar impresiones de objetos sumamente complejos. Primero de todo, se introducirá el material dentro del recipiente de impresión. A continuación, la impresora calienta el polvo hasta una temperatura ligeramente por debajo de su punto de fusión para facilitar que el láser eleve la temperatura de aquellas regiones en las que se debe solidificar el polvo. El polvo sin fundir sirve como soporte para la pieza durante su impresión. Este factor junto con la potencia del láser, hacen que sea posible la impresión de secciones transversales de gran complejidad. Seguidamente, la plataforma de impresión desciende una altura de capa, que suele ser de entre 50 y 200 micras (dependiendo de la precisión, tamaño y acabado que deseemos para el objeto) y se aplicará sobre la superficie del recipiente una nueva capa de polvo gracias a la acción de un rodillo. El proceso se repetirá hasta que se cree el objeto en su totalidad. [3]

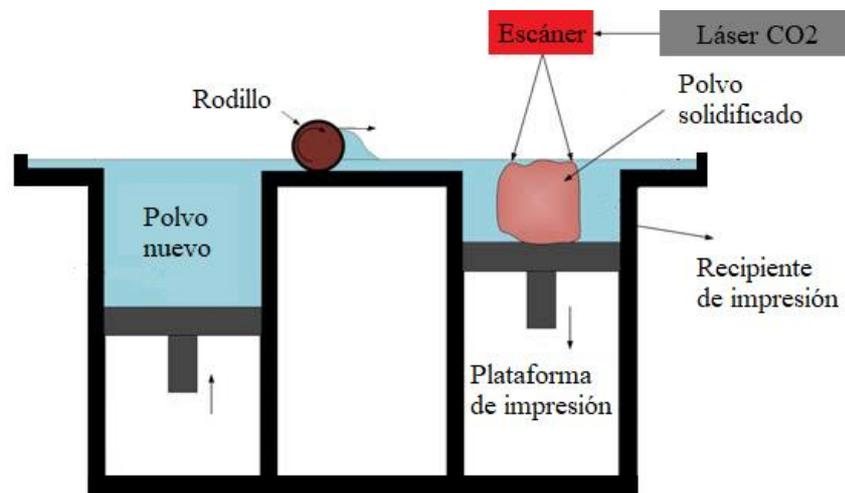


Figura 8. Esquema tecnología SLS.

Tras la impresión, el recipiente que contiene el polvo y el objeto sólido deberá retirarse de la impresora y esperar a que se enfríe ligeramente. Este paso es de vital importancia para asegurar unas propiedades mecánicas óptimas y evitar que se deforme la pieza impresa. Se necesitará, por último, una labor de posacabado para retirar el exceso de polvo adherido a nuestro objeto. El polvo se puede reciclar y la pieza puede ser pulida para un acabado óptimo. Las piezas producidas mediante esta tecnología tienen excelentes características mecánicas con una resistencia elevada. [13]

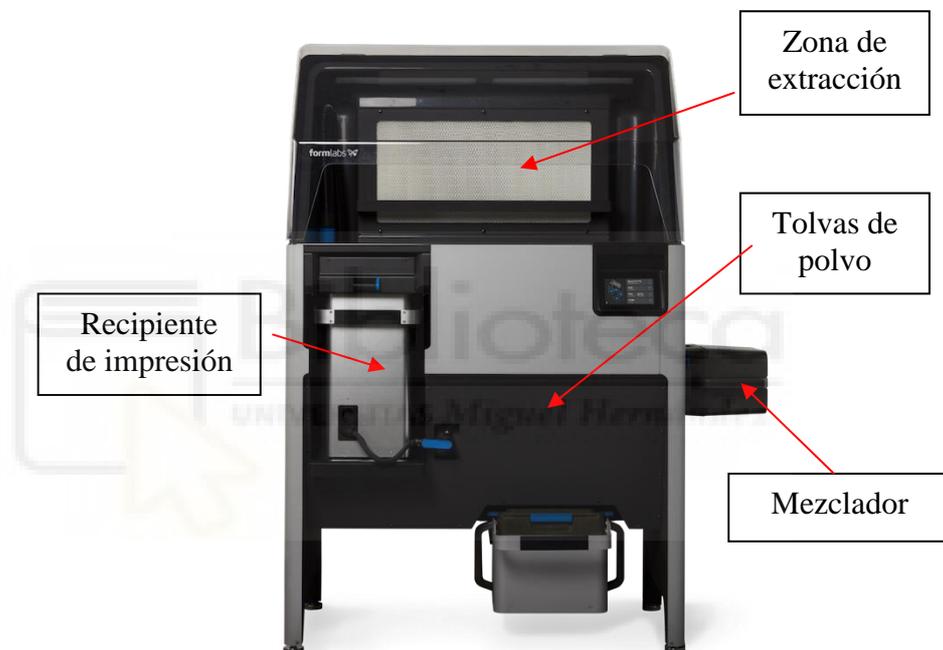


Figura 9. Impresora SLS modelo *Fuse 1* de FORMLABS.

Cabe destacar también, que para esta tecnología se puede emplear como material polvo de metal como el aluminio, acero inoxidable, titanio, para la creación de piezas metálicas.

2.2.3. Impresión por polimerización VAT (DLP, SLA, MSLA)

La polimerización VAT o fotopolimerización es un proceso de impresión 3D en el que una resina fotopolímera (fotosensible) en un tanque (VAT) se va curando de forma selectiva mediante una fuente de luz. Los fotopolímeros cambian sus propiedades estructurales al ser expuestos a cierto espectro de luz, por ejemplo, endureciendo el material como resultado del fenómeno de reticulación.

La principal ventaja de este tipo de impresión es la calidad de impresión de los objetos, tanto en precisión como en el acabado, que es liso y suave, sin apreciación alguna de la trayectoria del material (caso de la tecnología FDM). En cambio, entre sus inconvenientes encontramos el precio de las resinas fotosensibles, que es más elevado en comparación con otros materiales, como es el caso de los termoplásticos. En general, este tipo de material no presenta una gran resistencia mecánica y puede llegar a causar deformaciones si se expone a la luz solar. Una vez impreso el objeto, será necesaria una labor de posacabado y de limpieza. Se realizará un tratamiento de luz ultravioleta para que se termine de curar (solidificar) y la limpieza del tanque que contiene la resina y el filtrado de ésta para su reutilización en impresiones futuras. Es por ello, que este tipo de impresión no es de los más rápidos. [3]

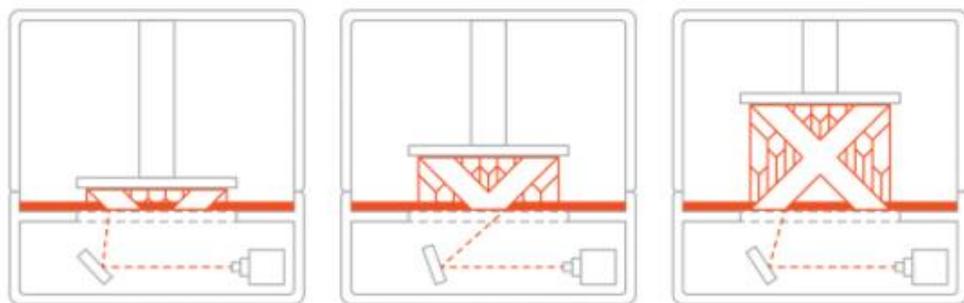


Figura 10. Proceso de polimerización VAT. [3]

Existen diferentes tipos de resinas fotosensibles para la impresión 3D según las características del objeto a crear y su aplicación. Estas resinas están formadas por polímeros *thermoset* en estado líquido. Estos polímeros con forma de líquido viscoso tienen la cualidad de ser curados y endurecidos hasta convertirse en un objeto totalmente sólido. Cabe destacar, que estas resinas deben ser embotelladas en recipientes con protección UV, ya que son sensibles a los rayos UV de la luz solar.

Según la tecnología que vayamos a emplear dentro de la impresión por polimerización VAT, deberemos seleccionar una resina u otra, ya que sus características variarán según la impresora:

- Resina estándar:

Se emplea para imprimir prototipos rápidos, miniaturas, figuras de decoración. Ofrecen un acabado suave de las piezas y poca dureza. Son resinas económicas y las podemos obtener en varios colores. Son aptas para tecnologías como SLA o DLP (*Digital Light Processing*). [14]

- Resina flexible:

Este material ofrece un acabado con cierto grado de flexibilidad, siendo capaz de doblarse y deformarse al aplicarle cierta fuerza, recuperando su forma inicial tras ésta. Su textura es suave al tacto y se suele utilizar para cualquier objeto que deba de ser elástico y con cierta capacidad de amortiguación, como es el caso de las plantillas para el calzado, carcasas... [14]



Figura 11. Objeto creado mediante resina fotosensible flexible. [14]

- Resina calcinable (Resina castable):

Este tipo de resinas se emplean para la fabricación de objetos de tamaño pequeño y que precisen de gran detalle. Su aplicación primordial es en el campo de la joyería, ya que es capaz de crear piezas metálicas pequeñas mediante un proceso de cera perdida. [14]

- Resinas dentales:

Se trata de resinas que cuentan con un certificado de biocompatibilidad para asegurar que los objetos creados mediante esta resina no son tóxicos o perjudiciales para la salud de los usuarios, ya que se emplea en el campo de la odontología y medicina. Las piezas creadas a través de esta resina son bastante resistentes a la abrasión y con un acabado suave. [14]



Figura 12. Prótesis dental creada con resina dental. [14]

Como hemos mencionado anteriormente, dependiendo del tipo de tecnología de impresión por polimerización, deberemos utilizar una resina específica. A continuación, explicaremos el funcionamiento básico y aplicaciones de las más importantes, profundizando en la tecnología de la estereolitografía, ya que en este proyecto emplearemos este tipo de tecnología para la creación de nuestros sustratos.

- Estereolitografía (SLA):

La estereolitografía es famosa por ser la primera tecnología de impresión 3D, patentada por el físico estadounidense Chuck Hull en 1986. Se trata de un proceso de fabricación aditiva que emplea resina polimérica (sensible a la luz) en un tanque para crear objetos mediante la solidificación de las capas a través de un láser UV.

El principio de funcionamiento de esta tecnología se basa en la fotopolimerización, que consiste en aplicar una fuente de luz sobre una resina sensible que se polimeriza pasando de un estado líquido a un estado sólido. Dicha resina, está compuesta por unos componentes: los fotoiniciadores. Éstos reaccionan ante una fuente de luz con una determinada longitud de onda, transformándose en radicales libres capaces de generar cadenas de polímeros a partir de los monómeros de los que está compuesta la resina cuando se encuentra en su estado líquido (Figura 13). [15]



Figura 13. Esquema del principio de fotopolimerización. [15]

Conociendo cómo se comporta la resina a nivel físico, pasamos a explicar cómo funciona la estereolitografía.

Primeramente, se llena el tanque de impresión con la resina que corresponda según las características del objeto a crear. Dicho objeto, se irá solidificando en la plataforma de impresión, la cual solo se moverá en el eje vertical. Mediante un láser de punto UV y un conjunto de espejos llamados galvos, se irán curando las

secciones transversales del objeto. Cada capa es creada mediante un tiempo determinado de exposición de la luz ultravioleta en la resina. Una vez que la capa a imprimir ha sido creada, la plataforma de impresión desciende a una distancia equivalente a la altura de capa. En estereolitografía, el valor típico es de entre 50 y 150 micras, por lo que estamos hablando de una tecnología capaz de crear objetos con bastante detalle y precisión. Una vez ha descendido la plataforma, la resina invade el espacio libre creado entre la capa recién curada y la propia resina mediante el paso de una hoja barredora. Se repite el proceso de solidificación de la capa según el modelo del objeto y vuelve a curar una nueva capa, y así sucesivamente hasta conseguir el objeto en su totalidad. [16]

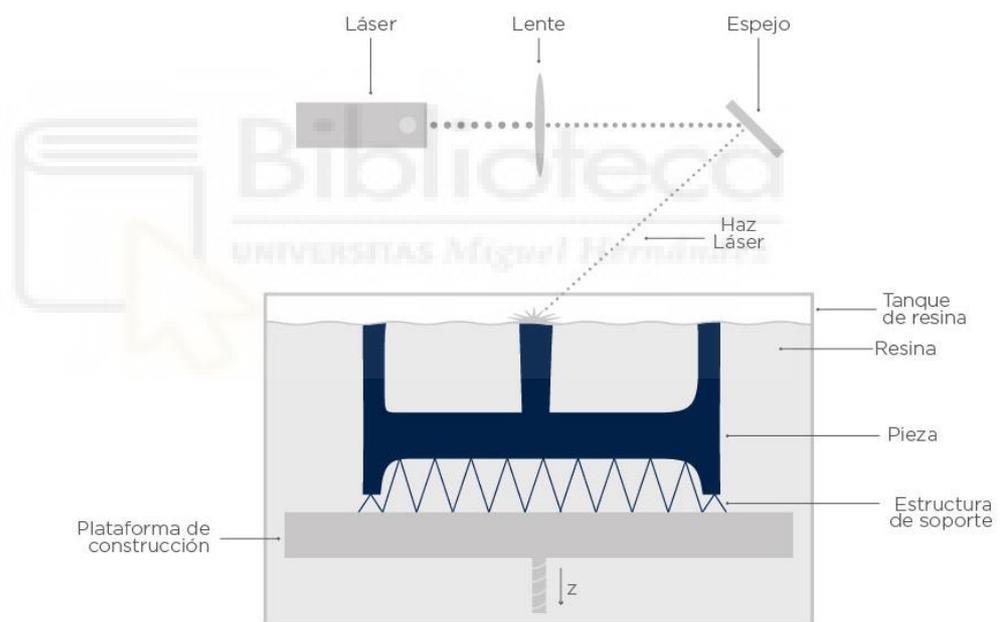


Figura 14. Esquema tecnología SLA de arriba abajo. [16]

Destacamos que este tipo de impresión 3D necesita de estructuras adicionales (soportes) para soportar la figura a imprimir en la plataforma de elevación para evitar que por la gravedad se desprenda y caiga al tanque de resina (Figura 14). Esto es de vital importancia ya que toda área del objeto que quede “al aire” sin estar sujeta a la

base de este, no contará con la sujeción suficiente y se desprenderá.

Una interesante particularidad de la tecnología SLA es que existen dos formas de crear capa a capa el objeto: de “arriba a abajo” o bien de “abajo a arriba”. Dependerá de la posición inicial y sentido de movimiento vertical de la plataforma de impresión.

En el primer caso, de arriba abajo, su funcionamiento es el que hemos explicado anteriormente, como podemos observar en la Figura 14 y Figura 15. La posición de partida de la plataforma de impresión será a nivel de la superficie del tanque y vaya descendiendo según se vayan creando y curando las capas. Este hecho limita las dimensiones del objeto a imprimir, debido a que si queremos crear un objeto de grandes dimensiones necesitaremos un tanque de mayor dimensión y, en consecuencia, un mayor consumo de resina. En cambio, esta forma de impresión nos garantiza que ninguna capa se quede adherida al tanque durante la impresión, factor que hay que tener en cuenta. [5]

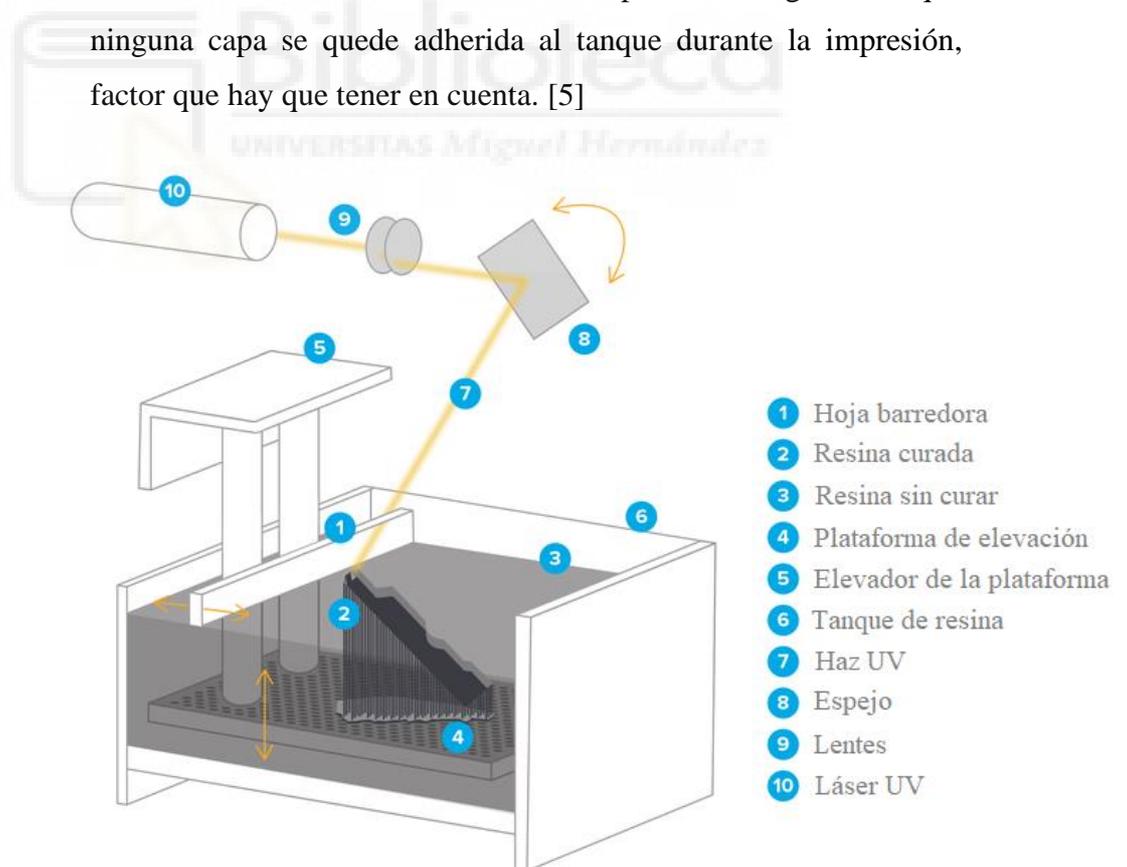


Figura 15. Partes de impresora SLA de arriba abajo. [16]

Por otra parte, si el objeto se va creando de abajo a arriba, la plataforma de impresión se moverá en ese sentido. El fondo del tanque que contiene la resina necesariamente será de un material transparente para dejar pasar la luz UV procedente del láser e ir así solidificando cada una de las capas (Figura 16). Este material transparente normalmente es una lámina de FEP (*Fluorinated Ethylene Propylene*) de alta transparencia, resistente a la luz UV y antiadherente. De esta forma, evitaremos que las capas se queden pegadas en el fondo del tanque y sí se queden adheridas en la plataforma de impresión. Al curar una capa, la plataforma se eleva una distancia igual a la de la altura de capa y así se cree un nuevo espacio que es ocupado por resina y empleado para la creación de una nueva capa. En comparación con el modo de “arriba abajo”, de esta forma, las dimensiones del objeto no serán un factor limitante a la hora de la impresión, debido a que la plataforma se puede ir elevando según las capas que necesite el objeto, hasta llegar al límite del eje vertical. Eso sí, conllevará un mayor mantenimiento y cambio del FEP para garantizar una impresión óptima y que la resina no se quede adherida a él.

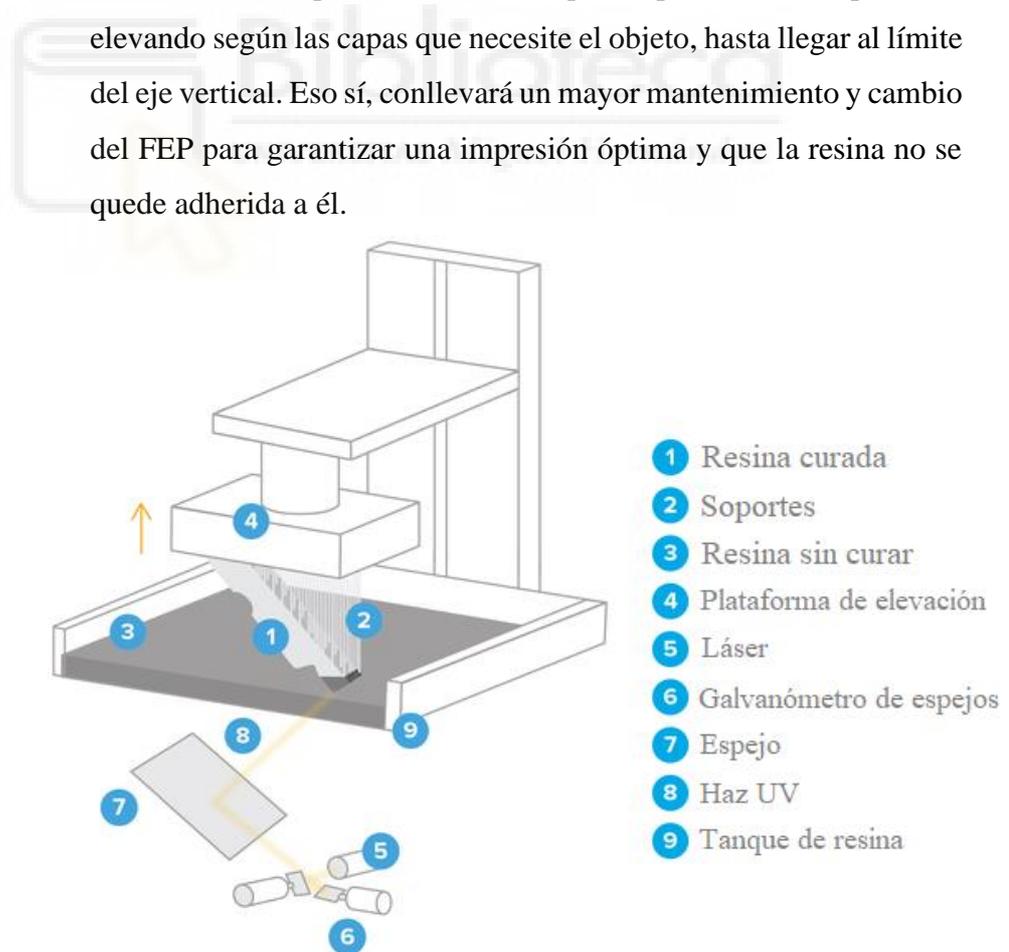


Figura 16. Partes de impresora SLA de abajo a arriba. [16]

Una vez se completa la impresión, las piezas tendrán que ser sometidas a un proceso de posacabado, ya que, aunque hayan adquirido su formato final, la reacción de polimerización aún no se ha completado del todo. Por lo tanto, las propiedades mecánicas y térmicas no están completamente establecidas. Se recomienda introducir las piezas en un baño químico, normalmente con limpiadores específicos, para retirar el exceso de resina y posteriormente introducir las piezas en una cámara de luz ultravioleta para que la curación de las capas alcance la mayor resistencia posible.

Tras este procedimiento, obtendremos un acabado liso, sin porosidad y suave de cualquier objeto que imprimamos a través de la estereolitografía. [16]

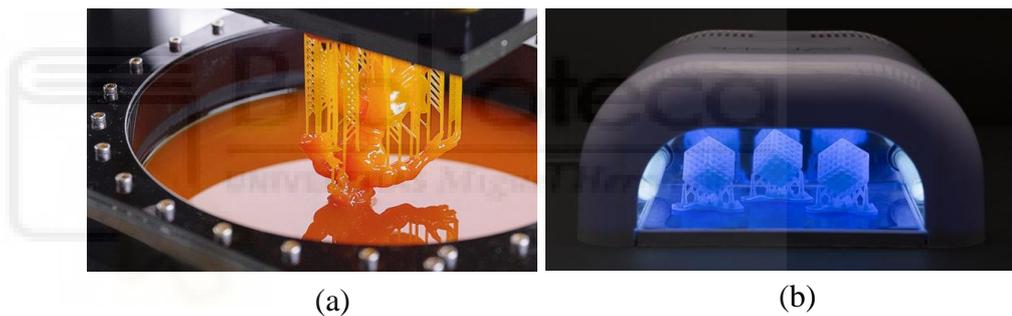


Figura 17. (a) Proceso de impresión de una pieza mediante SLA. (b) Proceso de posacabado en una cámara de luz UV. [16]

- Estereolitografía enmascarada (MSLA):

La MSLA (*Mask Stereolithography*) se basa en la tecnología de estereolitografía a diferencia de que en vez de emplear como fuente de luz un láser UV (SLA) emplea una matriz de diodos LED's ultravioleta. La luz UV se emite a través de una pantalla LCD (*Liquid Crystal Display*) que actúa como máscara, de ahí su nombre. La pantalla LCD proyecta las capas de la pieza a imprimir permitiendo que la luz ultravioleta emitida por la matriz de LED's atraviese solamente en las zonas donde bese solidificarse la resina.

La fotomáscara de LCD se compone de píxeles cuadrados, cuyo tamaño define la granularidad de la impresión y actúan como una pequeña ventana que bloquea o deja pasar el haz de luz dependiendo del modelo a imprimir. [3]

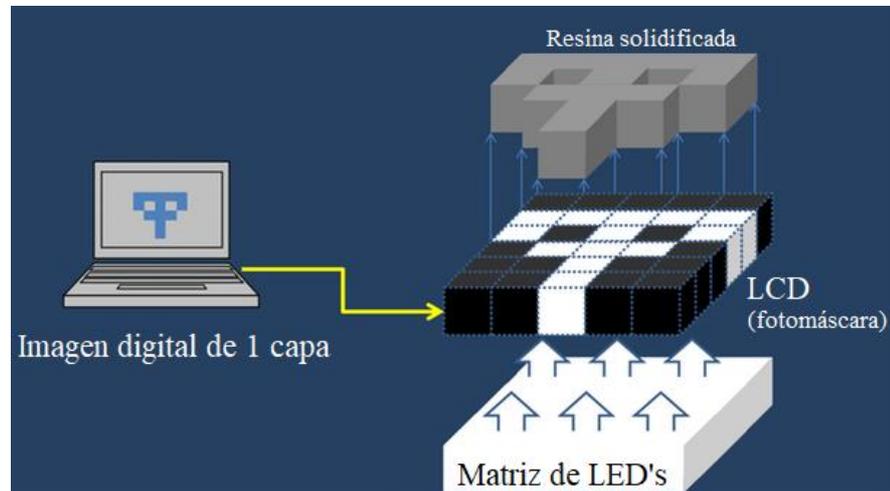


Figura 18. Esquema de solidificación de resina mediante pantalla LCD.

En comparación con la estereolitografía, la MSLA puede alcanzar tiempos de impresión más rápidos ya que gracias a la pantalla LCD, se expone a la luz ultravioleta una capa completa cada vez en lugar de ir trazando punto a punto la trayectoria específica con el láser (SLA). La proyección, por tanto, es directa y perpendicular a la base en toda la superficie, evitando la aparición de distorsiones producidas por la proyección oblicua de las lentes. Además, como cada píxel puede o no dejar pasar la luz, podemos filtrar así la luz variando la intensidad de forma independiente en cada píxel, haciendo posible el uso de procesos antialiasing, para un acabado superficial muy pulido y liso. [17]

Debido al reducido coste de las unidades LCD, esta tecnología se ha convertido en tendencia dentro del campo de las impresoras 3D para uso doméstico. Y no solo eso, también está empezando a hacerle frente a las impresoras SLA en sectores como el de la odontología, donde la tecnología SLA es un estándar.

La impresora que emplearemos para la creación de los sustratos de los circuitos de microondas de este proyecto, los fabricaremos mediante una impresora que emplea esta tecnología, la ELEGOO MARS PRO.

- Procesado digital de luz (DLP):

La tecnología DLP (*Digital Light Processing*) es una técnica de fabricación aditiva que también se basa en la estereolitografía. La diferencia principal es que DLP utiliza un proyector de luz digital para proyectar una sola imagen sobre cada capa de forma individual.

Como la fuente de luz es un proyector de pantalla digital, la imagen de cada capa estará compuesta por píxeles cuadrados (como en MSLA) llamados vóxeles (píxeles en 3D). La resina fotosensible se va curando cuando incide sobre ésta la luz emitida por el proyector de acuerdo con el modelo del objeto, dejando sin solidificar el resto del área de la capa. A diferencia con la SLA, esta tecnología en una proyección abarca toda la capa, mientras que en SLA, el láser tiene que escanear el área e ir recorriendo punto a punto la figura que quiere curar. Es por ello, que DLP presenta una mayor velocidad de impresión que SLA y MSLA. [3] [18]

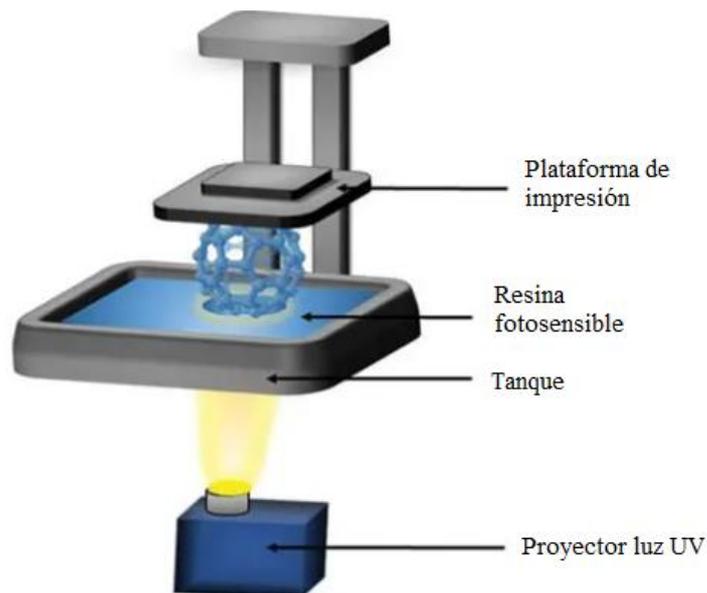


Figura 19. Esquema tecnología DLP. [18]

Como hemos comentado anteriormente, MSLA y DLP nacen de la estereolitografía, variando cada una de ellas la fuente de luz. El funcionamiento a nivel de impresión y posacabado es el mismo. A continuación, mostraremos de forma visual una comparativa entre las tres tecnologías de impresión por fotopolimerización que hemos explicado. [19]

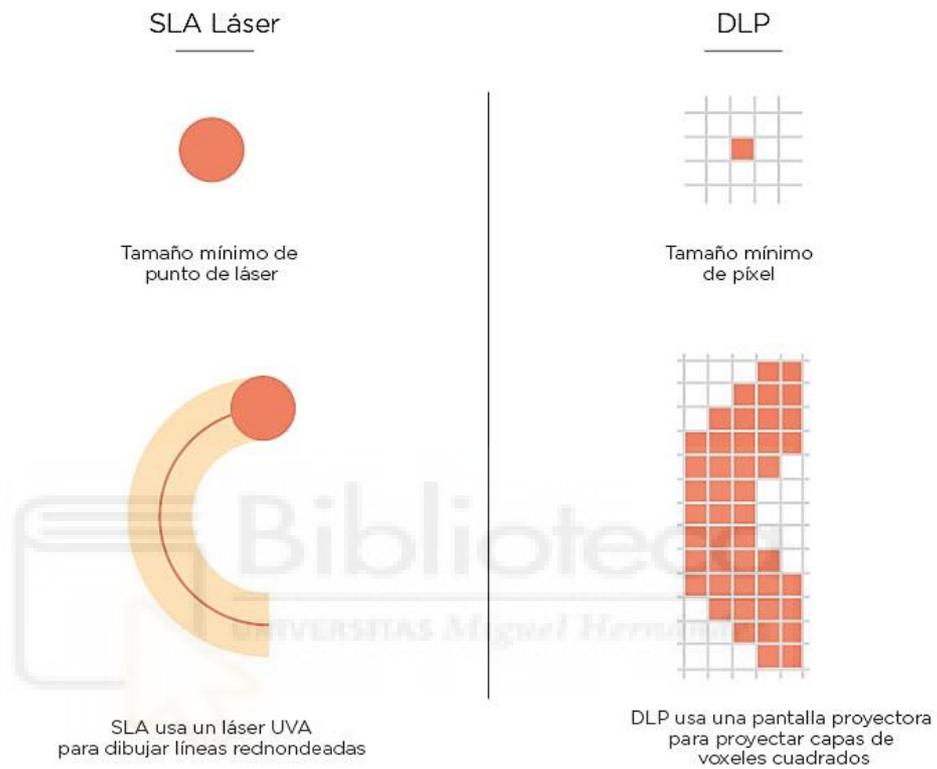


Figura 20. Comparativa entre SLA y DLP según el trazado la fuente de emisión. [15]

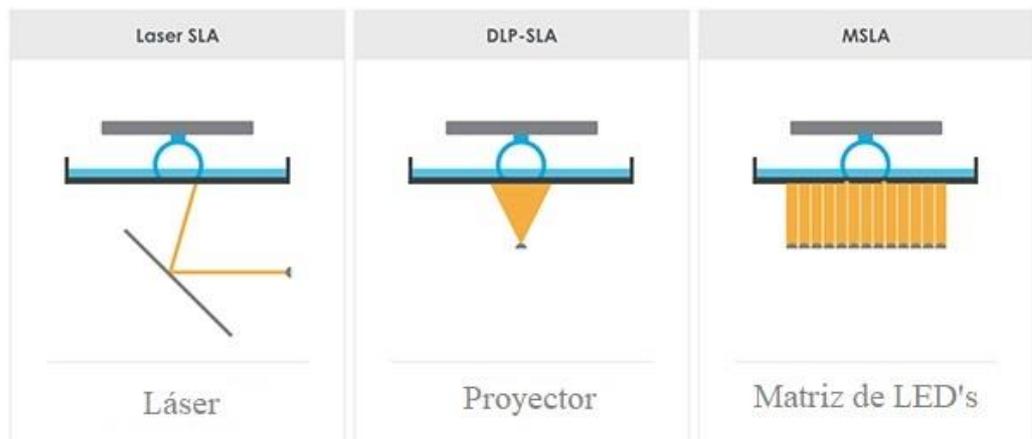


Figura 21. Comparativa entre SLA, DLP y MSLA según la fuente de luz. [19]

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo, describiremos en primer lugar, todos los equipos y materiales empleados para la realización de este proyecto, profundizando en las especificaciones de la impresora. En segundo lugar, realizaremos una descripción sobre el procedimiento experimental y métodos a seguir para la fabricación de objetos mediante la impresora y su mantenimiento.

3.1. IMPRESORA 3D

La impresora que vamos a utilizar es el modelo MARS PRO 3D PRINTER de ELEGOO. Se trata de una impresora que emplea la impresión por polimerización VAT para la fabricación de los objetos. Concretamente, se basa en la tecnología MSLA, por lo que su fuente de luz es una matriz de diodos LED's (explicado en el apartado 2.2.3). Los materiales de impresión serán, según esta tecnología, resinas fotosensibles a la luz ultravioleta.

La MARS PRO se compone principalmente de una base metálica donde irá alojado el tanque de resina, una plataforma de impresión elevadiza y una carcasa de plástico protectora extraíble, resistente a olores y a la luz ultravioleta. (Figura 22).

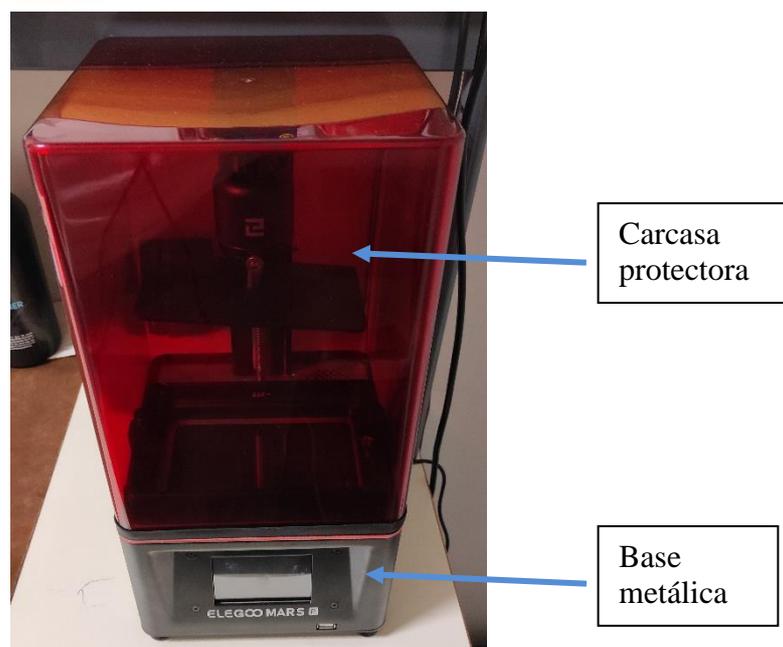


Figura 22. Parte frontal impresora ELEGOO MARS PRO.

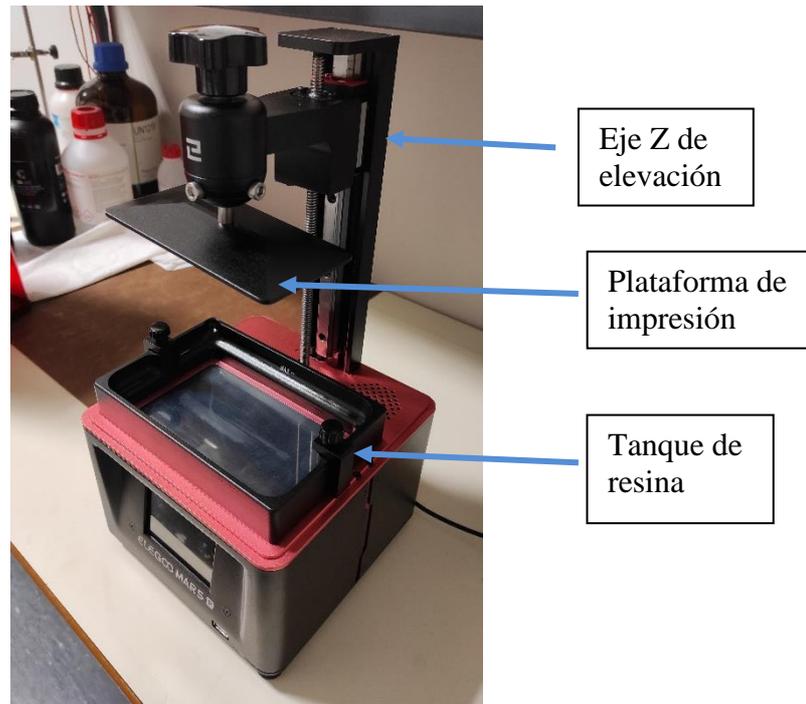


Figura 23. Partes de la impresora ELEGOO MARS PRO.

En cuanto a las especificaciones físicas, la impresora tiene unas dimensiones de 20cm de largo (L), 20cm de ancho (W) y 41cm de alto (H). Un poco más reducido es su volumen de impresión, ya que depende de las dimensiones del tanque y del área de la plataforma de impresión. Dicho volumen es de 11.5cm (L) x 6.5cm (W) x 15cm (H). El peso total de la impresora es de 6.3kg, por lo que es bastante compacta y ligera, ideal para el uso doméstico. El área de la plataforma de impresión sigue un patrón CD para una mayor adhesividad y garantizar que las impresiones se adhieran firmemente a la placa.

Por otra parte, en cuanto a las características de impresión, contamos con una altura de capa entre 0.01mm y 0.2mm, obteniendo un gran detalle y precisión a la hora de imprimir, reduciendo las líneas de capa y consiguiendo un acabado más liso. Cuenta con una resolución del plano XY de 0.047mm (1440x2560) y una precisión del eje Z de 125 micras. Además, gracias a la tecnología MSLA, la fuente emisora de luz LCD (de 450nm de longitud de onda) está compuesta por una matriz de 28 luces LED's de 50 vatios, proporcionando una emisión uniforme, lo que conlleva un tamaño de impresión más preciso y ahorra hasta un 25% en el tiempo de exposición de la capa. Es capaz de alcanzar una velocidad de impresión de 22.5mm/hora.

La ELEGOO MARS PRO cuenta con un software de fabrica: CHITUBOX, herramienta que será imprescindible para modelar y ajustar los parámetros de impresión. Este programa cargará el archivo con el modelo 3D a imprimir y será el encargado de crear las sucesivas capas que compondrán el objeto a imprimir. Se trata de un software cuya interfaz es bastante intuitiva y versátil.

3.2. RESINA Y LIMPIADOR

La resina que utilizaremos para nuestras impresiones será la resina estándar de 3DJAKE color azul oscuro. Esta resina fotosensible apenas tiene olor y se caracteriza por su curado rápido. Es apta tanto para fuentes de emisión DLP y MSLA (pantallas LCD) de 395nm a 405nm Según sus propiedades, nos encontramos ante una resina con una excelente estabilidad dimensional y de baja contracción, con un alto nivel de detalle en sus acabados.

Los parámetros de impresión recomendados para esta resina son los siguientes: una altura de capa de 0.05-0.1mm, de 8 a 14 segundos de tiempo de exposición por capa y un número de capas inferiores de entre 5 y 10. Con estos valores, obtendremos una impresión óptima mediante la 3DJAKE. Así mismo, sólo necesitará de 3 minutos de exposición en una lámpara UV para el posacabado (Anexo A).

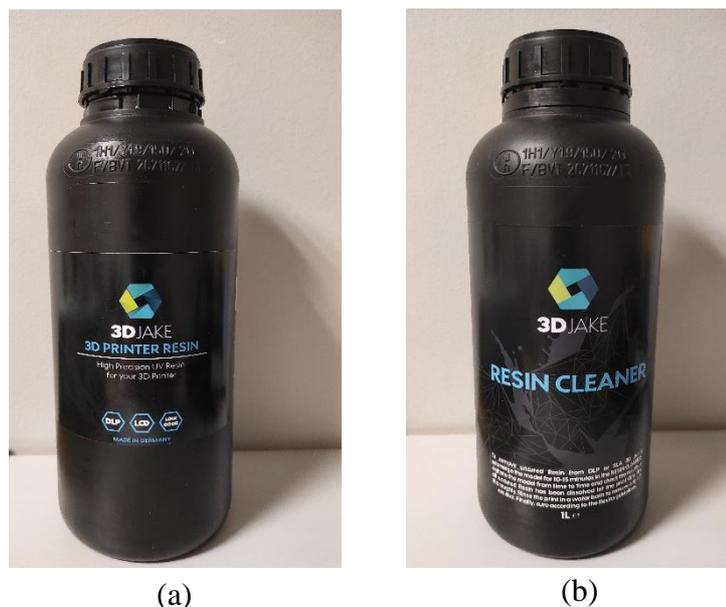


Figura 24. (a) Resina 3DJAKE. (b) Limpiador resina 3DJAKE.

Por otra parte, emplearemos un limpiador de resina característico también de la marca 3DJAKE. Aunque no es obligatorio, si es aconsejable emplear este tipo de limpiadores para asegurar un acabado sin excesos de resina no curada y una superficie totalmente lisa sin porosidades. Además, contribuye a un mejor curado de las capas una vez terminada la impresión. Sólo será necesario sumergir la pieza impresa en este limpiador durante 5-15 minutos.

3.3. UNIVERSAL TEST FIXTURE

El *Universal Test Fixture* (UTF) es un dispositivo de medición que nos proporcionará la respuesta de los circuitos que vayamos a fabricar. Es vital para la obtención de los resultados y poder analizarlos. Al trabajar con sustratos creados a partir de resina, no podremos soldar los conectores RF a nuestro circuito, puesto que la resina se acabaría derritiendo o deformando. Por ello, este dispositivo es necesario para la realización de este proyecto. Además, evitaremos el factor de pérdidas debido a las soldaduras de los conectores.

En nuestro caso, trabajaremos con el modelo 3680-20 de la marca Anritsu. Este dispositivo es capaz de realizar mediciones de gran precisión para circuitos coplanares (CPW, *Coplanar Waveguide*) y tecnología microstrip, adaptándose a una amplia variedad de tamaños y configuraciones. La gran ventaja del UTF es que podemos repetir las mediciones las veces que sean necesarias y para cualquier circuito de estas características. Simplemente, cambiaremos uno por otro y podremos medir de nuevo.

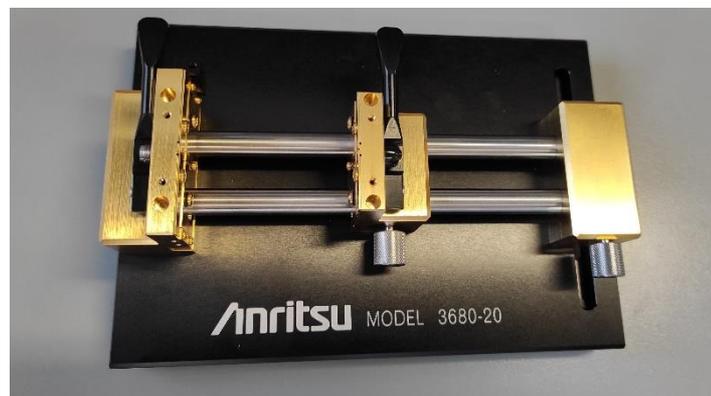


Figura 25. UTF modelo 3680-20 de Anritsu.

Existen varios modelos según la frecuencia de trabajo del circuito a medir. El modelo 3680-20 es capaz de medir de DC hasta 20 GHz, por lo que los circuitos que diseñemos tienen que trabajar a frecuencias dentro de este rango (Anexo C).

El dispositivo cuenta con dos bloques (uno fijo y otro móvil) que se ajustarán a las dimensiones del sustrato. Habrá que ajustarlo bien a su tamaño y además, gracias a la acción de dos mordazas, el sustrato quedará totalmente inmóvil y listo para las mediciones. Hay que tener en cuenta las dimensiones del sustrato, ya que el modelo 3680-20 cuenta con unas limitaciones fijas. Éste será capaz de albergar sustratos de una anchura (W) de mínimo 1.2mm (sin límite superior), de longitud (L) hasta 100mm y de altura (H) entre 0.12mm y 1.9mm. Estos límites tendrán que tenerse en cuenta a la hora de diseñar nuestros circuitos, sobre todo en lo referente a la altura del sustrato. [20]

Respecto a las mediciones, el UTF es compatible con analizadores de redes escalares (SNA, *Scalar Network Analyzer*) y vectoriales (VNA, *Vector Network Analyzer*). Las mediciones realizadas para este proyecto serán mediante el VNA a través de conectores 3.5mm hembra.

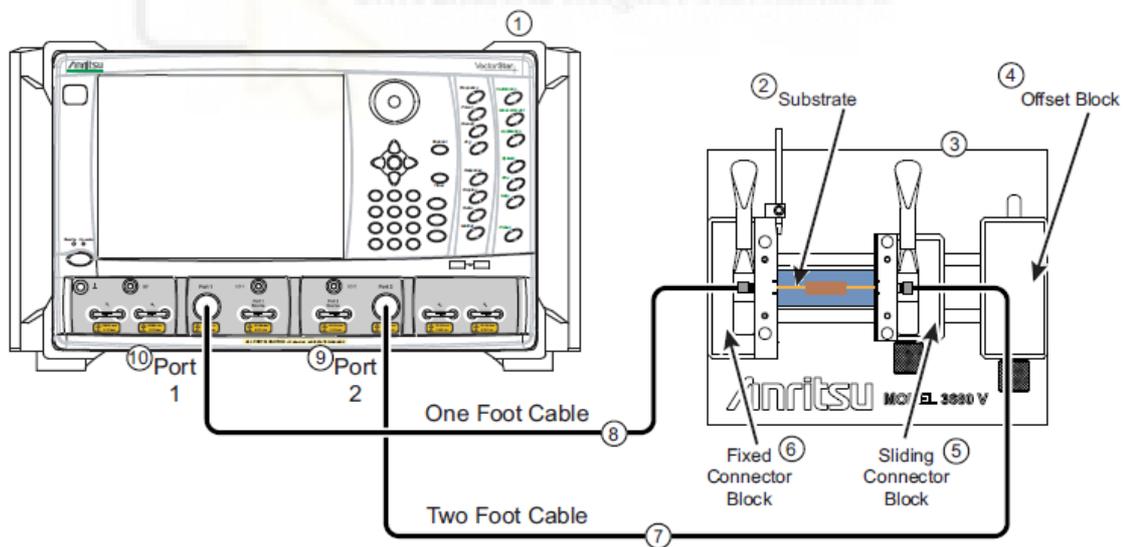


Figura 26. Esquema medición mediante el UTF y VNA. [20]

3.4. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Entre los dispositivos de medida que vamos a necesitar para la correcta realización del proyecto, encontramos el analizador de redes vectorial (VNA, *Vectorial Network Analyzer*) y el software *DinoCapture*.

- ANALIZADOR DE REDES VECTORIAL (VNA):

El VNA es un instrumento mediante el cual seremos capaces de analizar las propiedades de las redes eléctricas de los circuitos que diseñemos y fabriquemos. Podremos analizar las propiedades de transmisión y reflexión de las señales eléctricas: los Parámetros S. Este tipo de analizador se emplea frecuentemente en sistemas de radiofrecuencia (RF).

En nuestro caso, contamos con un VNA modelo MS46122A de Anritsu de 2 puertos, capaz de analizar y hacer un barrido en frecuencia hasta 8GHz. Es necesario este instrumento para la caracterización de nuestros circuitos y poder obtener una respuesta analítica de los circuitos fabricados.



Figura 27. Analizador de redes vectorial de Anritsu.

Para obtener medidas reales y de precisión, deberemos primeramente calibrar el dispositivo. Los dos puertos del VNA son suficientes para medir los Parámetros S de nuestros circuitos, ya que trabajaremos con tecnología microstrip y sólo será necesario obtener los parámetros S_{11} y S_{21} . Dichos parámetros hacen referencia a la potencia reflejada en el puerto de entrada y la potencia transmitida al puerto 2, puerto de salida.

Para la calibración, necesitaremos unos dispositivos de prueba, elementos que presentan una respuesta conocida ante una señal de entrada también conocida. Los elementos que utilizaremos para la calibración de las señales reflejadas serán: una red abierta (OPEN), una red en cortocircuito (SHORT) y una red con carga de 50 ohm (LOAD). Todas ellas colocadas en el puerto de entrada (PORT 1). Además, para calibrar la transmisión de un puerto a otro emplearemos una red de conexión (THRU).

El estado de estos elementos y de las sondas del analizador deberán estar en buenas condiciones, ya que cualquier desperfecto en los elementos de calibración, conllevará una calibración del VNA deficiente y en consecuencia, unos resultados obtenidos poco fiables.

- **DINOCAPTURE 2.0:**

Se trata de un software que controla una cámara por USB. A grandes rasgos, lo utilizaremos como un microscopio electrónico. Mediante este mecanismo, podremos capturar imágenes y realizar mediciones con gran precisión gracias al elevado número de aumentos que dispone. Así mismo, podremos comprobar el estado de las pistas de nuestros circuitos, medir sus alturas, etc.

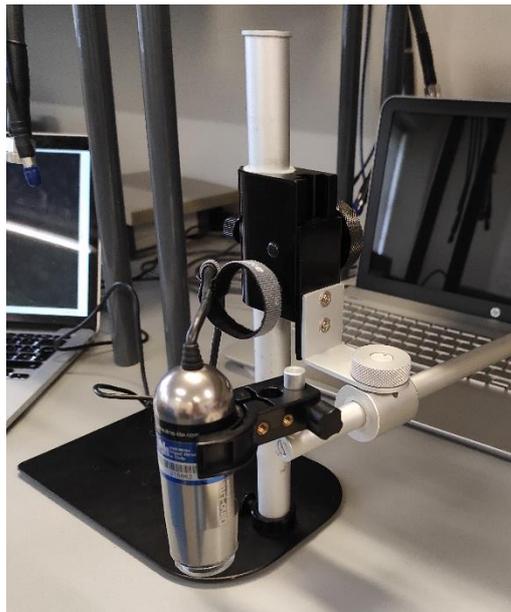


Figura 28. Cámara USB del *DinoCapture 2.0*.

3.4. PROGRAMAS SOFTWARE

Una de las partes de mayor peso para la realización del proyecto son los programas necesarios para el diseño, simulación y fabricación del sustrato y del comportamiento del circuito. Los programas utilizados son los siguientes:

- ANSYS HFSS (*High Frequency Structure Simulator*):

Es un programa de simulación electromagnética (EM) en 3D para el diseño y simulación de circuitos de alta frecuencia como antenas, circuitos de microondas... Mediante él, diseñaremos los sustratos de diferentes dimensiones y el circuito final de este proyecto. Simularemos la respuesta que tiene y la compararemos con los resultados obtenidos empíricamente.

- ADVANCED DESIGN SYSTEM (ADS):

Al igual que el HFSS, el ADS es un programa de diseño y simulación EM de circuitos electrónicos, de alta frecuencia, etc. Este programa dispone de dos ventanas de trabajo. El *Schematic*, donde se diseña el circuito mediante componentes de librerías y sobre el cuál se realizarán análisis y simulaciones, y el *Layout*, en el que se podrá observar el formato del circuito que tendrá sobre la placa. En nuestro caso, trabajaremos con la ventana de *schematic*, ya que el sustrato lo fabricaremos mediante la impresora. Fundamentalmente, emplearemos el ADS para la simulación del comportamiento de los diferentes circuitos de test, y para la caracterización de la resina utilizada.

- AUTOCAD:

Autocad es un software de diseño asistido por ordenador utilizado para diseños 2D y modelado 3D. Lo utilizaremos para el ajuste y diseño de algunas partes de los circuitos a fabricar.

- FREECAD:

Se trata de un software libre de código abierto de diseño asistido por ordenador en 3D que admite una amplia gama de formatos de archivo, incluidos STEP, IGES, STL, SVG, OBJ... Nosotros lo emplearemos como pasarela entre el HFSS

y el slicer, para convertir archivos .step en .stl.

- CHITUBOX:

CHITUBOX es un slicer gratuito y multiplataforma que se emplea para crear un diseño a capas del modelo 3D a imprimir. Se utiliza para impresoras 3D con tecnología SLA, como es nuestro caso. Su función principal es crear las sucesivas capas, además de ajustar ciertos parámetros de impresión para que el objeto se cree de forma correcta y según nuestros objetivos.

Una de las ventajas de utilizar este slicer es que presenta una velocidad de ‘rebanado’ (dividir en capas) muy alta frente a otros programas con la misma función. Además, cuenta con una opción de generación de soportes automáticos y manuales. Como ya sabemos, este tipo de impresión necesita de soportes para evitar que la pieza que se esté imprimiendo se desprenda de la plataforma de construcción y caiga al tanque de resina. Esta función de soportes automáticos es lo suficientemente efectiva como para no tener que revisar si es necesario la creación de más soportes adicionales. Este apartado es bastante personalizable y versátil, ya que puedes decidir sobre la forma, profundidad de contacto, diámetro y longitud de los soportes (Figura 27). Una de las opciones de los soportes, es que la zona de contacto con el objeto sea de forma esférica, cónica o piramidal. Hay que tener en cuenta el valor de la profundidad de contacto, en consecuencia, si ésta es muy elevada, podría dañar el objeto creando agujeros en su superficie.

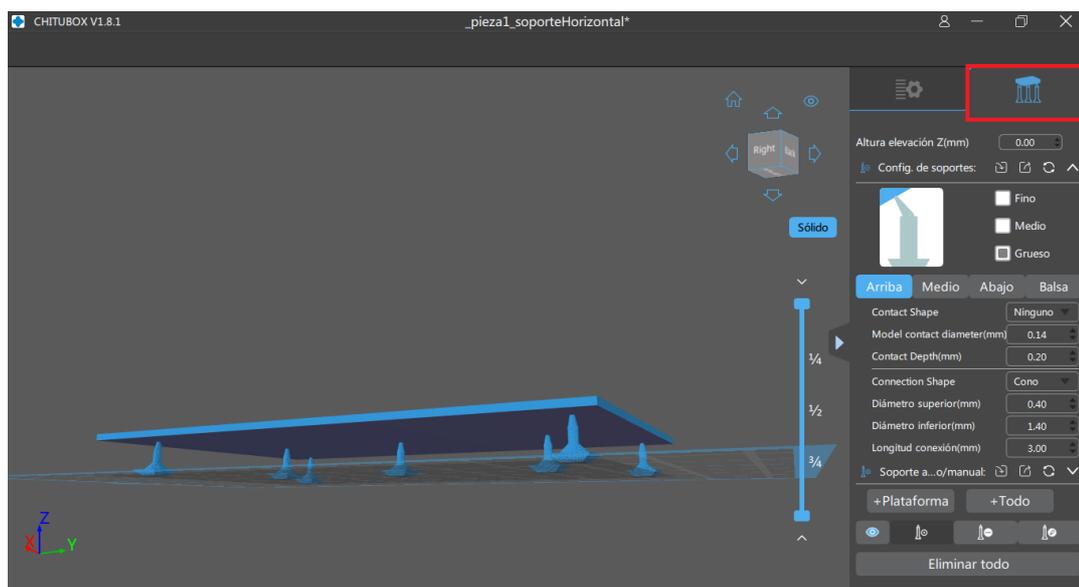
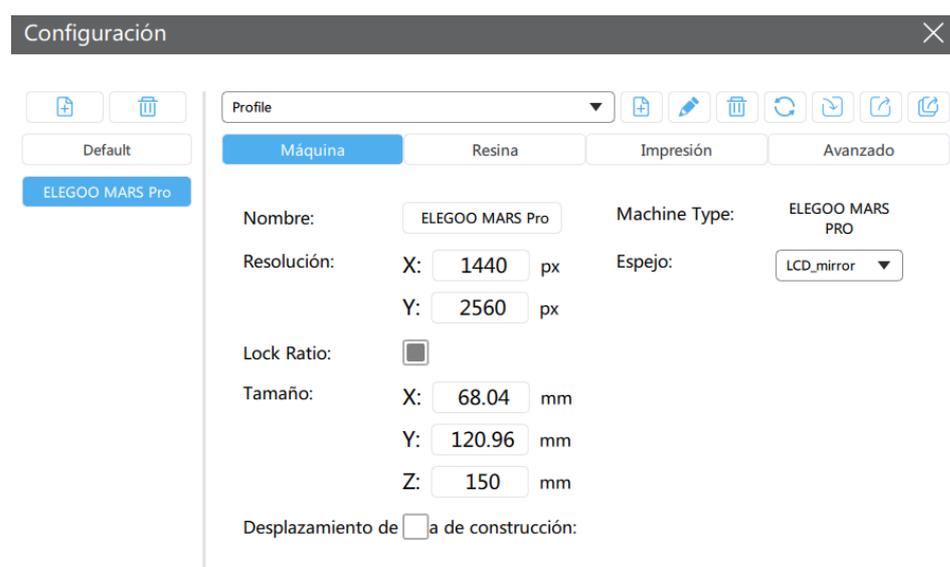


Figura 29. Apartado de generación de soportes en CHITUBOX.

Así mismo, este programa cuenta con diferentes acciones como mover, rotar, escalar... Podemos mover los modelos a la posición establecida dentro de los límites de la base de la plataforma de impresión e incluso está la opción de posicionamiento automático, para posicionar cualquier objeto en el centro o en alguno de los ejes de forma rápida. Podemos realizar giros en las piezas según un sentido de rotación y ángulo. También, contamos con la opción de escalar y de reflejar los modelos seleccionados. Además, podemos clonar objetos para una impresión en paralelo y ahorrar tiempo. Adicionalmente, CHITUBOX ofrece la posibilidad de convertir piezas sólidas en huecas seleccionando la estructura y densidad de relleno que queramos, pudiendo dar cierto espesor a las paredes que conforman el objeto. Es recomendable la creación de agujeros de drenaje si se ahueca una pieza, ya que de lo contrario, la resina se quedaría en el interior de las paredes. Mediante esta práctica, ahorraremos una gran cantidad de material.

A continuación, trataremos uno de los aspectos más importantes para que las impresiones que se realicen se lleven a cabo de la forma correcta. Dentro de este software, en el apartado de 'Configuración', encontramos una gran cantidad de parámetros, todos ellos modificables. Dentro de la pestaña 'Máquina', tendremos que seleccionar el tipo de impresora que vamos a emplear, y automáticamente, se establecen los parámetros recomendables para el modelo seleccionado. En nuestro caso sería la impresora ELEGOO MARS PRO, con una resolución del plano XY de 1440x2560 píxeles entre otros valores. (Figura 28).



The image shows a software configuration window titled 'Configuración'. On the left, there are buttons for 'Default' and 'ELEGOO MARS Pro'. The main area has a 'Profile' dropdown menu and a set of tabs: 'Máquina' (selected), 'Resina', 'Impresión', and 'Avanzado'. The 'Máquina' tab contains the following settings:

Nombre:	ELEGOO MARS Pro	Machine Type:	ELEGOO MARS PRO
Resolución:	X: 1440 px Y: 2560 px	Espejo:	LCD_mirror
Lock Ratio:	<input type="checkbox"/>		
Tamaño:	X: 68.04 mm Y: 120.96 mm Z: 150 mm		
Desplazamiento de	<input type="checkbox"/> a de construcción:		

Figura 30. Valores recomendados para la impresora ELEGOO MARS PRO.

En el apartado de '*Resina*', simplemente nos calcula en unidad monetaria el coste que conlleva la impresión de la pieza según el tipo de resina y densidad una vez que se ha modelado en capas el objeto y sabemos cuántos mililitros son necesarios.

Dentro de '*Impresión*', nos encontramos con los parámetros clave de la impresión y que hay que tener en cuenta:

- Altura de capa: grosor de cada capa impresa. La altura recomendada es de 0.05mm, pero puede estar entre 0.01mm y 0.2mm. Hay que tener en cuenta que cuanto más alta sea la capa, deberá tener un tiempo de exposición mayor para que se cure bien cada capa.
- Tiempo exposición: tiempo de exposición a la fuente de luz ultravioleta de las capas que conforman el objeto. Se recomienda un tiempo de 3 a 6 segundos, dependiendo de la complejidad del modelo. Cuanto más tiempo de exposición, mejor curación de las capas y en proporción, un mayor tiempo de impresión.
- Total capas inferiores: número de capas 'de base' que se añaden al modelo. Es de vital importancia tener este factor en cuenta, ya que modificará el grosor final del objeto a imprimir. Estas capas serán necesarias a la hora de imprimir objetos o piezas de grandes dimensiones y que tendrán en proporción un mayor peso. De esta forma garantizaremos la adhesión en la plataforma de construcción. El número recomendable de capas inferiores es de 3-6 capas, pudiendo poner este valor a cero si fuera necesario.
- Tiempo exposición inferior: tiempo de exposición (a la luz UV) de las capas inferiores. Este valor oscila entre 30-80 segundos, dependiendo también de las especificaciones de la resina que estemos usando. Cuanto mayor sea este tiempo, mayor será la fuerza de unión entre el objeto y la plataforma de impresión.

- Retardo de apagado/Retardo de apagado inferior: tiempo de retardo para el apagado de la fuente de emisión de luz. Se recomienda dejarlo a 0 segundos por defecto.
- Distancia de elevación: distancia entre la plataforma de impresión y la superficie de impresión durante el proceso de creación de las capas normales. Se recomienda de 3 a 5mm de distancia.
- Distancia de elevación inferior: distancia que se aleja la plataforma de la superficie de impresión en el proceso de impresión de las capas inferiores. Se recomienda una distancia de 5mm.
- Velocidad de elevación: velocidad a la que se aleja la plataforma de impresión de la superficie de impresión durante la impresión de las sucesivas capas. Este valor es de 100mm/min.
- Velocidad elevación inferior: velocidad a la que se aleja la plataforma de impresión de la superficie de impresión durante la impresión de las capas inferiores. Este valor es un poco inferior al de las capas normales, 90mm/min.
- Velocidad de retracción: velocidad del movimiento de la plataforma cuando se encuentra cerca de la superficie a conformar durante el proceso de impresión. Se recomienda una velocidad de 150mm/min.

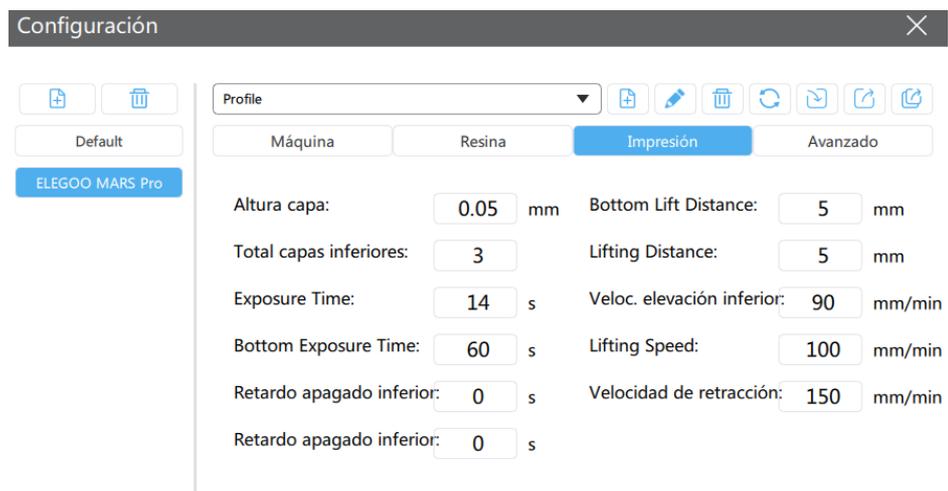


Figura 31. Valores de impresión recomendados para la MARS PRO.

Por último, en la pestaña 'Avanzado', encontraremos la opción de activar el antialiasing, para un acabado de la superficie totalmente liso.

Por otra parte, CHITUBOX al ser un slicer, cuenta con la función de previsualización en tiempo real de cómo se va a ir imprimiendo nuestro objeto, el tiempo total de impresión, el número de capas totales que van a conformar la pieza y el volumen de resina que utilizará (Figura 30). Además, desde esta ventana, podremos guardar nuestro objeto como un modelo en capas y listo para ser impreso, en este caso con formato CHITUBOX:.ctb. Hay que tener en cuenta que una vez hayamos exportado el modelo como .ctb, ya no podrá ser modificado (rotar, mover escalar...), sólo podremos cambiar los parámetros de impresión.



Figura 32. Previsualización del objeto a imprimir en CHITUBOX.

Como acabamos de mencionar, al crear el modelo en capas del objeto a imprimir, éste cuenta con su propio formato de archivo: .ctb, pero es compatible con un gran número de formatos, entre ellos .stl, .obj, .photon, .zip, .slc.

3.5. PROCESO DE CALIBRADO Y MANTENIMIENTO DE LA IMPRESORA

En este apartado describiremos detalladamente los pasos a seguir para la puesta en marcha, calibrado y mantenimiento de la impresora.

Primero de todo, antes de imprimir hay que asegurar que la zona de trabajo esté limpia y que la impresora no contenga partículas de polvo, sobre todo en la superficie de la plataforma de construcción. Cualquier partícula de polvo podría influir en las impresiones. También, deberemos tener en cuenta una serie de precauciones. Es aconsejable que la ubicación de la impresora esté en una zona con buena ventilación, ya que durante la impresión, la resina desprende un olor fuerte. Será necesario el uso de guantes y una mascarilla. Así mismo, comprobaremos el estado de la lámina FEP del tanque y aseguraremos que no presenta ninguna borrosidad y que está totalmente limpia. Cualquier mancha o mota de polvo, evitará el paso de la luz en esa pequeña zona y la impresión no será óptima.

El calibrado de la MARS PRO es bastante sencillo e intuitivo. Primero, insertaremos la plataforma de impresión en la guía lineal (eje Z) y apretaremos la rosca. Ésta presenta dos tornillos que deberemos aflojar con una llave allen en cierto orden para no dañar la base. Primero, aflojaremos el tornillo frontal y seguidamente el del lateral, como podemos observar en la Figura 31 para que la base pueda adaptarse al bajar y hacer contacto. Además, intentaremos que quede bien orientada, puesto que posteriormente habrá que apretar dichos tornillos.

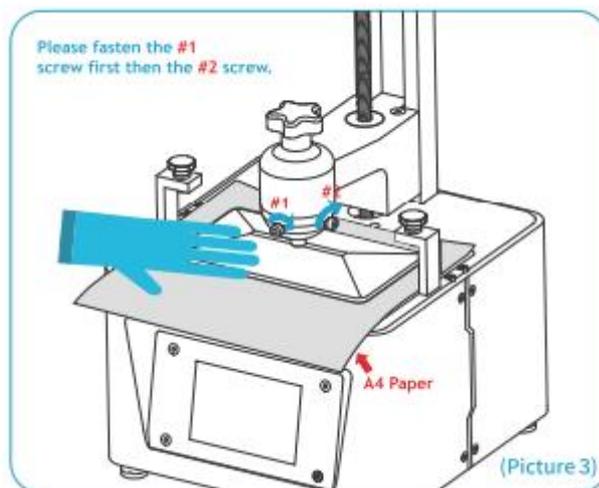


Figura 33. Proceso de calibración de la impresora MARS PRO.

A continuación, retiraremos el tanque de resina y colocaremos un folio en su posición (Figura 32). Este paso es muy importante ya que el grosor del folio es el ‘calibrador’ del eje Z de nuestra impresora. Tras varias pruebas y mediciones, el folio de calibración debe ser de 125 micras, grosor que coincide con la lámina de FEP del tanque de resina. Depositado el folio, bajaremos la plataforma de impresión. Para ello, accederemos mediante la pantalla táctil a ‘Tools’ → ‘Manual’ → ‘Home’ (icono casa) y comenzará a descender.



Figura 34. Calibración de la impresora mediante un folio de 125 micras.

Una vez haya hecho contacto la base de la plataforma con el folio, apretaremos los tornillos en el mismo orden, primero el frontal y después el del lateral. Sin retirar el folio, accederemos a ‘Tools’ → ‘Set z=0’ → ‘Confirm’. De esta forma, acabamos de establecer el punto en el que se encuentra la plataforma como el cero en el eje Z. Esto es de vital importancia, ya que todas nuestras impresiones se van generando según este eje, por lo que una mala calibración de la impresora conllevará una mala impresión.

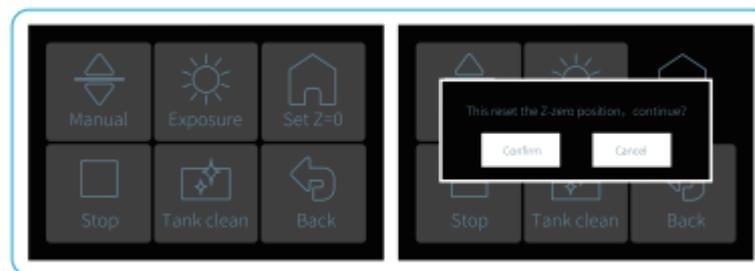


Figura 35. Confirmación de la calibración establecida.

Calibrada ya la impresora, elevaremos la plataforma pulsando unas 10 veces el botón 10mm: 'Tools' → 'Manual' → '10mm'. A continuación, colocaremos el tanque de resina en su posición y apretaremos las roscas para asegurar su fijación y que no se desplace durante la impresión. Por último, colocaremos la carcasa protectora para evitar olores y el filtrado de luz ambiente. Es aconsejable mantener la estancia con la luz apagada para evitar su influencia durante la impresión, puesto que la resina es fotosensible y podría influir en sus características.

Para imprimir cualquier fichero, simplemente accederemos desde el menú principal a 'Print' → 'Seleccionar fichero' → 'Play'.

3.6. PROCESO DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SUSTRATO

Para poder caracterizar la resina deberemos realizar varias pruebas de impresión de sustratos. A continuación describiremos los pasos a seguir y aspectos a tener en cuenta para la impresión.

3.6.1. Diseño en HFSS

Primero de todo, realizaremos el diseño del circuito mediante el programa HFSS. Esta herramienta nos permite ir modificando las dimensiones que tendrá el sustrato a fabricar dependiendo de las especificaciones del circuito. Además, al poder simular su comportamiento, será más sencillo posteriormente comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los teóricos obtenidos a través de dicha simulación.

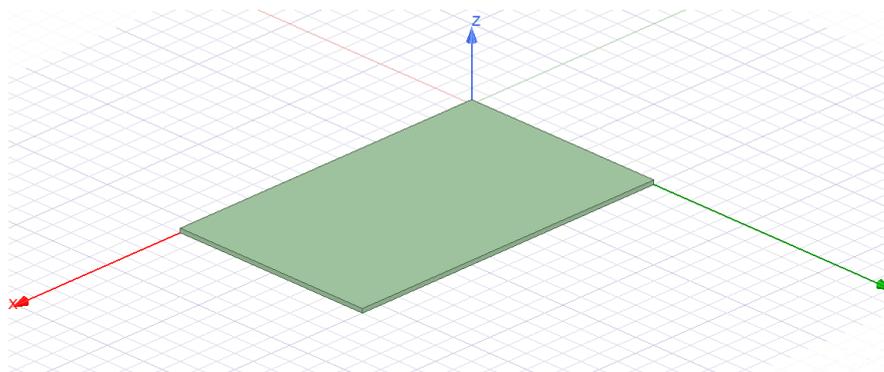


Figura 36. Ejemplo diseño sustrato mediante HFSS.

La Figura 35 muestra un ejemplo de diseño de un sustrato de 1mm de altura (H). A continuación, deberemos de exportar el diseño en formato .step accediendo a 'Model' → 'Export geometry'.

Una vez tengamos el archivo con el modelo del sustrato, mediante el programa FREECAD, convertiremos el formato .step en .stl, formato estándar que se utiliza para los modelos de impresión 3D. Seguidamente, abriremos el archivo en CHITUBOX.

3.6.2. División en capas mediante el slicer CHITUBOX

Al abrir el diseño en el CHITUBOX, podremos realizar varias acciones (rotar, mover, escalar...) antes de dividir el modelo en capas a lo largo del eje Z.

Pero antes, deberemos tener en cuenta una serie de aspectos. Como bien hemos explicado en apartados anteriores, al tratarse de una impresora de resina, la plataforma de construcción descenderá a lo largo del eje Z, se sumergirá en el tanque que contiene la resina y se irá elevando según las capas correspondientes. Ahora bien, hay que tener en cuenta que si posicionamos las piezas a imprimir de forma vertical, el tiempo que tardará en imprimirse será mucho mayor que si se posiciona en horizontal (paralela a la superficie de la plataforma de construcción) ya que las piezas se imprimen por capas. A mayor altura de diseño, más capas y en consecuencia, más tiempo. No obstante, podemos sacarle partido a este factor si imprimimos en paralelo. Al imprimir capa por capa, podemos posicionar en la plataforma tantos objetos como sea posible, siendo el tiempo de impresión el mismo que si se imprimiera 1 sólo (Figura 37).

Por otra parte, tenemos que ser conscientes del tamaño y volumen de los objetos que vayamos a imprimir, ya que dependiendo de las dimensiones, será más conveniente posicionarlo de una forma u otra para la impresión. Si imprimimos piezas de un tamaño notable, tendremos que añadir una base de impresión mediante un número elevado de capas inferiores para que la pieza

se adhiera bien a la plataforma de construcción y no se desprenda. También está la opción de añadir soportes en puntos de apoyo clave para evitar que se deforme o se caiga al tanque de resina. En nuestro caso, los sustratos son piezas normalmente de muy poca altura (1-2mm) por lo que ese problema no nos afectaría. Sin embargo, al contar la mayoría de los sustratos con una superficie lisa, al imprimirlo de forma horizontal en la plataforma de impresión, se puede generar el ‘efecto ventosa’. Cuanto mayor sea la superficie de contacto entre el objeto a imprimir y la plataforma, mayor fuerza de adhesión y por lo tanto, costará un poco más retirarlo una vez se haya impreso. Podemos contar con la ayuda de una espátula para retirar el sustrato, con cuidado de no rallar la superficie de la plataforma de impresión.

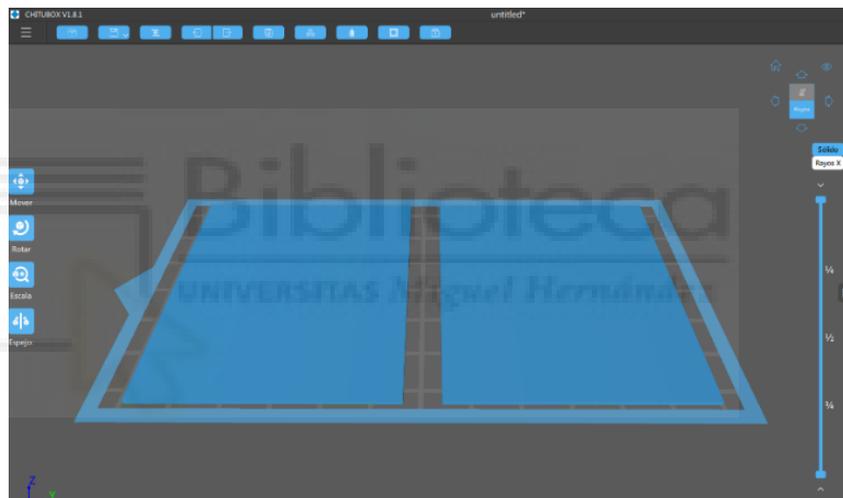


Figura 37. Modelo de impresión de 2 sustratos en paralelo.

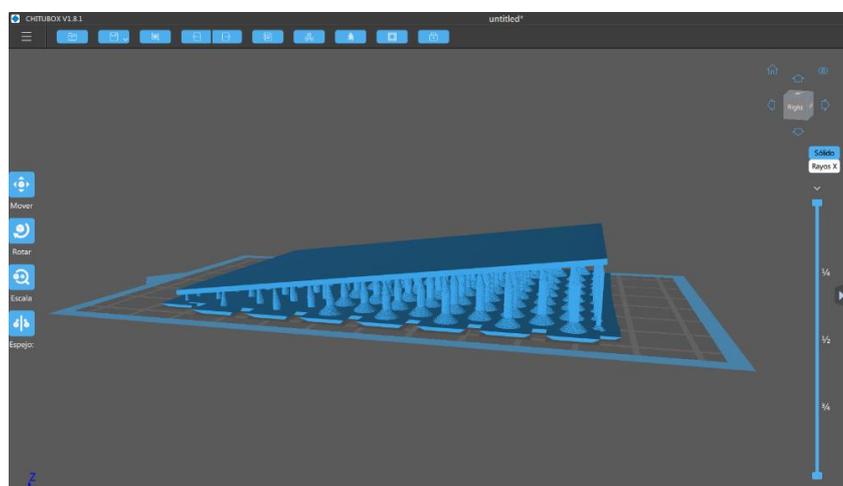


Figura 38. Modelo de impresión de un sustrato con soportes.

3.6.3. Impresión del sustrato

Para la fabricación del sustrato, deberemos seguir los pasos del apartado 3.5. Primero de todo calibraremos el eje de la impresora al cero y vertiremos la resina necesaria en el tanque para la impresión. Como ya hemos comentado anteriormente, es aconsejable durante la impresión y cuando retiramos el sustrato ya impreso de la plataforma de construcción, mantener la luz apagada para que ésta no influya en la resina fotosensible.

Una vez haya finalizado la impresión del sustrato, dejaremos goteando un par de minutos (5-7 min) la plataforma de impresión mediante un accesorio especial de la impresora para reciclar el exceso de resina que haya podido quedar adherido en la superficie del propio sustrato y de la plataforma. Si imprimimos el sustrato paralelo a la superficie de la plataforma, es posible que haya creado el ‘efecto ventosa’ y tengamos que emplear una espátula para su retirada. Los pasos a seguir a continuación son de gran importancia, ya que se trataría del posacabado necesario para este tipo de tecnología de impresión 3D.

La pieza impresa, primeramente será limpiada con alcohol isopropílico o alcohol etílico de más de 95°. Nos podemos ayudar de papel absorbente para una mayor limpieza. A continuación, sumergiremos el sustrato en un recipiente con el limpiador 3DJAKE (*Resin Cleaner*) cubriendo todas las superficies del sustrato entre 5 y 15 minutos. El tiempo dependerá de la resistencia y curación deseada para el sustrato. De esta forma, todo exceso de resina no curada será eliminada. Una vez sea retirado del limpiador, se secará con papel y se puede introducir en una lámpara de luz ultravioleta o exponer a la luz solar durante 10 min. En nuestro caso, como posteriormente metalizaremos el sustrato, adquirirá rigidez y no será necesario exponerlo a la luz UV.

Esta tecnología conlleva un proceso laborioso de posacabado y sobre todo, de limpieza de la propia impresora. Se tiene que limpiar bien tanto la plataforma como el tanque de resina. Para ello, la resina que haya sobrado de la impresión la verteremos de nuevo al bote de resina filtrandola, por si se hubiera depositado algún vestigio durante la impresión. Una vez filtrada

la resina, limpiaremos la resina que siga impregnada en el tanque con papel y posteriormente, limpiaremos mediante alcohol etílico o etanol y con ayuda de papel. El FEP del tanque tiene que quedar lo más poluto posible y sin ninguna borrosidad, ya que podría influir en impresiones futuras.

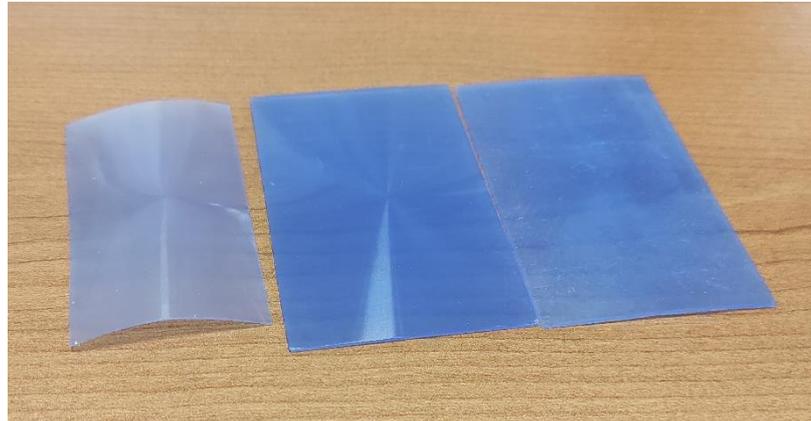


Figura 39. Ejemplos de sustratos fabricados de distintas alturas.

3.7. PRUEBAS PRELIMINARES DE SUSTRATOS

En las primeras impresiones que realizamos de distintos sustratos no obtuvimos los resultados que esperábamos. De hecho, realizamos varios diseños de sustratos con diferentes alturas y distintos parámetros de impresión.

El primer sustrato que fabricamos le correspondía una altura de 1mm. Al comprobar su altura mediante un calibre, obtuvimos un valor de 1.55mm. No tuvimos en cuenta que el número de capas inferiores de impresión, son aditivas a la altura del diseño. En ese caso, establecimos un número de capas inferiores de ocho. El número de capas inferiores que añadamos hay que tenerlo siempre en cuenta, ya que nuestro objetivo final es la fabricación de sustratos de baja altura y necesitamos cierto nivel de precisión.

Sabiendo que las capas inferiores podían de cierta forma ser parte de la altura del sustrato, iremos modificando la altura de capa, el número de capas inferiores y con la altura de diseño del sustrato. Intentamos pues, crear uno exclusivamente de capas inferiores. Es decir, establecimos una altura de capa inferior de 0.05mm, un total de capas de 19 y una altura de diseño de 0.05mm. En total constituirían un sustrato de

1mm. Pero no fue así. La impresora solidificó únicamente la capa del diseño, y obtuvimos un sustrato fino, pero con algunos orificios pequeños (Figura 40). Seguidamente, fabricamos otro sustrato con 5 capas inferiores de 0.05mm de altura, y un diseño de 0.75mm. Nuevamente, en teoría deberíamos de obtener 1mm de altura total. Obtuvimos un sustrato de 1.25mm y al intentar extraerlo de la plataforma de impresión, se quebró una punta. A continuación, podemos observar la altura de un sustrato donde en la parte de abajo sobresale un pequeño reborde. Este reborde corresponde las capas inferiores que se han añadido al diseño del sustrato (Figura 40).

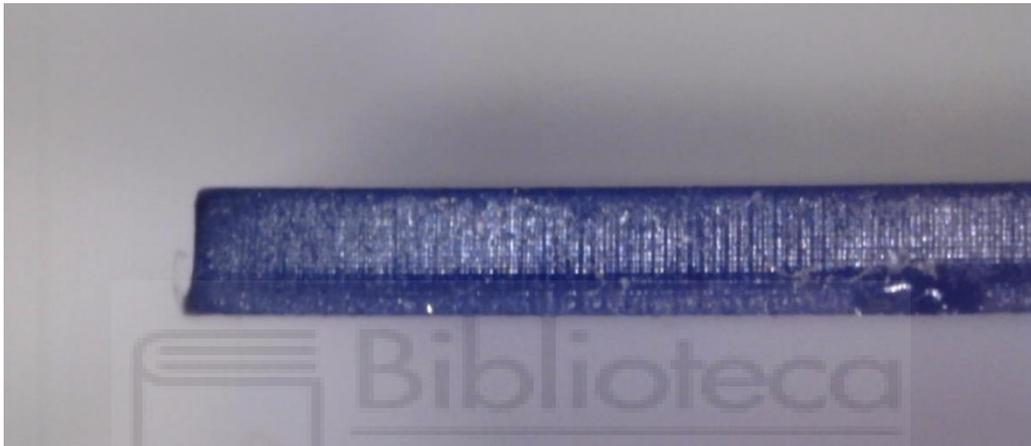


Figura 40. Sustrato fabricado con capas inferiores.

Como solución, modificamos el parámetro de impresión y establecimos el número de capas inferiores a cero. Esto mejoró bastante los valores de los posteriores sustratos que fabricamos. Pero, aun así, no conseguíamos los valores exactos. La precisión del eje X e Y era casi perfecta. Sólo necesitábamos ajustar más el eje Z. Así que el problema estaba en la calibración. Tras darle bastantes vueltas, dedujimos que el fallo estaba en el folio de calibración. El manual de la impresora explica que se debe de hacer con un folio, pero no especifica de qué grosor. El FEP del tanque de resina tiene 125 micras de altura y la plataforma de impresión a la hora de calibrar, desciende hasta abajo del todo. Una altura igual a la del FEP cuando se está imprimiendo alguna pieza. Por ello, empezamos a emplear el folio de 125 micras de altura para la calibración y los resultados mejoraron notablemente.

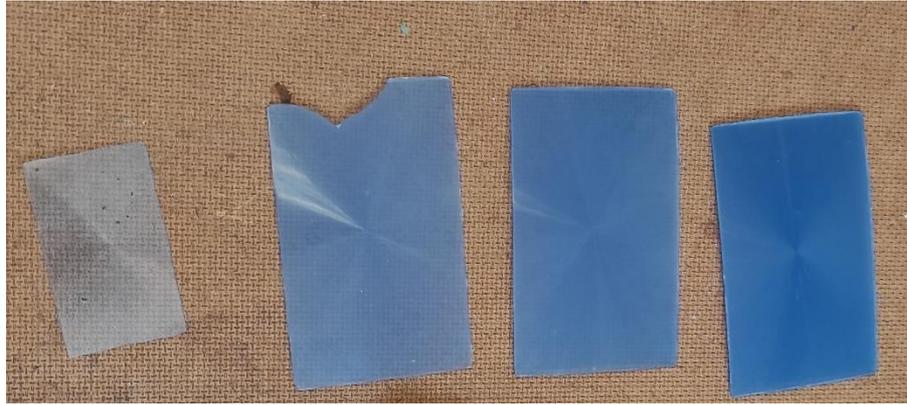


Figura 41. Distintos sustratos de prueba.

Por otra parte, diseñamos una escalera donde cada escalón correspondía a una diferencia de 200 micras, hasta llegar a 3mm de altura. De esta forma, podíamos comprobar la precisión de impresión del eje Z.

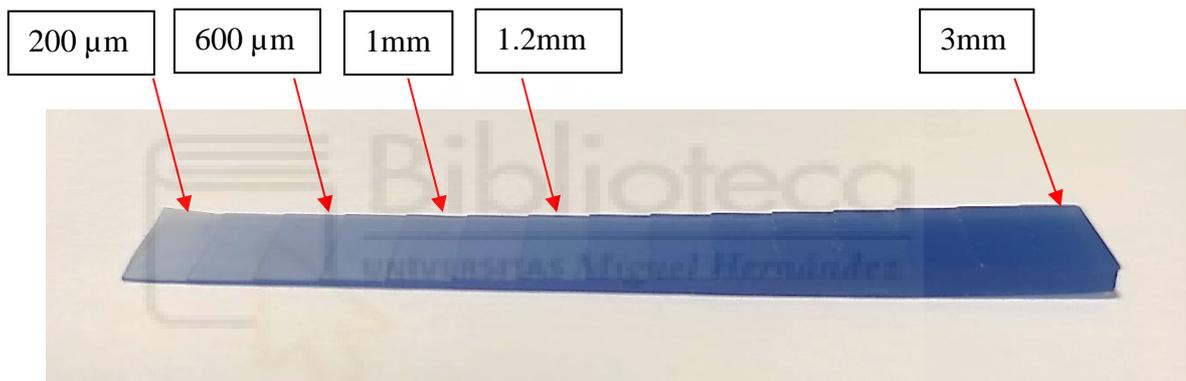


Figura 42. Escalera de 200μm hasta 3mm en pasos de 200μm.

La Figura 41 muestra la fabricación, pero los valores señalados son los teóricos. Para comprobar de forma precisa la altura de los escalones, hemos empleado el microscopio electrónico *DinoCapture 2.0*.

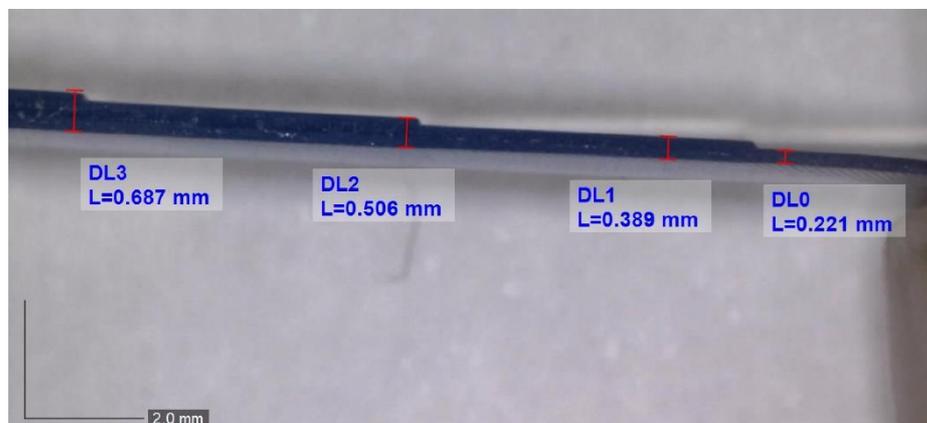


Figura 43. Mediciones de los primeros escalones (200μm, 400 μm, 600 μm y 800 μm).

Como podemos observar en la Figura 43, los valores obtenidos se asemejan a los teóricos. Hay que tener en cuenta que, al situar la línea de medición en el software, puede que haya cierto error humano.

Realizamos también una medición de cada escalón mediante un calibre digital. Al tratarse de valores de micras y dependiendo de la fuerza que se ejerza sobre el calibre, el valor puede fluctuar en comparación con el real. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

VALOR TEÓRICO (mm)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.8	3
VALOR MEDIDO (mm)	0.26	0.41	0.52	0.64	0.75	0.9	1.05	1.23	1.41	1.62	1.81	2.04	2.21	2.32

Tabla 1. Mediciones de los escalones.



CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA RESINA MEDIANTE CIRCUITOS DE TEST

En este capítulo, primero realizaremos el diseño de unos circuitos simples (líneas de transmisión y resonadores) y su posterior fabricación para conocer cómo se comporta la resina como dieléctrico, ya que conocemos la respuesta de estos circuitos. Para ello, realizaremos un proceso de impresión, metalización y fresado. En segundo lugar, diseñaremos y fabricaremos un resonador $\lambda/4$ en FR4 para caracterizar el material epoxi utilizado en la metalización. Por último, caracterizaremos la resina 3DJAKE empleada como sustrato para obtener sus parámetros característicos, como la constante dieléctrica (ϵ_r) y sus pérdidas.

4.1. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LOS CIRCUITOS DE TEST

Nuestro objetivo en este apartado va a ser diseñar dos sustratos que contendrán una línea de transmisión simple, otra línea de mayor longitud, y dos resonadores de longitud del stub de $\lambda/2$ y $\lambda/4$ acabados en circuito abierto. Al ser circuitos sencillos y de prueba, iremos modificando la anchura de la línea para que la frecuencia de resonancia se encuentre dentro de un rango de frecuencias de interés. Para ello, haremos un diseño y simulación en ADS.

4.1.1. Diseño en ADS de los circuitos de test

Vamos a crear mediante los componentes correspondientes del programa ADS un resonador de longitud $\lambda/4$ acabado en circuito abierto para obtener un primer valor aproximado de la longitud del stub y el ancho de la línea. Rápidamente podemos obtener:

$$l_{stub} = \frac{\lambda}{4} \rightarrow \lambda = 4 \cdot l_{stub} \quad (1)$$

Suponemos una longitud del stub aproximada de 25mm (L) y una anchura (W) igual al de la línea de 1mm. Respecto al sustrato, como aún no

conocemos los parámetros de la resina, suponemos una $\epsilon_r=3$ y tangente de pérdidas de 0.03 con una altura (H) de sustrato igual a 1.5mm. Las dimensiones del sustrato serán 50mm x 60mm. El stub lo posicionaremos en el centro del sustrato, por lo que lo consideraremos una red simétrica y, por lo tanto, el parámetro S_{11} será igual al S_{22} . Realizaremos un barrido en frecuencia desde 10MHz hasta 8GHz. Calculamos matemáticamente una aproximación de las frecuencias de interés:

$$f = \frac{c}{2 \cdot l_{stub} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 0.025 \cdot \sqrt{3}} \approx 3.46 \text{ GHz} \quad (2)$$

Por lo tanto, con estas primeras aproximaciones, sabemos que trabajaremos en torno a esta frecuencia. A continuación, optimizaremos estos parámetros mediante ADS ajustando la anchura de la línea y la longitud del stub.

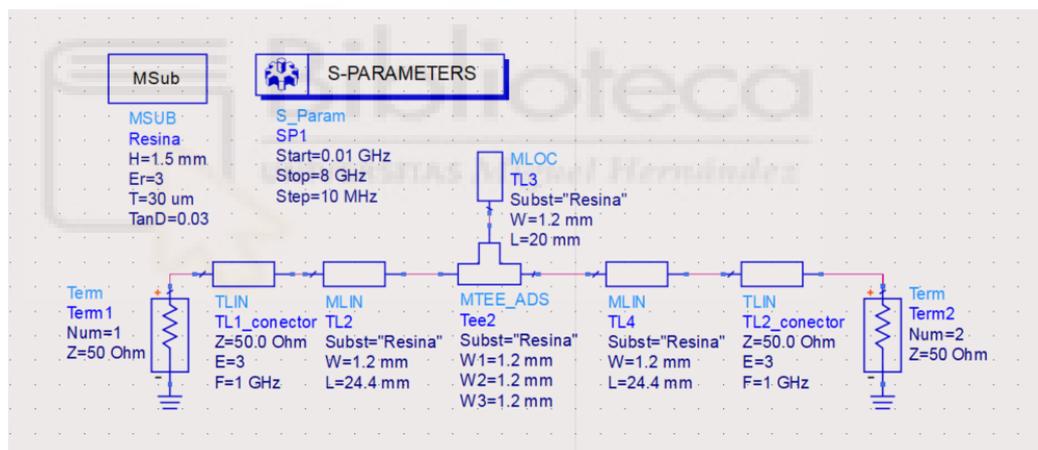


Figura 44. Diseño resonador $\lambda/4$ en ADS.

Como podemos observar en la Figura 44, hemos ajustado la altura del sustrato (H) a 1.5mm. Por otra parte, la anchura de la línea de transmisión tanto del stub como de la propia línea, será de 1.2mm. Y, en consecuencia, la longitud del stub de 20mm. Todos estos valores son aproximados y adaptados a una línea de impedancia característica de 50Ω . Para esta prueba no hace falta realizar una gran optimización ya que se trata de una primera aproximación para caracterizar la resina.

Los resultados obtenidos de los Parámetros S al ejecutar la simulación del anterior diseño es la siguiente:

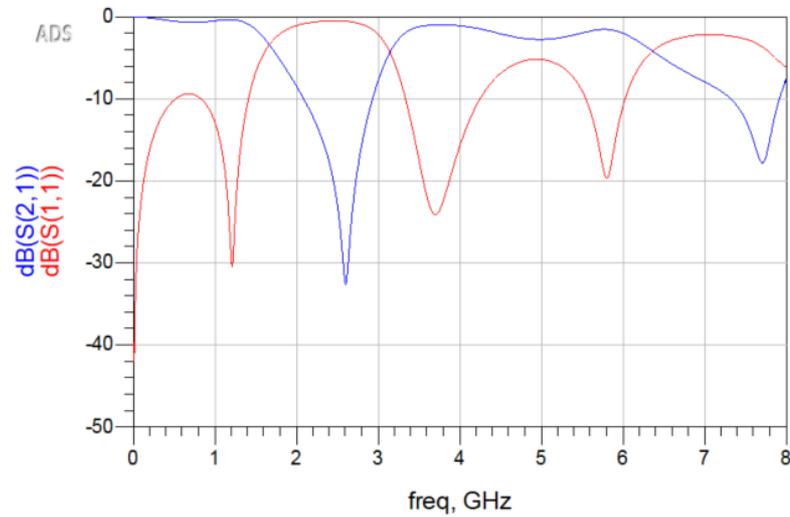


Figura 45. Representación Parámetros S del resonador $\lambda/4$ en ADS.

Observando la figura anterior, podríamos obtener un filtro rechaza-banda en torno a 2.5GHz. Conociendo ahora el comportamiento teórico del resonador, procederemos a diseñar 2 líneas de transmisión simples de anchura 1.2mm y otro resonador, en este caso $\lambda/2$, por lo que su longitud del stub en abierto tendrá que ser aproximadamente un factor $/2$ de la longitud del stub de $\lambda/4$.

Mediante el programa AUTOCAD, deberemos trasladar el diseño de ADS de la Figura 44 a un modelo en 2D a escala 1:1 para poder fresar los circuitos en la fresadora.

4.1.2. Diseño en AUTOCAD de los circuitos de test

Una vez conocidas las dimensiones del sustrato en cuanto a anchura, longitud y altura, y las dimensiones de las pistas de las líneas de transmisión, podemos diseñar un modelo 2D final para la fabricación física de los diseños de los circuitos de test que hemos diseñado.

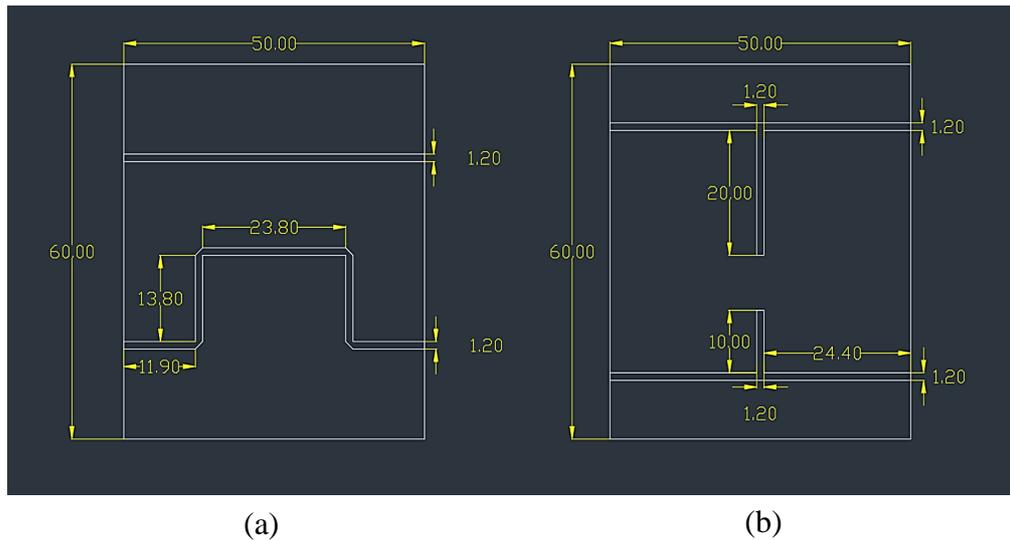


Figura 46. Diseño CAD de los circuitos de test. (a) Diseño líneas de transmisión. (b) Diseño de resonadores $\lambda/4$ y $\lambda/2$.

La Figura 46 (a), hace referencia al diseño de dos líneas de transmisión. Una de longitud 50mm y otra de aproximadamente 75.2mm, ambas a anchura 1.2mm. Por otra parte, la Figura 46 (b), observamos los dos resonadores. En la parte superior el resonador $\lambda/4$ de longitud del stub 20mm y del inferior de 10mm, correspondiente al de $\lambda/2$. El diseño está en escala 1:1, por lo que estas medidas son las que obtendremos físicamente.

Una vez sabemos las dimensiones que tendrán los circuitos y su comportamiento, pasaremos al diseño del sustrato en *HFSS* para su posterior impresión.

4.1.3. Diseño de los sustratos e impresión

Los sustratos correspondientes a los circuitos de test los diseñaremos en *HFSS*. Simplemente crearemos un objeto rectangular de dimensiones 60mm x 50mm x 1.5mm. (Figura 47).

Deberemos exportar su geometría en formato .step y mediante el FREECAD obtendremos el archivo en formato .stl para poder abrirlo con el slicer CHITUBOX.

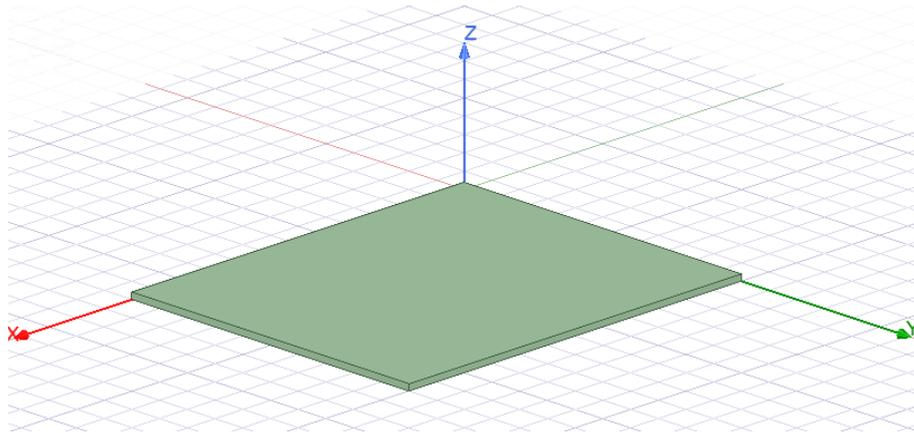


Figura 47. Diseño sustrato de 60x50x1.5mm en HFSS.

Al abrir el modelo en CHITUBOX, sólo nos aparecerá un sustrato. Mediante la opción de *'Duplicar'* podremos añadir una copia adicional del sustrato original y posicionarlas dentro de los límites de la plataforma de impresión (Figura 48). De esta forma, al ser imprimidos en paralelo y a la vez, serán expuestos a las mismas condiciones y parámetros de impresión y sobre todo, la misma altura. De esta forma, garantizamos las mismas características y obtener unos resultados más fiables.

Los parámetros de impresión que vamos a ajustar son los siguientes: 0 capas inferiores, tiempo de exposición de las capas 14s y una altura de capa de 0.05mm. El resto de los parámetros no los modificamos.

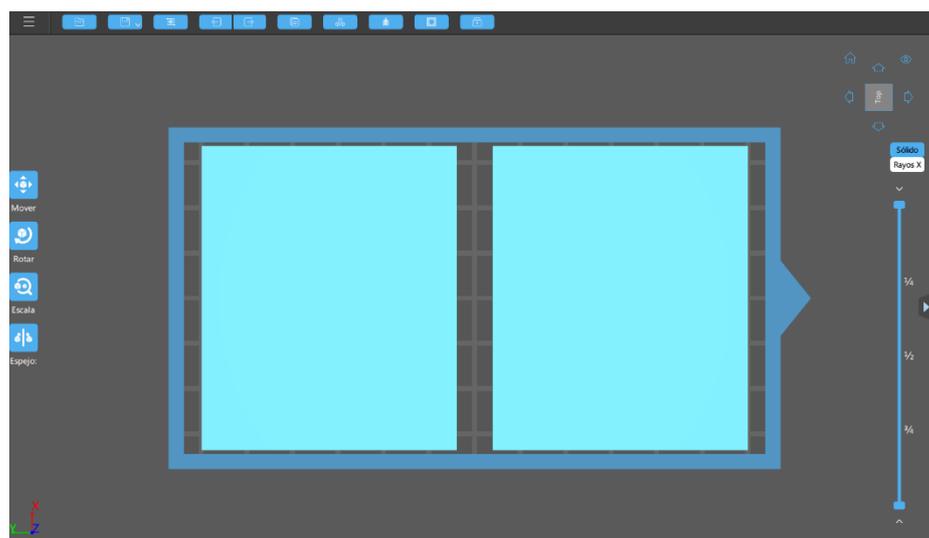


Figura 48. Diseño de los sustratos en paralelo para su impresión.

Siguiendo el proceso descrito en el apartado 3.6.3, obtendremos el modelo en 3D del sustrato. A continuación, deberemos metalizarlos para que adquieran propiedades de conducción.

4.1.4. Metalización de los sustratos

El proceso de metalización de los sustratos lo realizaremos con un adhesivo especial, el adhesivo epoxi *Scotch-Weld EC-2216 B/A gray* de 3M. Para realizar el adhesivo, tendremos que verter en un recipiente una cantidad de 3 partes del endurecedor A y 2 partes del adhesivo B y mezclar ambas partes bien para obtener una mezcla homogénea (Anexo B). Este tipo de pegamento de dos componentes y de curado flexible a temperatura ambiente, ofrece una alta resistencia y adhesión entre diversos materiales como metales, plásticos, cauchos...



Figura 49. Adhesivo epoxi Scotch-Weld 3M 2216 gris.

Una vez tengamos la masilla del epoxi mezclada, recortaremos una lámina de papel de cobre según las dimensiones del sustrato a metalizar, pero que sobresalga un poco por los bordes. Esta capa de cobre tendrá una altura de aproximadamente $35\mu\text{m}$. Mediante un guante de látex, cubriremos la superficie de una cara del sustrato con el adhesivo creado con el dedo. Aplicaremos una fina capa de pegamento intentando que quede uniforme. A continuación, depositaremos el sustrato con la capa de epoxi sobre el cobre y ejerceremos un poco de presión para su adherencia (Figura 50).



Figura 50. Sustrato adherido al cobre mediante una capa de epoxi.

Seguidamente, realizamos el mismo proceso para la otra cara del sustrato, con cuidado de que no se desplace la lámina de cobre debido a que el pegamento todavía no se ha secado y puede resbalar al ejercer cierta fuerza. Una vez que tengamos ambas caras metalizadas, deberemos dejar secar el epoxi aproximadamente durante 8-12 horas. Para que quede una capa uniforme utilizaremos un sargento y láminas de madera lisas para dejar el sustrato entre ambas. Es recomendable poner un folio entre el sustrato y las maderas, por si se desbordase el pegamento de la lámina de cobre no quedase pegado a la madera.

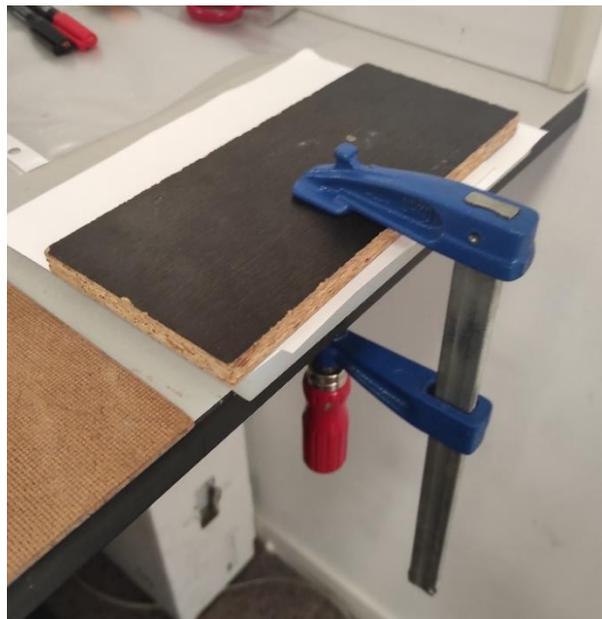


Figura 51. Proceso de pegado del cobre al sustrato de resina.

Una vez hayan transcurrido 12 horas, retiraremos las maderas y el sargento. Obtendremos ya nuestro sustrato metalizado. Sólo habrá que cortar el cobre sobrante de los extremos.



Figura 52. Sustrato de resina metalizado.

4.1.5. Fresado del circuito

Teniendo ya los sustratos impresos y metalizados, ahora fresaremos el circuito en él. Para ello, emplearemos la fresadora del laboratorio *ProtoMat 42* de la marca *LPKF Laser & Electronics*. Mediante el software de la fresadora vamos a ser capaces de abrir el archivo CAD que hemos creado previamente y darle las instrucciones a la máquina.

Utilizaremos 2 fresas de distinto diámetro y funcionalidad.



(a)

(b)

Figura 53. (a) Fresa de perfilar. (b) Fresa de cortar.

La Figura 53 (a) corresponde con la fresa que emplearemos para trazar el contorno de nuestros circuitos, sin llegar a atravesar el material por completo. La emplearemos a nivel de superficie hasta llegar a la profundidad de la capa de cobre y así poder perfilar las líneas de transmisión y los acopladores. El diámetro de esta fresa corresponde con 0.1-0.15mm, dependiendo de la velocidad y potencia a la que trabajemos. La otra fresa (Figura 53 (b)), es de 1mm de diámetro y su funcionalidad es cortar. La emplearemos para trazar el contorno del sustrato en una madera de base, para posicionar el sustrato y servir así de referencia para la fresadora (Figura 54).



Figura 54. Posicionamiento del sustrato en la base de la fresadora.

Comenzaremos con el fresado del circuito. El software de la fresadora divide el modelo CAD en “líneas de guía” por los que pasará la fresa. La profundidad de penetración la podemos regular mediante una rueda que se encuentra en el propio cabezal de la fresadora ($\pm 4\mu\text{m}$). Para comprobar que la fresa no penetre hasta la resina, trazaremos algunas líneas en el sustrato en aquellas zonas donde retiraremos la capa de cobre (Figura 55). De esta forma, nos aseguraremos la correcta altura de la fresa para fresar los circuitos sin llegar a dañar el sustrato.

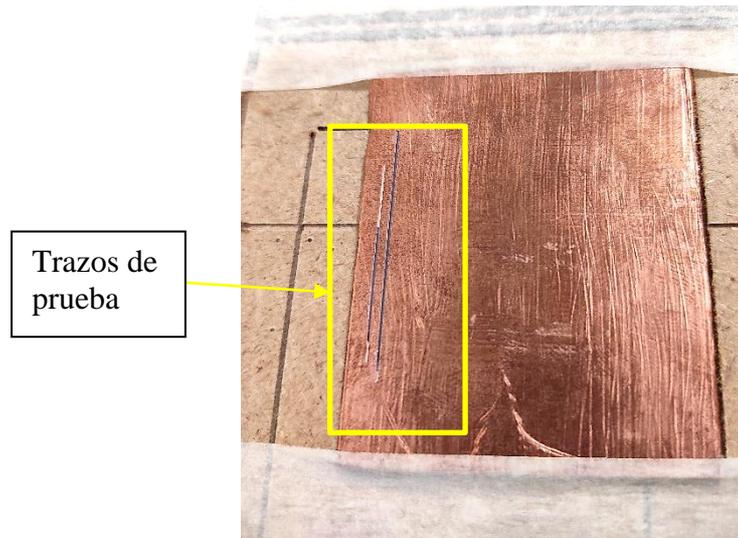


Figura 55. Comprobación profundidad de penetración de la fresa.

Una vez hemos comprobado que la fresa está a la altura correcta, comenzamos a trazar segmento a segmento los diferentes circuitos para asegurar que cada trazo se realiza correctamente. Una vez hayamos finalizado el proceso, tendremos nuestro circuito fresado.



(a)

(b)

Figura 56. Circuitos fresados en los sustratos. (a). Resonadores. (b) Líneas de transmisión.

4.1.6. Acabado

Para un correcto y óptimo acabado de los circuitos, deberemos realizar un proceso de posacabado. El siguiente paso es retirar la capa de cobre sobrante a las líneas trazadas de los circuitos. Para garantizar el estado de las líneas de cobre, emplearemos un microscopio, un bisturí y unas pinzas. Iremos retirando el cobre con cuidado. Con el bisturí, aseguraremos los extremos de las pistas, ya que es posible que la fresa no haya llegado hasta justo el contorno del sustrato y, a la hora de retirar el cobre, podamos retirar o dañar la pista del circuito.

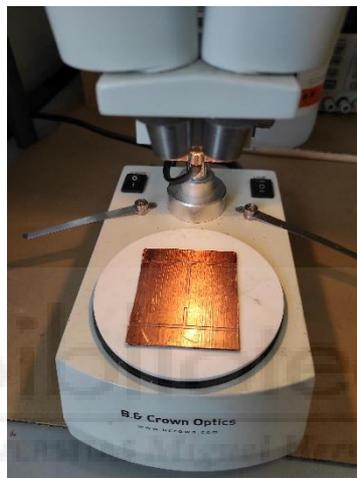


Figura 57. Proceso de posacabado mediante el microscopio.

Una vez la capa de cobre haya sido retirada, lijamos los bordes para un acabado pulido. El resultado obtenido de nuestros circuitos de test es el siguiente:

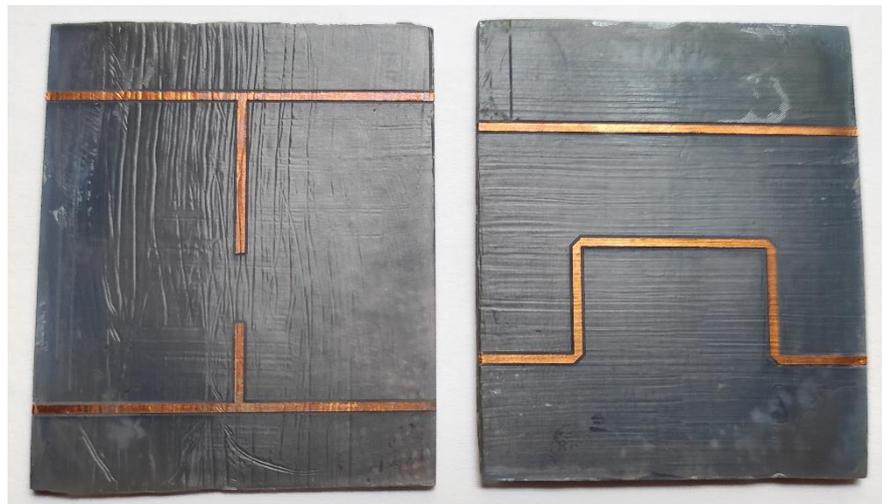


Figura 58. Acabado de los circuitos de test (parte delantera).



Figura 59. Acabado de los circuitos de test (parte posterior).

Por otra parte, podemos usar el *DinoCapture* para comprobar el estado de los extremos de las pistas y ver en detalle el plano de masa, la resina y la pista microstrip conductora. Del mismo modo, podemos comprobar las dimensiones finales de las pistas y sustrato.

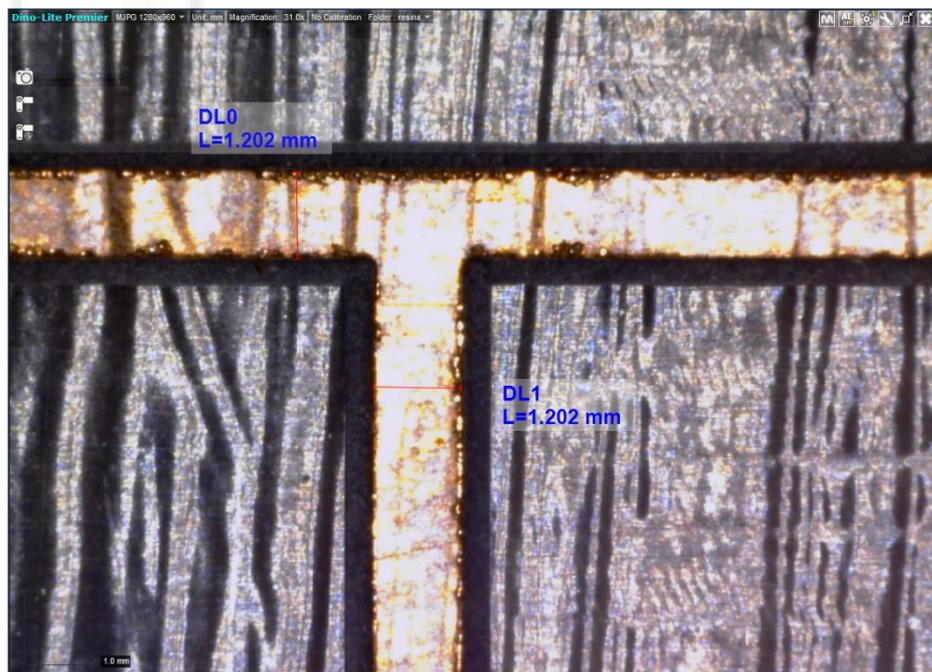


Figura 60. Captura del ancho de línea del resonador $\lambda/4$.

Como podemos comprobar en la Figura 60, el ancho teórico que establecimos para las pistas era de 1.2mm. Comparándolo con los valores obtenidos tras la medición con el *DinoCapture*, podemos ver que el valor es de 1.202mm, el cual se ajusta perfectamente a nuestro diseño. Hay que tener en cuenta, que se puede cometer cierto error humano a la hora de trazar el segmento de medición.

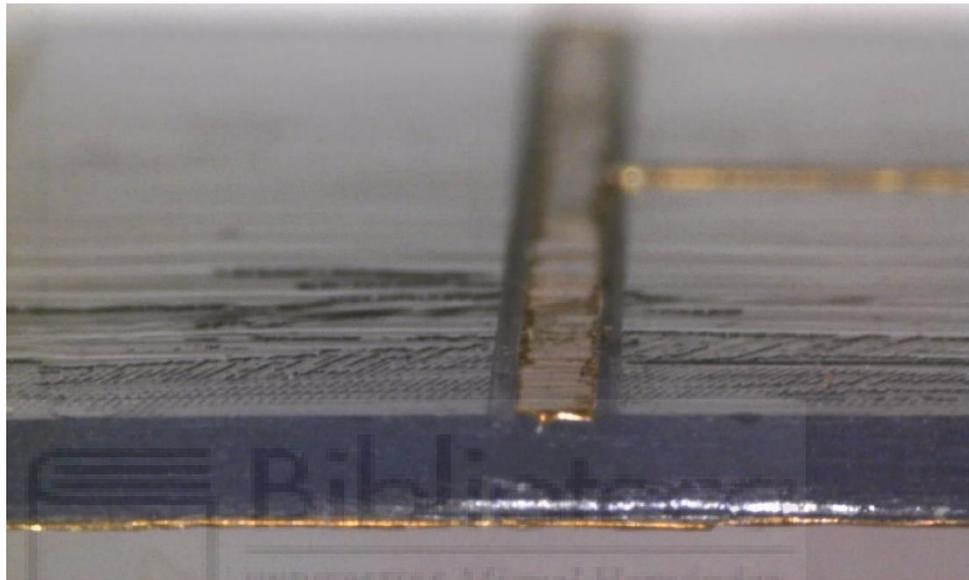


Figura 61. Captura del puerto de entrada del resonador $\lambda/4$.

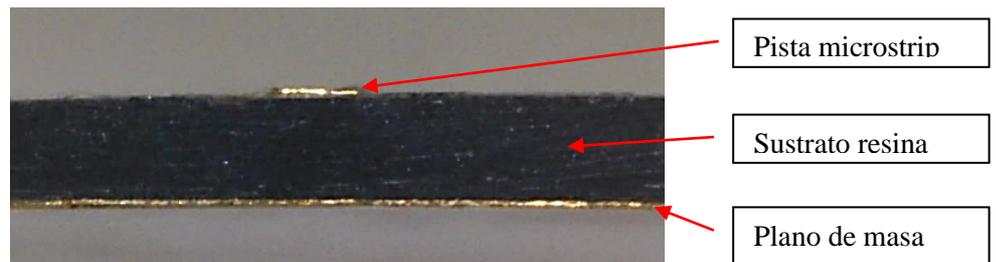


Figura 62. Captura del plano transversal del circuito

4.2. CARACTERIZACIÓN DEL EPOXI

Antes de realizar las medidas para caracterizar finalmente la resina, es conveniente comprobar si la capa de adhesivo que hemos utilizado para la metalización del circuito puede llegar a influir en los propios resultados. Por lo tanto, vamos a caracterizar previamente el material epoxi, por si tuviese algún efecto en la resina.

Para ello, al igual que hemos creado unos circuitos de test para medir los parámetros y comportamiento de la resina, vamos a realizar el mismo proceso, pero con un material ya conocido: el FR4. La utilización de este material es porque el fabricante nos proporciona ya el valor de la altura del dieléctrico y del cobre, por lo que contaríamos con dos incógnitas menos.

Dividiremos el proceso de caracterización del epoxi en dos partes. En la primera, fabricaremos un resonador $\lambda/4$ en T en FR4 y a través de ADS obtendremos el valor de su constante dieléctrica y sus pérdidas. La segunda parte se basará en fabricar el mismo resonador, pero con 2 capas de FR4 unidas mediante el epoxi. De esta forma y comparando los resultados del comportamiento del primer resonador (sin la capa de epoxi) podremos concluir si dicha capa de material es relevante o no.

Primeramente, realizaremos el diseño del resonador $\lambda/4$ en T en ADS para ver su comportamiento sin ninguna capa del adhesivo epoxi. Tomaremos las mismas medidas que los circuitos de test para la caracterización de la resina. Sus medidas serán 50mm de línea, con una anchura de 0.9mm y una longitud del stub de 20mm. La anchura del stub también será de 0.9mm. Sabemos que el FR4 tiene una altura de 400 μm y la del cobre es de 30 μm . Para su fabricación, emplearemos una placa de doble cara y mediante fotolitografía, obtendremos el circuito. Su estructura en capas será de la siguiente forma:



Figura 63. Estructura en capas del FR4 de doble cara.

Tras insolar el resonador en la placa, lo introduciremos en un recipiente con revelador hasta que se quede marcado en él. A continuación, lo introduciremos en otro recipiente con un activador para que elimine el cobre restante. Después de este proceso de fabricación mediante fotolitografía, obtenemos el resonador ya físicamente (Figura 64).

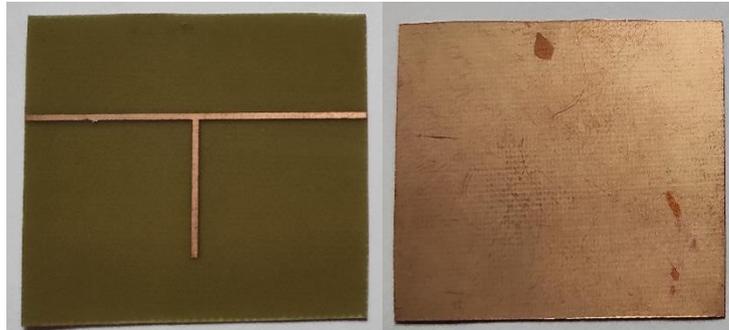


Figura 64. Resonador $\lambda/4$ fabricado con FR4.

Una vez fabricado, vamos a comprobar sus dimensiones. Hemos comprobado, que la longitud de la línea ha variado. Al recortar el sobrante de material mediante una guillotina, finalmente tenemos una línea de 47mm de longitud, no 50mm. Esta variación la tendremos en cuenta en el diseño de *ADS* y la actualizaremos. Para conocer la altura del FR4 y el cobre, emplearemos el *DinoCapture*. Comprobamos que la anchura tanto de la línea como del stub es de 0.9mm:

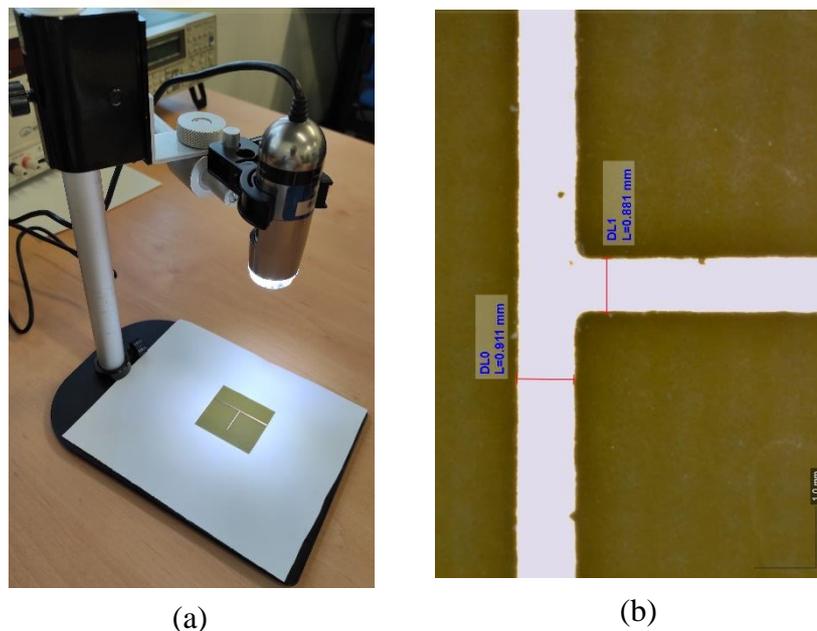


Figura 65. (a) Proceso de medición con *DinoCapture*. (b) Medición de las anchuras de las pistas del resonador $\lambda/4$.

Como podemos comprobar en la Figura superior, el valor establecido de 0.9mm coincide con lo fabricado. Ahora, realizaremos las mediciones de su altura.

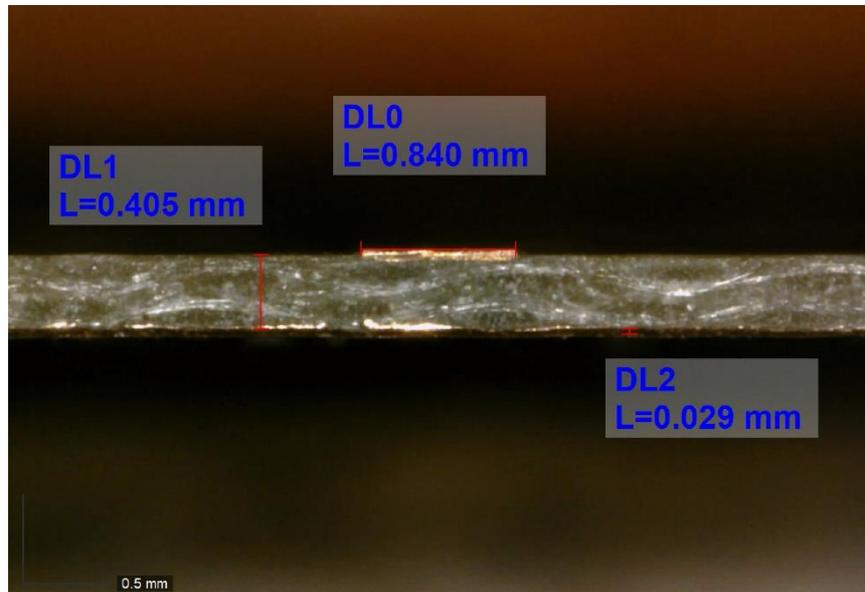


Figura 66. Medición transversal del resonador $\lambda/4$ en FR4 (1 capa).

Gracias a este microscopio electrónico, podemos ver claramente que las dimensiones tanto del dieléctrico como del cobre coinciden con las esperadas. Por lo tanto, los resultados que obtendremos serán muy parecidos a los simulados mediante *ADS*.

A continuación, mediante el *Universal Test Fixture* y el VNA obtendremos el comportamiento del circuito que acabamos de fabricar. Exportando el fichero con los datos al *ADS*, podemos comparar los resultados de la simulación y de la medición y obtener la ϵ_r y la tangente de pérdidas del FR4. Para ello, insertaremos una red de dos puertos en la que insertaremos los datos obtenidos del VNA.

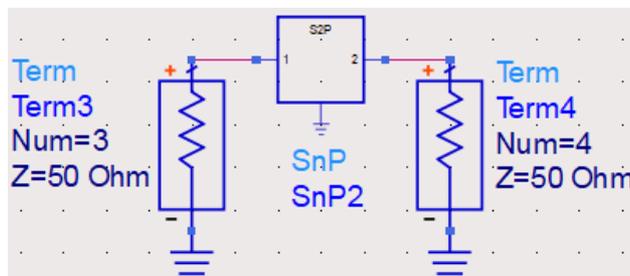


Figura 67. Red de 2 puertos con los resultados medidos del VNA.

De esta forma, el *Term3* de la Figura 67 corresponderá con el puerto de entrada del circuito medido mediante el VNA, y el *Term4*, con el puerto de salida. El diseño completo asociado a este circuito es el siguiente:

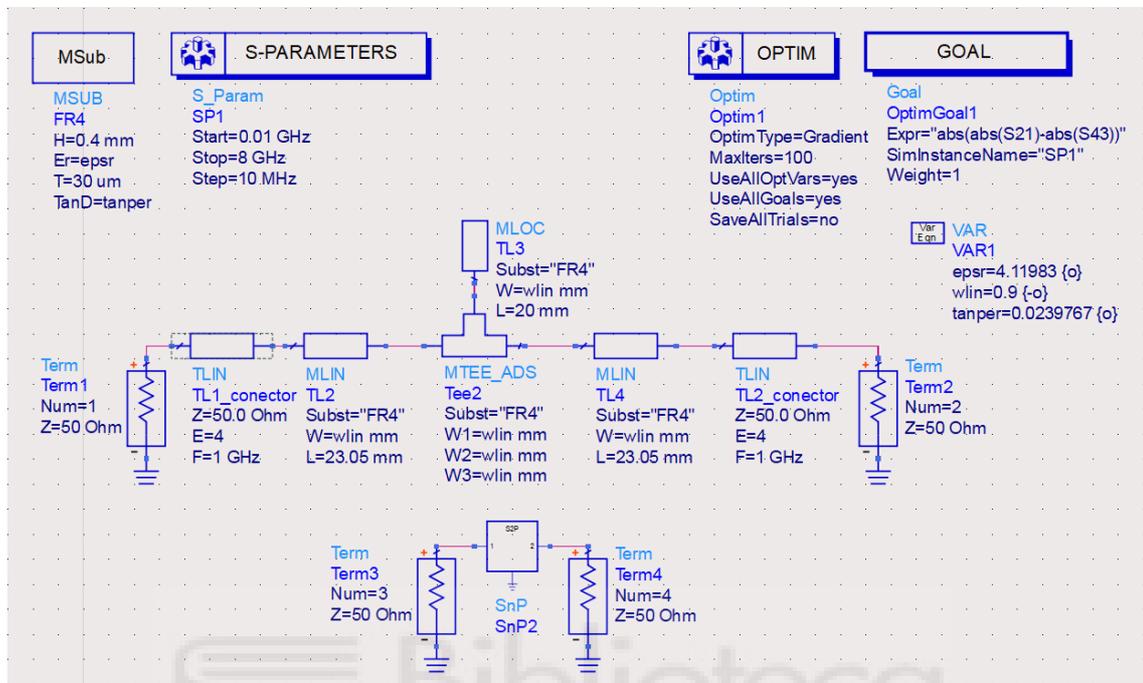
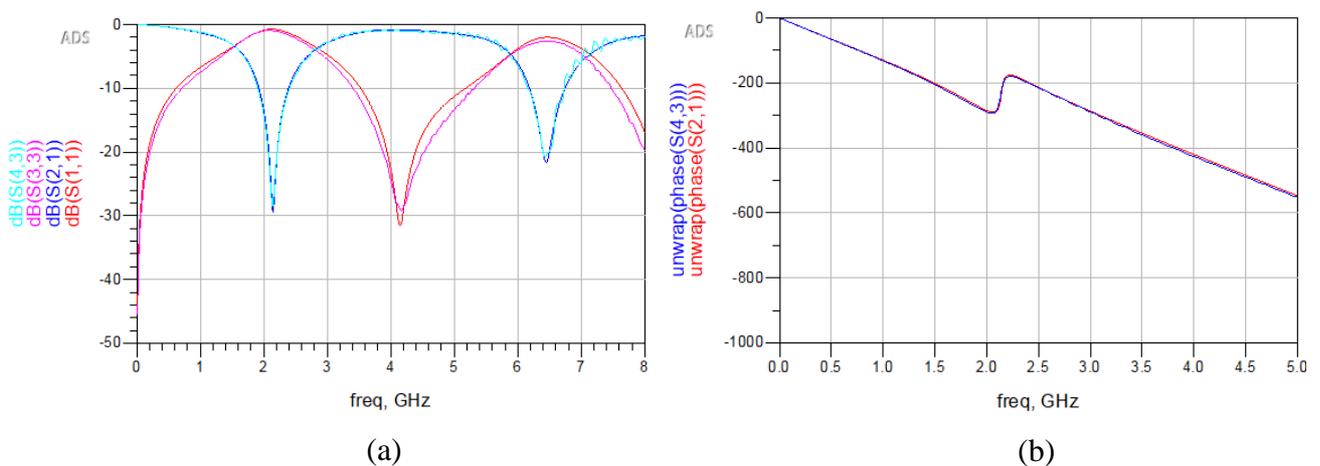


Figura 68. Diseño del resonador $\lambda/4$ en ADS.

Hemos decalorado como variables la constante dieléctrica del material y su tangente de pérdidas. Al simular dicho modelo circuital y en comparación con la medición obtenemos el siguiente gráfico:



Gráfica 1. (a) Representación Magnitud-Frecuencia de los puertos del resonador. (b) Representación Fase-Frecuencia del resonador.

Analizando los resultados obtenidos, podemos ver que las mediciones realizadas y el comportamiento del resonador son los esperados. Tanto en módulo como en fase coinciden los resultados. Sabiendo que las mediciones son correctas, realizamos la optimización de las variables y obtenemos:

- Constante dieléctrica del FR4: $\epsilon_r = 4.11983 \approx 4.120$
- Tangente de pérdidas del FR4: $\tan\delta = 0.0239767 \approx 0.0240$

Una vez caracterizado el comportamiento del FR4, pasaremos a caracterizar el epoxy mediante la fabricación de otro resonador con las mismas características.

Sabiendo el comportamiento del resonador con una capa de FR4 de 400 μm , si ahora doblamos la altura del dieléctrico e introducimos el adhesivo epoxy entre ambos, podremos seguir calculando su constante dieléctrica y tangente de pérdidas porque seguiremos conociendo la altura total del sustrato y la del cobre. Esta estructura de las capas podemos verla más claramente en la siguiente Figura.

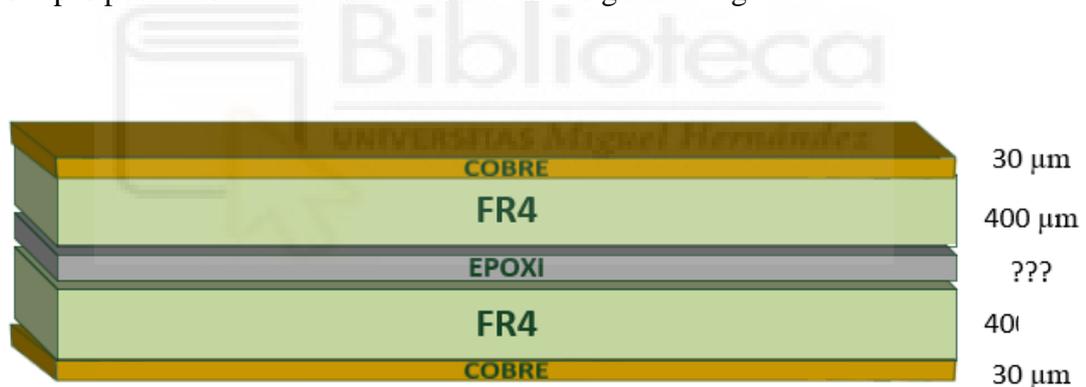


Figura 69. Estructura en capas de 2 placas de FR4 unidas mediante epoxy.

Como podemos observar, para la creación de este modelo, emplearemos dos placas de FR4 de una cara. Es decir, sólo se revelará una cara de la placa. De esta forma, conseguimos una estructura como la del FR4 de una capa, pero en este caso la capa de dicho material sería el doble. Ambas placas de FR4 las unimos mediante una capa de adhesivo epoxy. Este material es el mismo que hemos empleado para la metalización de los sustratos de resina (apartado 4.1.4). En la capa superior de cobre, insalaremos el resonador $\lambda/4$ en T de iguales dimensiones que en el caso anterior. En cambio, la capa inferior de cobre corresponderá en este caso con el plano de masa. Así, tendremos el mismo resonador pero con un dieléctrico de aproximadamente

800 μm más las micras que pueda añadir la capa de epoxi. De todas formas, a nivel analítico, tomaremos las dos capas de FR4 y la capa de epoxi como un sustrato homogéneo, como un bloque.

Tras el proceso de fotolitografía, obtenemos físicamente el diseño. En comparación con el anterior, apenas es perceptible la doble cara del dieléctrico, y mucho menos la capa de adhesivo. Tomamos el diseño *ADS* anterior modificando para este caso la altura del sustrato. Como vamos a considerar todo un bloque de dieléctrico, vamos a estimar primero el grosor de la capa del epoxi mediante el *DinoCapture*. Las dimensiones del nuevo resonador son las siguientes:

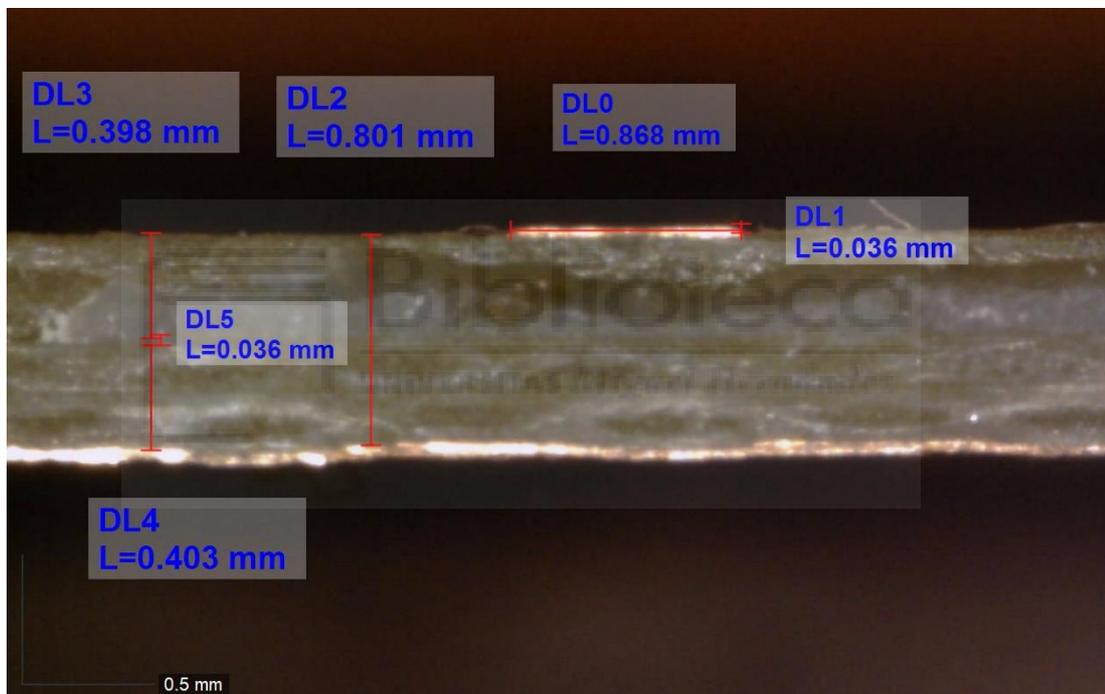


Figura 70. Medición transversal del resonador $\lambda/4$ en FR4 (2 capas+epoxi).

Mediante la Figura 70, podemos comprobar que la anchura de la pista conductora es 0.9mm y su altura (cobre) de 30 μm . También, las 2 capas de 400 μm de FR4 suman 800 μm . Por lo tanto, podemos concluir que aproximadamente, la altura de la capa de epoxi que empleamos para la unión de ambos sustratos es de 35 μm . Con este dato, podemos simular ya el diseño en *ADS*. Simplemente, modificaremos la altura del sustrato en el diseño, siendo ahora la altura total del dieléctrico de 835 μm .

Seguidamente, realizaremos la medición del resonador con el sustrato de doble altura mediante el VNA y exportaremos los datos obtenidos al ADS. Igual que en el caso anterior, insertamos una red de dos puertos para poder comparar los resultados de la simulación con los empíricos. Obtenemos los siguientes resultados:

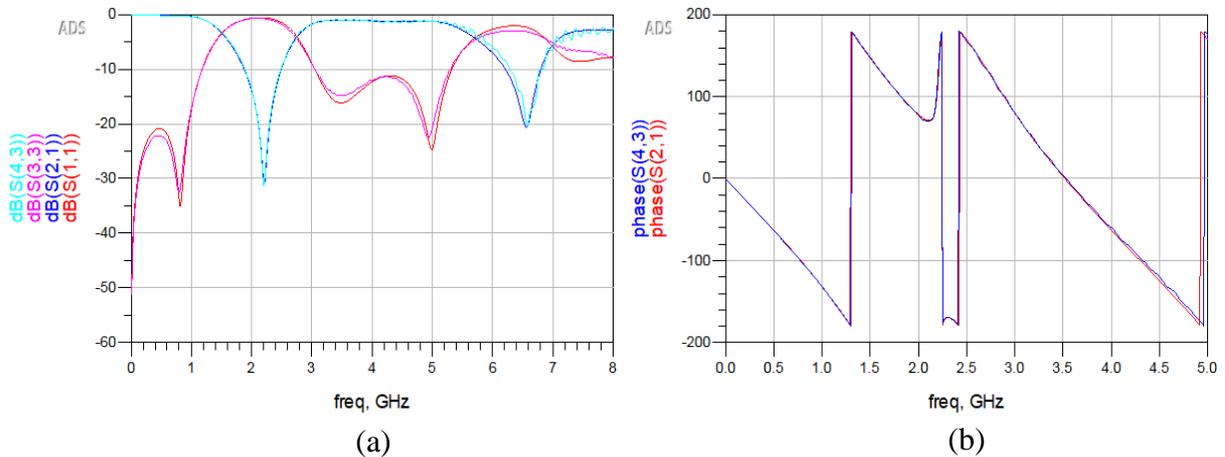


Figura 71. (a) Representación Magnitud-Frecuencia de los puertos del resonador. (b) Representación Fase-Frecuencia del resonador.

De nuevo, podemos comprobar que tanto teoría como práctica coinciden. Sabiendo que las mediciones han sido las correctas y acordes a lo deseado, optimizamos el diseño para obtener los parámetros de este nuevo sustrato. Tras su optimización obtenemos:

- Constante dieléctrica del FR4 de 2 capas: $\epsilon_r = 4.13729 \approx 4.137$
- Tangente de pérdidas del FR4 de 2 capas: $\tan\delta = 0.0283546 \approx 0.0283$

Comparando los resultados con los obtenidos en el caso anterior, apenas existe una diferencia relevante como para que la capa de epoxi sea contemplada a la hora de realizar la caracterización de la resina. Por tanto, podemos concluir que la utilización de este material de adhesión no influirá en los resultados finales.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA RESINA

Sabiendo que la capa de adhesivo epoxi no tiene un efecto relevante sobre el sustrato de resina, pasaremos a caracterizar nuestro objeto de estudio de este proyecto: la resina como dieléctrico.

Una vez fabricados los distintos circuitos de test, vamos a analizar el comportamiento de la resina. Para ello, emplearemos el *Universal Test Fixture* y el analizador de redes vectorial. Introducimos el circuito en las guías del UTF. Realizaremos el análisis con el resonador $\lambda/4$. Como el pin conductor del UTF debe hacer contacto directo con la pista conductora del circuito que hemos fabricado, usaremos el *DinoCapture* para ajustar la posición y garantizar una medida correcta (Figura 72).



Figura 72. Captura del pin conductor del UTF en contacto con la línea del circuito.

Una vez aseguramos que está bien posicionado el circuito y hace contacto con los pines conductores del UTF, conectamos el VNA para observar su respuesta. Para este paso, es primordial haber realizado una buena calibración del VNA y que los elementos de calibración (open, short, load, thru) se encuentren en buen estado. Una vez calibrado lo conectaremos al UTF mediante conectores de RF de 3.5mm hembra como podemos observar en la Figura inferior:

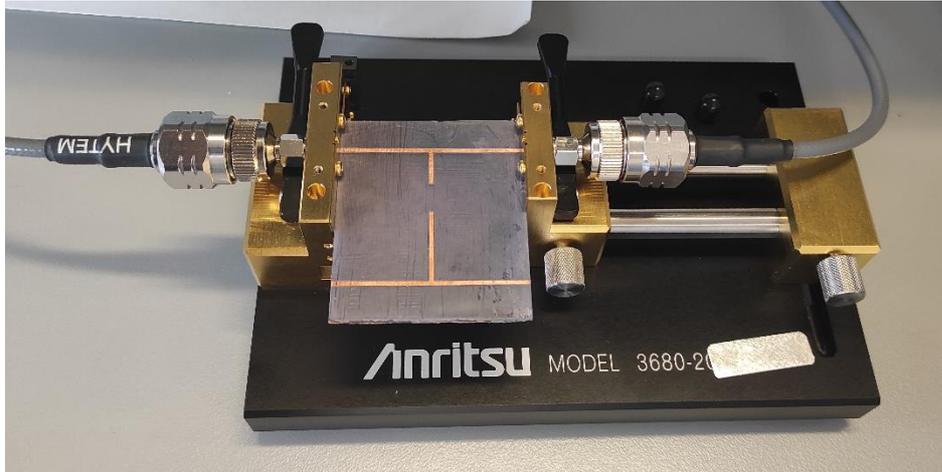


Figura 73. Medición del resonador $\lambda/4$ mediante el UTF y VNA.

A continuación, podemos observar el comportamiento del circuito mediante los Parámetros S.



Figura 74. Resultados obtenidos mediante el VNA.

Para poder observar mejor y más detalladamente, exportamos los resultados (archivo.s2p) a ADS. Al diseño que habíamos realizado del resonador $\lambda/4$ le añadimos una red de 2 puertos para introducir los resultados obtenidos mediante el fichero del VNA.

A continuación, declaramos como variables la constante dieléctrica de la resina, su tangente de pérdidas y el ancho de la línea. Realizamos un barrido en frecuencia desde 10 MHz hasta 8GHz.

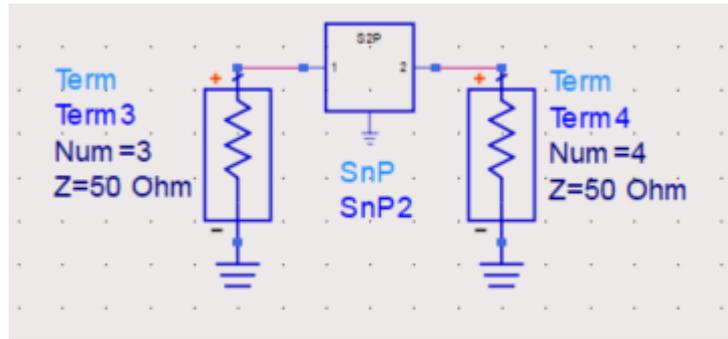


Figura 75. Red de 2 puertos con los resultados medidos del VNA.

Como podemos observar en la Figura superior, el puerto 3 (*Term 3*) corresponderá con el puerto de entrada de nuestro circuito medido, y el puerto 4 (*Term4*) con el de salida. Es decir, el parámetro S_{11} del circuito de test medido corresponderá con el S_{33} . El S_{12} y S_{21} con el S_{34} y S_{43} respectivamente. Y, por último, el parámetro S_{22} se corresponderá con el S_{44} .

Una vez introducidos los datos obtenidos de la medición, pasamos a simular de nuevo el diseño de ADS y a comparar los resultados con los de la simulación.

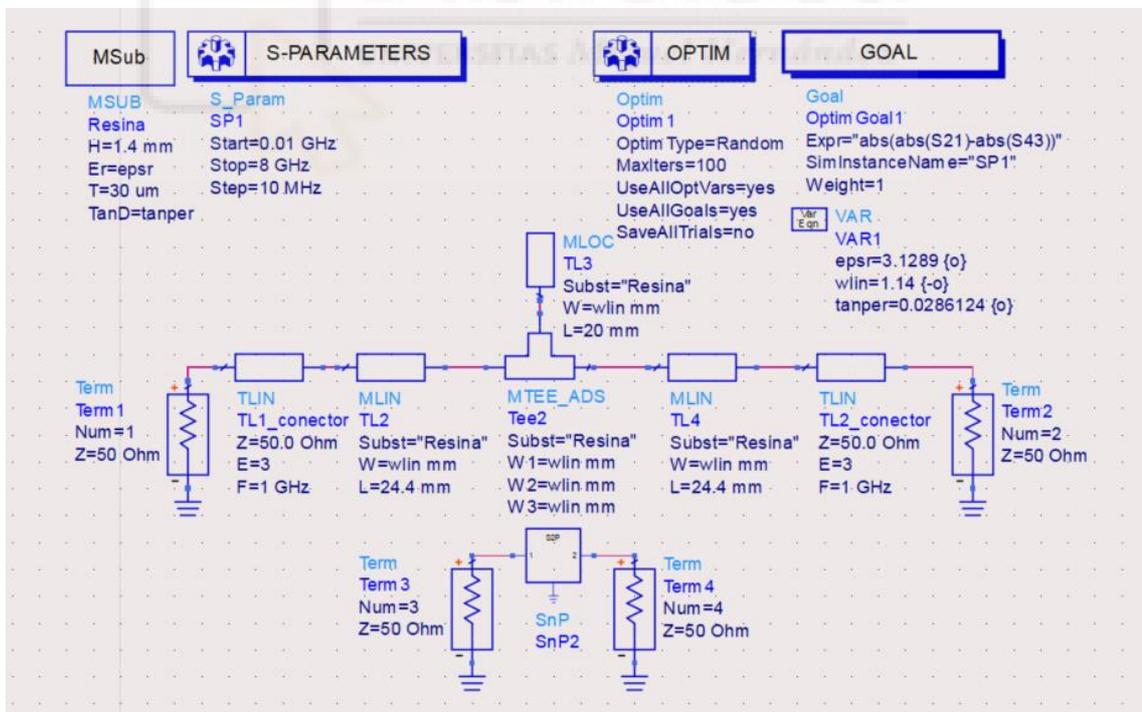
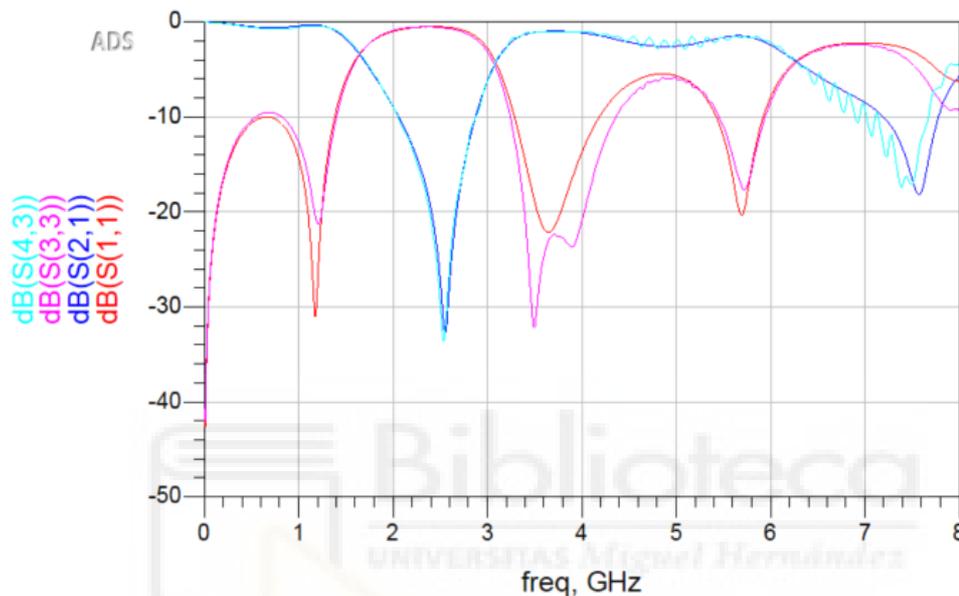


Figura 76. Diseño del resonador $\lambda/4$ para la caracterización de la resina.

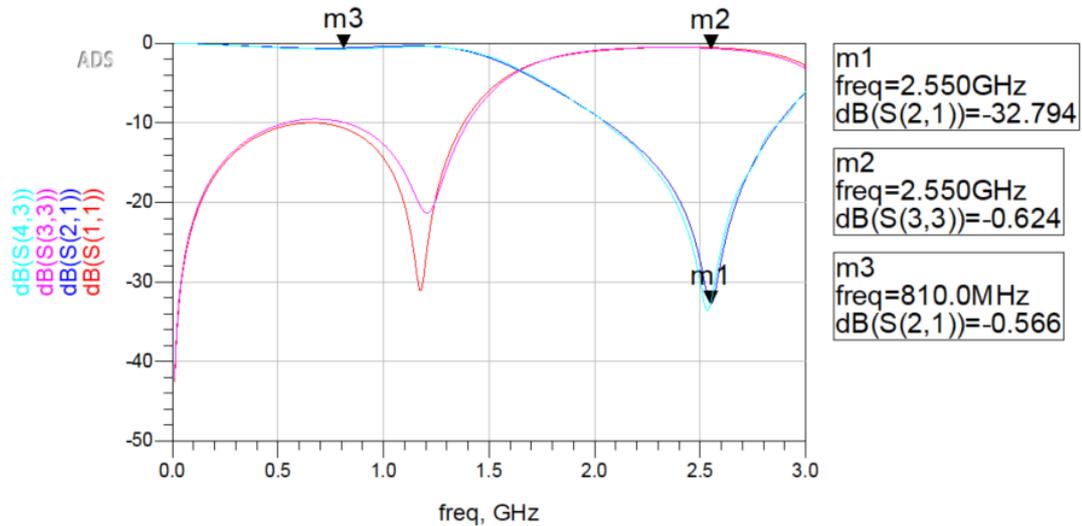
Además de la red para añadir los datos de la medición, hemos añadido una optimización de las variables. De este modo, cambiando el tipo de optimización posteriormente a 'Gradient' podremos obtener unos resultados más precisos.

Al simular y optimizar, obtenemos los siguientes resultados:



Gráfica 2. Representación dB-Frecuencia de los resultados de la simulación.

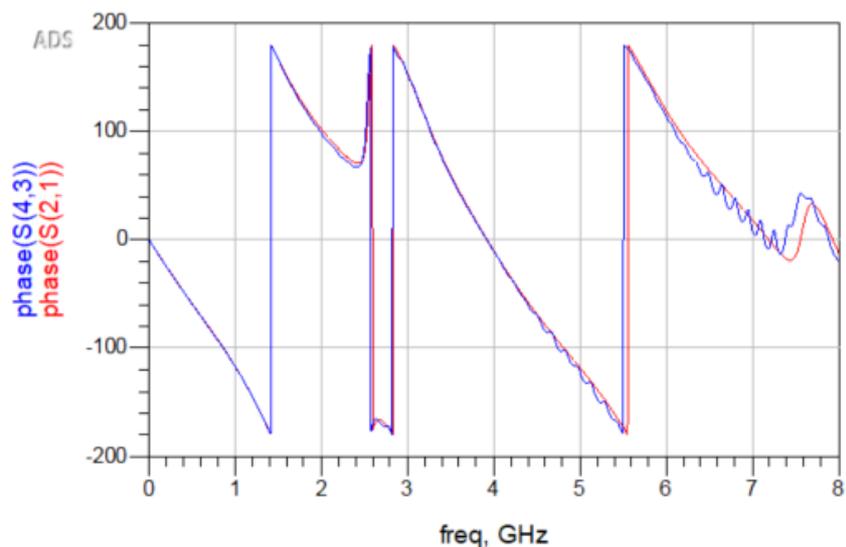
Como observamos en la Gráfica 1, los valores de la medición del circuito con el sustrato de resina coinciden casi con los de la simulación; por lo que el ajuste realizado es el correcto. Las funciones de color rojo y azul corresponden con los parámetros de la simulación. El morado y el celeste, con los de la medición. Si centramos la vista en el rango de 0 a 3GHz, podemos observar una buena concordancia entre la simulación realizada y el ajuste en torno a la frecuencia de resonancia del circuito implementado, además de conseguir una buena adaptación en 0GHz de -40dB.



Gráfica 3. Aumento en torno a la frecuencia de interés.

Para la frecuencia de 2.55 GHz, toda la potencia se estaría reflejando, por lo que no se transmite nada de señal. En cambio, en frecuencias más bajas, se estaría transmitiendo toda la potencia y con muy poca pérdida, apenas 0.56dB. También, podemos ver que a la entrada no estaría del todo adaptada la línea y tenemos cerca de 10dB de pérdidas.

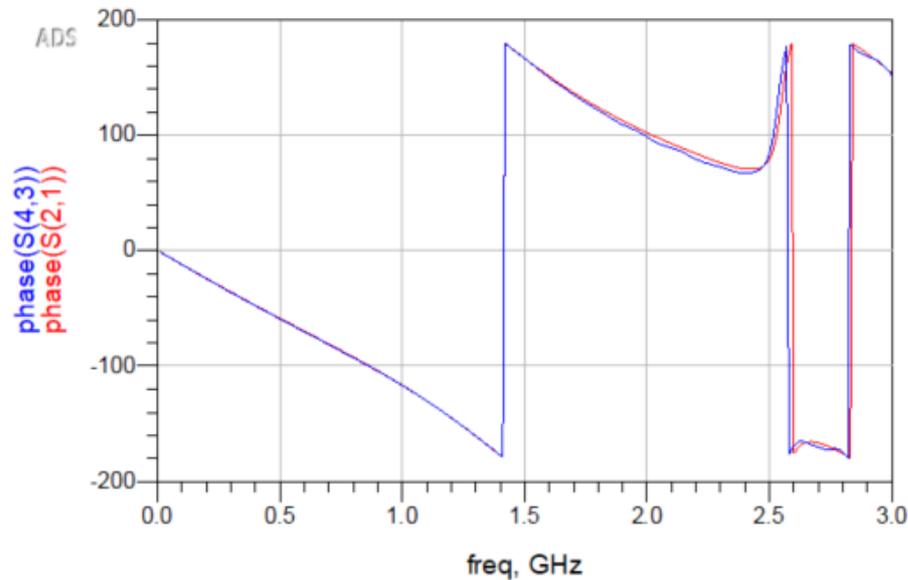
En cuanto a la fase, estos son los resultados obtenidos:



Gráfica 4. Representación fase-frecuencia de la simulación.

Observando los resultados obtenidos de la fase, vemos que los resultados de la simulación (función roja) con los de las medidas obtenidas (función azul)

prácticamente son iguales.



Gráfica 5. Aumento de la fase en torno a 2GHz

En la Gráfica 5, podemos observar detalladamente cómo las fases coinciden, pero no es del todo lineal debido a la falta de adaptación a la entrada que hemos comentado anteriormente.

Una vez analizados los resultados a través de las representaciones de magnitud y fase, es hora de obtener los parámetros de la resina, objetivo principal del proyecto. Tras ejecutar la simulación y la optimización de las variables, hemos obtenido los siguientes parámetros de la resina:

$$\begin{aligned}\epsilon_r &= 3.12896 \approx 3.13 \\ \tan\delta &= 0.0286349 \approx 0.0286\end{aligned}$$

Los parámetros obtenidos de la resina son bastante buenos. Presenta una constante dieléctrica coherente y unas pérdidas también aceptables e incluso menores que otros materiales. El FR4 (material más utilizado para la fabricación de circuitos electrónicos) presenta una permitividad dieléctrica relativa alrededor de 4.13 a estas frecuencias y una tangente de pérdidas de 0.0283, como hemos podido comprobar anteriormente.

Para corroborar los parámetros obtenidos de la resina, realizaremos las mediciones del resto de circuitos de test que hemos diseñado y fabricado.

Realizamos el mismo proceso de diseño del circuito correspondiente en ADS y las mediciones mediante el VNA y las importamos a ADS para comparar los resultados obtenidos con la simulación. Lo realizamos con la línea de transmisión de longitud 50mm y anchura de 1.2mm.

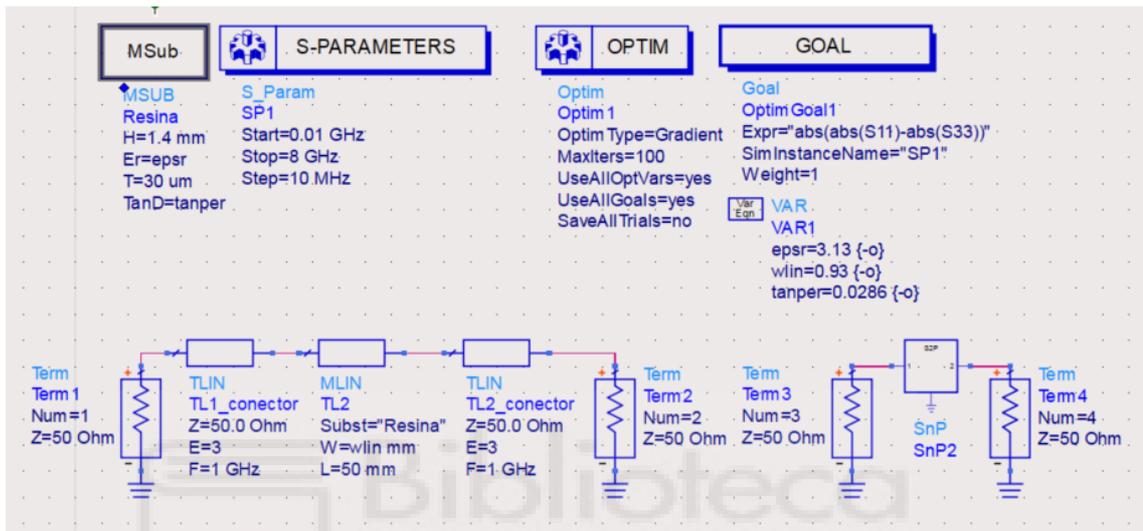
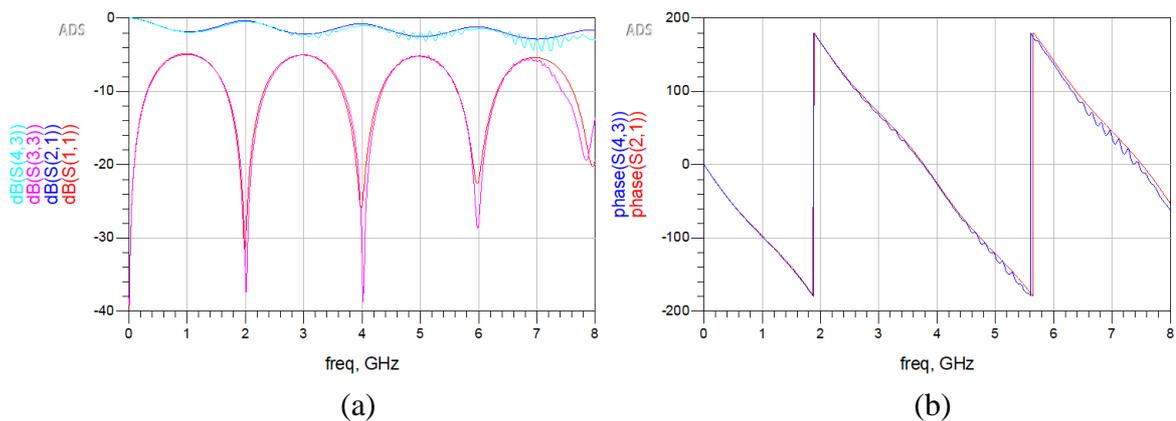


Figura 77. Diseño línea de transmisión de longitud 50mm en ADS.

Estableciendo los valores obtenidos de la constante dieléctrica y de la tangente de pérdidas que acabamos de estimar, obtenemos los siguientes resultados tras ejecutar la simulación:



Gráfica 6. (a) Representación Parámetros S(db)-Frecuencia. (b) Representación Parámetros S(fase)-Frecuencia.

Observando la representación del módulo de los parámetros S_{11} y S_{21} de la simulación y de la medida de la Gráfica 6 (a), podemos comprobar que ambas coinciden, sobre todo el coeficiente de reflexión a bajas frecuencias. En cuanto a la fase, también podemos observar que coinciden perfectamente. Sí es cierto que, tras optimizar el valor de la anchura de la pista, obtenemos un valor aproximado de 0.93mm comparándolo con los 1.2mm de la pista diseñada. Al tratarse de apenas 200 micras y viendo que las representaciones son muy conseguidas, podemos seguir determinando que los valores $\epsilon_r=3.13$ y $\tan\delta=0.0286$ de la resina son correctos.

En cuanto a la línea de transmisión de 75.2mm de longitud y 1.2mm de ancho, el diseño en ADS y los resultados obtenidos tras la simulación del modelo circuital y de los datos obtenidos de la medición son los siguientes:

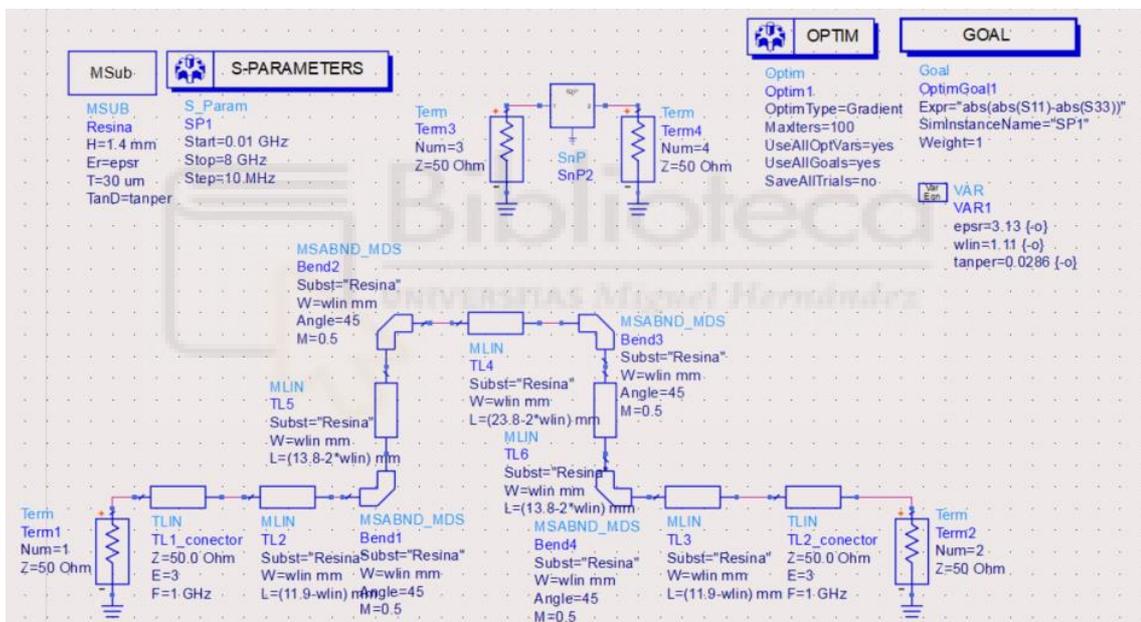
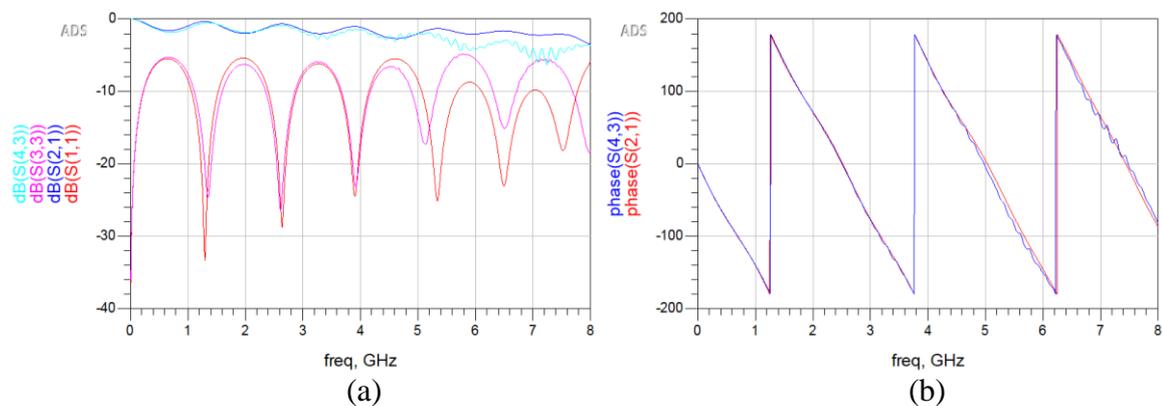


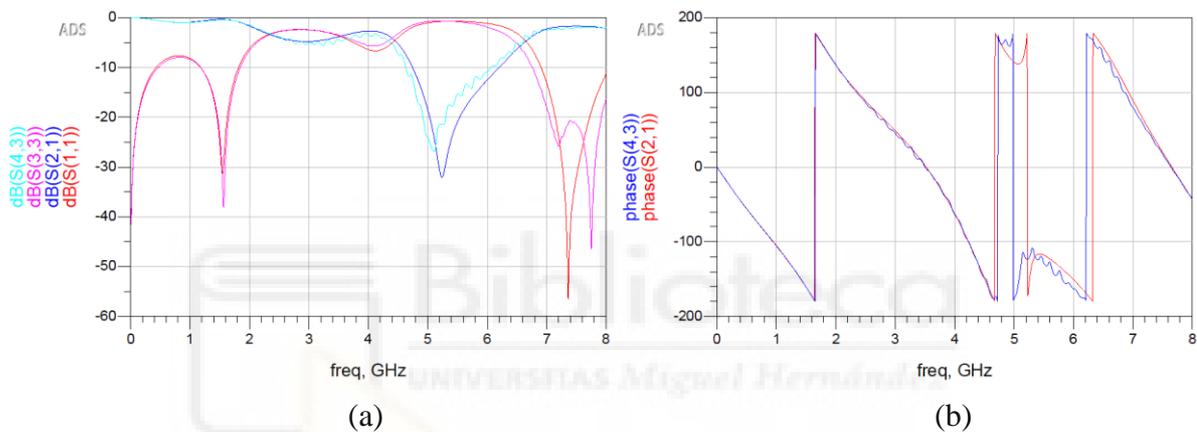
Figura 78. Diseño línea de transmisión de longitud 75.2mm en ADS.



Gráfica 7. (a) Representación Parámetros S(db)-Frecuencia. (b) Representación Parámetros S(fase)-Frecuencia.

En este caso, concretamente en la Gráfica 7 (a), podemos distinguir a frecuencias altas un aumento en las pérdidas de transmisión y un desajuste en el coeficiente de reflexión entre la simulación circuital y la medición. Esto puede deberse al uso de una serie de codos (4 en total) para la creación de una línea de transmisión de mayor longitud, pudiendo generar ciertas reflexiones. Por otra parte, la fase sigue coincidiendo y la optimización de la anchura de la línea en este caso también coincide con el caso del resonador de $\lambda/4$, 1.14mm sería la óptima.

Por último, si analizamos el comportamiento del resonador $\lambda/2$ con una longitud del stub de 1mm obtenemos los siguientes resultados:



Gráfica 8. (a) Representación Parámetros S(db)-Frecuencia. (b) Representación Parámetros S(fase)-Frecuencia.

Si observamos la Gráfica 8(a), a bajas frecuencias la simulación y las mediciones son las correctas, ya que ambas funciones se ajustan a la perfección. En cambio, conforme vamos aumentando en frecuencia, podemos ver cómo el parámetro de reflexión de la medición comienza a desplazarse hacia la derecha. Puede deberse a una mala calibración del analizador de redes vectorial a la hora de haber realizado la medición. Respecto a la fase, podemos percibir que a partir de los 5GHz aproximadamente, la fase del parámetro de transmisión que hemos medido no coincide del todo. A pesar de ello, el valor de la constante dieléctrica relativa y tangente de pérdidas de la resina sigue manteniéndose en 3.13 y 0.0286 respectivamente, ya que al optimizar la anchura de la línea y del stub de este resonador, obtenemos 1.14mm, lo que no variaría en absoluto en comparación con los circuitos de test anteriores, salvo la pequeña diferencia en la línea de transmisión de 50mm de longitud.

Por lo tanto, analizado el objeto de estudio, podemos decir que el empleo de la impresión 3D mediante la estereolitografía para la fabricación de sustratos es apta. No sólo porque presenta unos parámetros apropiados, sino también por la versatilidad a la hora de fabricar sustratos. Se puede imprimir el sustrato con una altura deseada en cuestión de minutos con cualquier tipo de perfil y forma. Sin tener que estar ajustándonos a las dimensiones de los fabricantes. Además, hoy en día, este tipo de impresoras son muy asequibles a nivel económico incluso para el uso doméstico.

El uso de esta tecnología para la fabricación de circuitos de microondas abre una puerta a un mundo de posibilidades. Podemos crear nuestro propio sustrato con cualquier tipo de perfil modificando la altura del sustrato: perfil rectangular, sinusoidal, etc.



Figura 79. Sustrato con perfil rectangular.

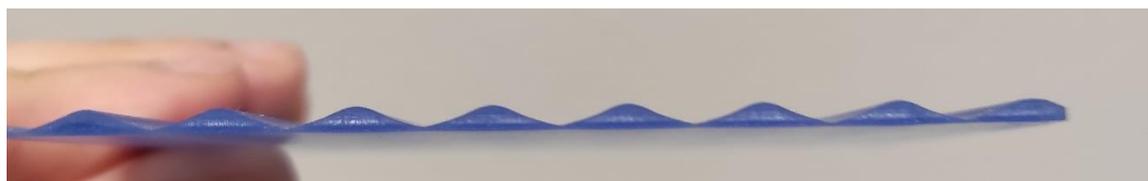


Figura 80. Sustrato con perfil sinusoidal.

Además, al emplear este tipo de tecnología de impresión 3D con resina, el acabado final de los sustratos es totalmente liso, sin rugosidades o algún tipo de textura de filamentos, en comparación con la tecnología FDM. Al emplear termoplásticos (como el PLA), la textura de los sustratos es apreciable a simple vista [21]. Según la densidad de llenado de la estructura, se pueden apreciar distintas texturas (Figura 81).

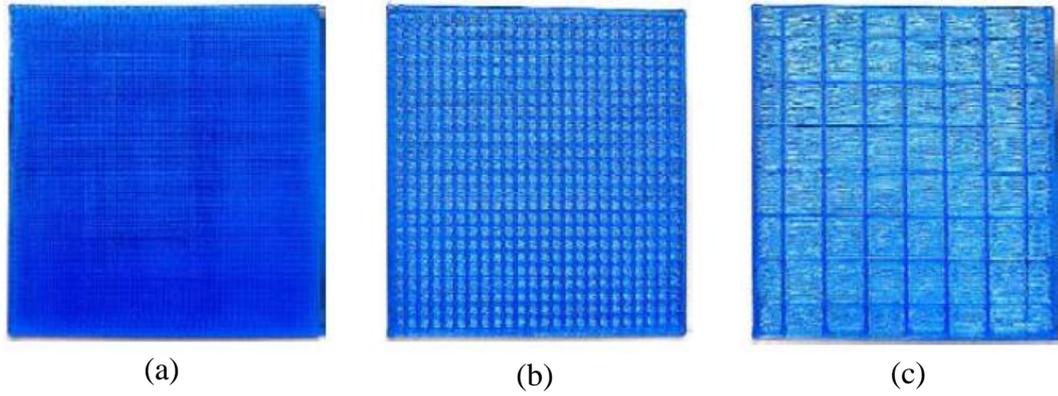


Figura 81. Patrón de impresión lineal 3D con diferentes densidades de llenado: (a) 100%, (b) 50% y (c) 15%, mediante tecnología FDM. [21]



CAPÍTULO 5. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA MEDIANTE IMPRESIÓN 3D.

En este capítulo realizaremos el diseño de una estructura periódica con perfil sinusoidal que presenta un *Band-Gap* en torno a los 6GHz, y posteriormente fabricaremos el sustrato mediante el uso de una impresora 3D de resina fotosensible. De esta forma, variando la altura del sustrato, variará el perfil de impedancias a lo largo de la línea microstrip.

5.1. DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA CON PERFIL SINUSOIDAL.

Al emplear el uso de la impresora 3D podemos fabricar cualquier tipo de sustrato según el perfil y dimensiones que deseemos. En este caso, emplearemos un perfil sinusoidal para la creación de nuestra estructura periódica y analizaremos cómo se comporta. Para ello, realizaremos el diseño de una línea de transmisión microstrip cuyo dieléctrico seguirá una forma sinusoidal de cierto periodo.

Antes de realizar el diseño del circuito, deberemos tener en cuenta algunas limitaciones geométricas. En cuanto al número máximo de periodos de nuestra estructura, deberemos tener en cuenta la longitud máxima que puede tener. Ésta está limitada por el volumen de impresión de la propia impresora. Como bien comentamos en el apartado 3.1, la longitud máxima de impresión es de 11.5cm. Por lo tanto, a la hora del diseño, este factor ha de tenerse en cuenta. Además, para realizar las medidas mediante el UTF, deberemos adaptar los extremos de la senoide para que sean planos y poder introducir el sustrato en la estación de puntas para la medición del circuito.

Mediante el programa *HFSS*, crearemos la forma de onda de la senoide (*Create Equation Curve*), que será una función seno de amplitud de 1.4mm, con 10 periodos y una fase inicial de π radianes.

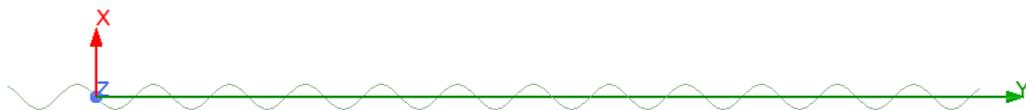


Figura 82. Diseño senoide según las dimensiones en *HFSS*.

Command	CreateEquationCurve
Coordinate System	Global
X(t)	$0.0014 \cdot \sin((2 \cdot \pi) \cdot 10 \cdot (t/0.086) + \pi)$
Y(t)	_t
Z(t)	0
Start_t	-0.01
End_t	0.1
Number of Points	500

Figura 83. Parámetros de la senoide en HFSS.

A continuación, calcularemos las dimensiones que deben de tener los extremos del sustrato para que se pueda posteriormente medir con el *Universal Test Fixture*, el ancho de la línea y el perfil de impedancias que tendrá la senoide. Para ello, emplearemos la herramienta *LineCalc* de ADS. Introduciremos los parámetros que conocemos: $\epsilon_r=3.13$, $\tan\delta=0.286$, anchura lámina de cobre de $35\mu\text{m}$, una frecuencia aproximada de 3.5GHz. Las dimensiones del sustrato serán de 90mm x 40mm, con una anchura de línea (W) de 1.5mm. Para una adaptación de 50Ω a la entrada y a la salida de la línea, la altura del sustrato en esos puntos tendrá que ser aproximadamente de 0.62mm (Figura 84).

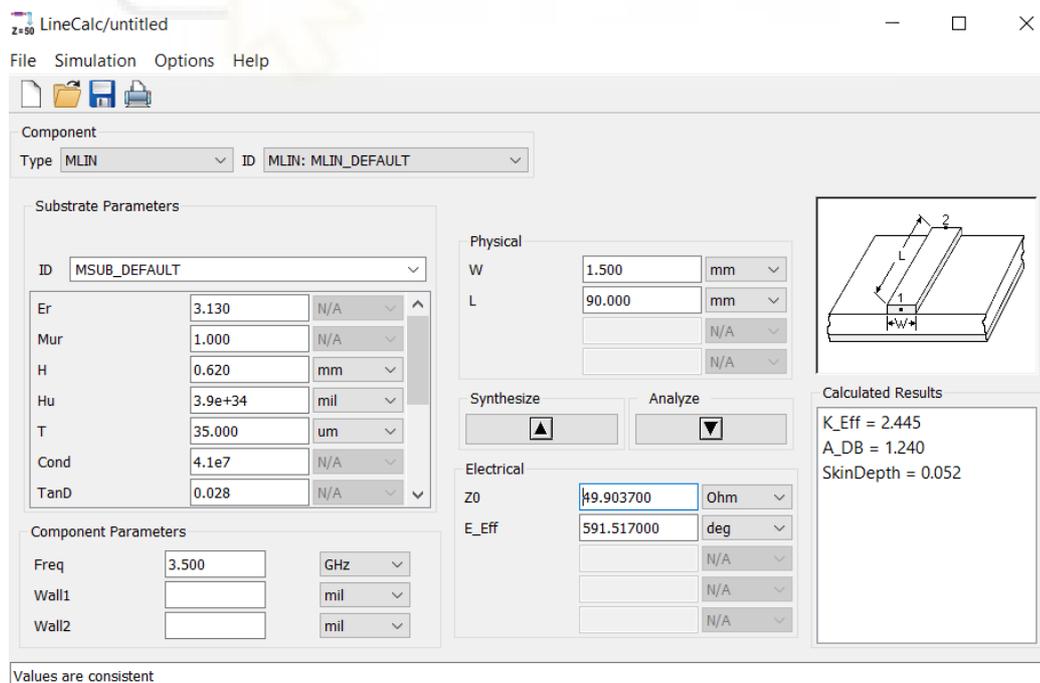


Figura 84. Cálculo de la altura del sustrato en los extremos mediante *LineCalc*.

La senoide al tener una amplitud de 1.4mm, tendrá en consecuencia una excursión pico a pico de 2.8mm. Dejamos cierto margen entre la cara superior del sustrato, donde irá situada la línea, y el mínimo de la senoide de 200 μ m. A dicha altura, tendremos una impedancia característica de la línea de 22 Ω . Por el contrato, en el punto máximo correspondiente a 3mm (2.8+0.2=3mm) tendremos una impedancia de 110 Ω . Como podemos comprobar, la impedancia característica irá variando según la longitud de la línea y tendremos un perfil de impedancias asociado a nuestro circuito.

Una vez conocemos las dimensiones que debe de tener nuestro sustrato, exportaremos el diseño de la senoide de *HFSS* a *AUTOCAD* para poder añadir los segmentos de adaptación en los extremos. Como la altura de adaptación es de 0.62mm, deberemos cortar la senoide a esa altura a la entrada y a la salida, por lo que para que quede de forma simétrica, variaremos el número de periodos de 10 a 9.25 periodos aproximadamente.

Por lo tanto, teniendo en cuenta dichos aspectos, el diseño transversal del sustrato tendrá las siguientes medidas en milímetros:

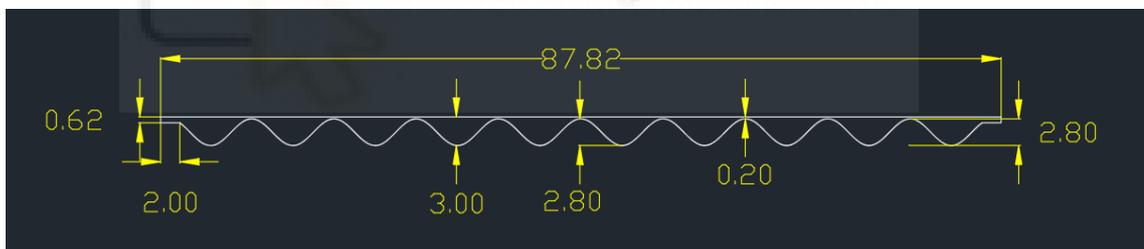


Figura 85. Dimensiones transversales del sustrato sinusoidal en milímetros.

Como podemos observar en la Figura 85, la longitud total del sustrato ahora es menor debido a que hemos acortado medio periodo para ajustar la adaptación en la entrada y salida de la línea.

Teniendo ya el diseño, lo importamos en *HFSS* para dotarlo de anchura y seguir con el diseño. Crearemos una anchura de 40mm, asignamos el plano de masa a la superficie sinusoidal, creamos los puertos de entrada y salida de la línea y finalmente creamos una región de propagación para la simulación del comportamiento del circuito (Figura 86).

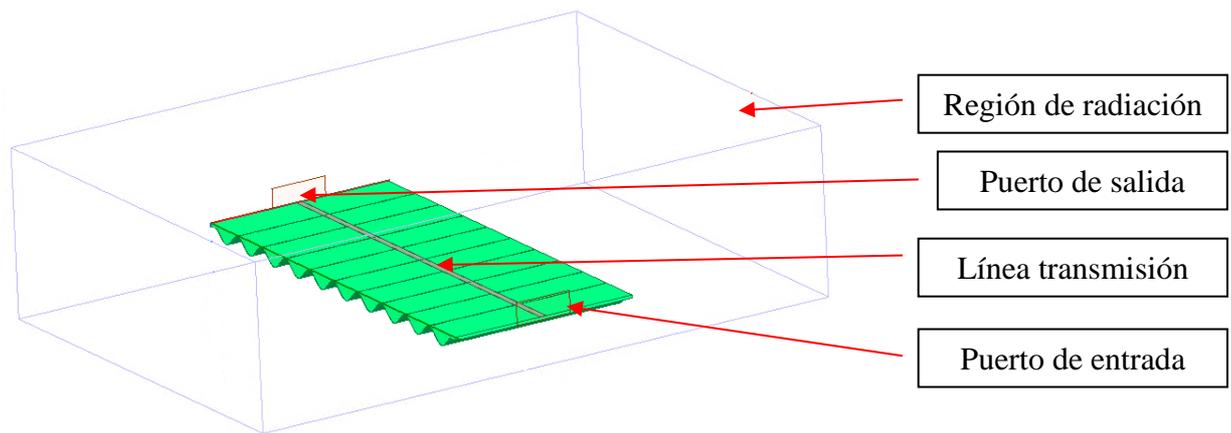
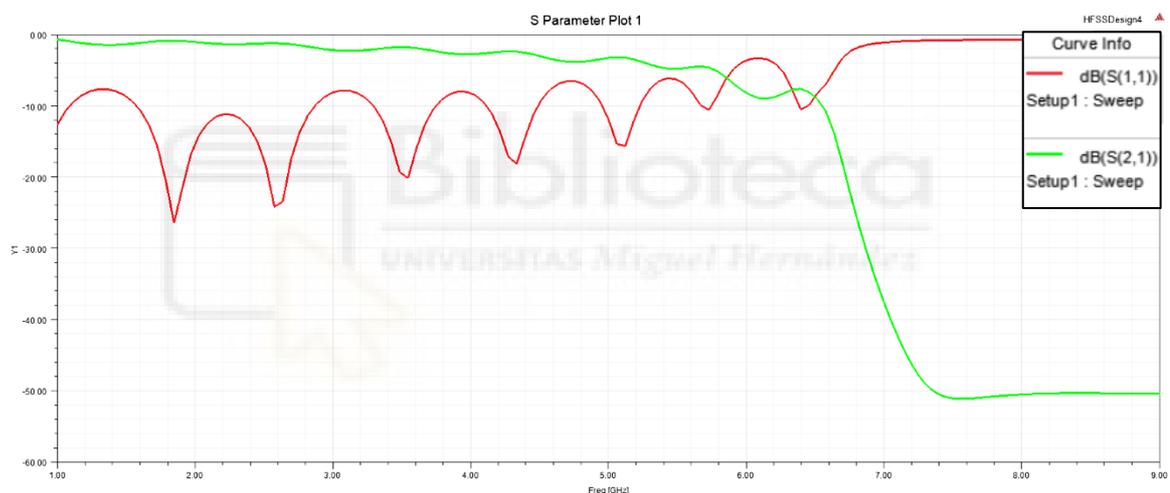


Figura 86. Estructura del diseño del en HFSS.

Para simular, estipulamos un barrido en frecuencia desde 1GHz hasta 8GHz y observamos los resultados de la simulación.



Gráfica 9. Simulación de los Parámetros S en HFSS.

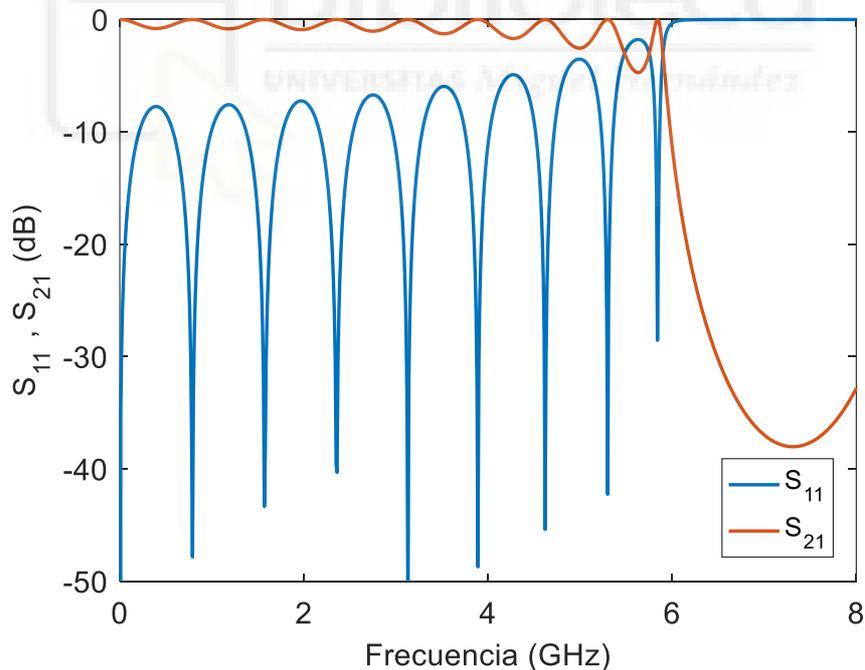
Tras realizar la simulación, observamos de forma correcta el comportamiento de nuestro circuito. Se trataría de una estructura periódica con una banda prohibida en torno 6GHz. En cuanto al parámetro de transmisión, alcanzaría cierto valor de pérdidas a medida que se acerca a la frecuencia de corte, mientras que el coeficiente de reflexión estaría en torno 8dB y a partir de los 6.4GHz comenzaría a reflejarse toda la potencia y a no transmitirse nada por el puerto de salida.

Por otra parte, podemos realizar también la simulación con MATLAB. Crearemos un código para representar los parámetros S_{11} y S_{21} dadas las medidas del circuito y la constante dieléctrica de la resina.

Emplearemos los siguientes parámetros para la simulación:

- Constante dieléctrica de la resina: 3.13
- Anchura de la pista: 1.53mm
- Periodo del sustrato: 8.61mm
- Número de periodos: 9.25
- Impedancia característica de la línea: 50Ω

Mediante el código creado, podremos representar los parámetros de transmisión y reflexión que tendrá nuestro circuito con perfil sinusoidal, así como el perfil de alturas del sustrato según la longitud total, los valores de impedancia característica que irá tomando en cada punto y la permitividad dieléctrica efectiva relativa también en función de la distancia recorrida. Dicho código, podemos encontrarlo en el Anexo D. Los resultados obtenidos son los siguientes:

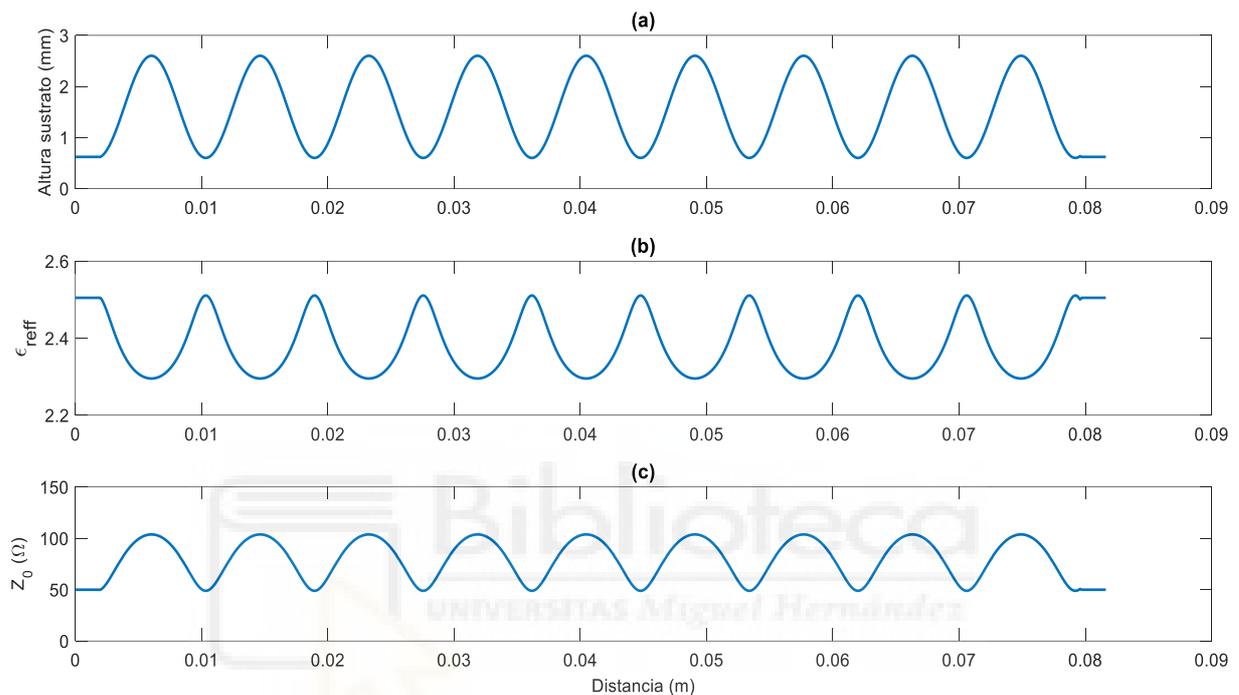


Gráfica 10. Representación de los Parámetros S en MATLAB.

Podemos observar cómo los parámetros de reflexión y de transmisión siguen la tendencia y se aproximan a los resultados obtenidos en la Gráfica 9. Hay que tener en cuenta, que el modelo de simulación en *HFSS* conlleva comportamientos

electromagnéticos mientras que MATLAB es un modelo teórico. De esta forma, los resultados analíticos son más ideales.

Por otra parte, mediante el código creado, somos capaces de obtener el perfil de alturas, la constante dieléctrica efectiva relativa y la impedancia característica de la línea según el punto en el que se encuentre (Gráfica 11 (a), (b) y (c)).



Gráfica 11. (a) Perfil de alturas del sustrato en mm. (b) Perfil de la cte. dieléctrica efectiva relativa. (c) Perfil de la impedancia característica de la línea.

Gracias a esta simulación, podemos comprobar que el perfil de alturas del sustrato diseñado va variando según su longitud siguiendo un perfil sinusoidal (Gráfica 11 (a)). Según el diseño del sustrato, a la entrada y a la salida del circuito, añadimos unos segmentos de adaptación para la línea de 0.62mm de altura, los cuales se pueden observar de forma correcta en la gráfica. Además, la impedancia característica a la entrada y salida concuerda con lo esperado, siendo ésta de 50 Ω , consiguiendo así adaptación (Gráfica 11 (c)). Así mismo, podemos identificar en sendas gráficas, que el número de periodos del sustrato coincide con los representados, siendo cada oscilación un periodo. Por último, en la Gráfica 11 (b), identificamos el perfil que adoptaría la constante dieléctrica efectiva relativa a lo largo del sustrato, siendo estos valores bastante coherentes.

5.2. FABRICACIÓN DEL SUSTRATO

En este apartado, describiremos brevemente el proceso de fabricación del sustrato de nuestra estructura periódica siguiendo el proceso empleado en el apartado 3.6. Al haber diseñado ya el circuito, simplemente desde el diseño de *HFSS*, seleccionaremos las caras que conforman el sustrato y exportaremos su geometría en formato *.step*.

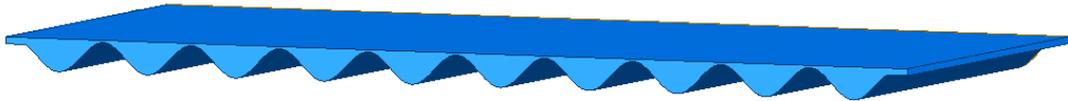


Figura 87. Diseño del sustrato en *HFSS*.

Mediante el *FREECAD*, convertiremos el diseño a formato *.stl* para poder abrirlo en *CHITUBOX*.

Al tratarse de un sustrato con perfil sinusoidal, a la hora de metalizarlo mediante el epoxi y la lámina de cobre, es posible que no se adhiriera siguiendo dicho perfil. Es por ello, que previamente a la metalización, diseñaremos un ‘sustrato secundario’ que se acople a nuestro sustrato para que encaje en él y la metalización sea más precisa.

Tomando como referencia el diseño de la senoide ya creada, directamente desde *AUTOCAD*, reflejaremos dicha función y ajustaremos los segmentos de adaptación de los extremos para un acoplo total entre ambos sustratos. Finalmente, obtendremos el siguiente diseño:

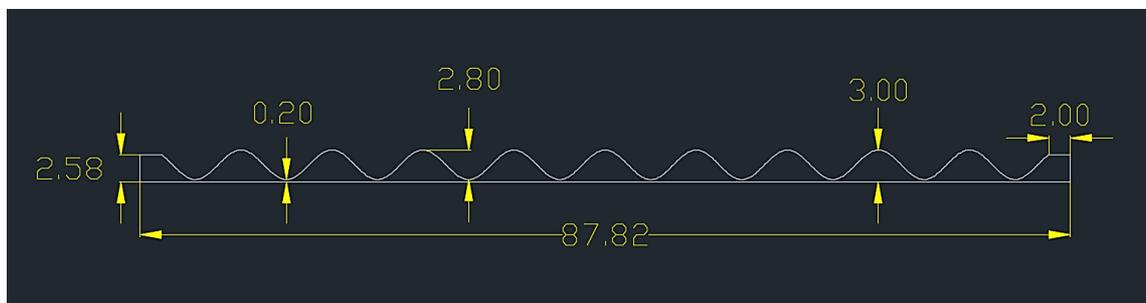


Figura 88. Dimensiones transversales del sustrato adicional en milímetros.

Una vez creado el diseño, al igual que el anterior diseño, lo importaremos en *HFSS*, y lo dotaremos con la misma anchura que el sustrato, 40mm (Figura 89).

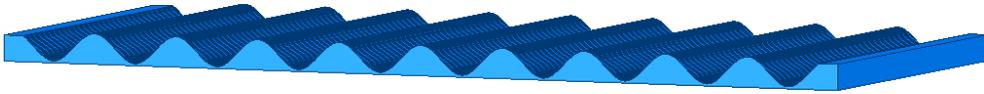


Figura 89. Diseño sustrato adicional en *HFSS*.

Finalmente, ambos sustratos quedarían completamente ensamblados, de forma que facilitaría la metalización en la superficie sinusoidal.

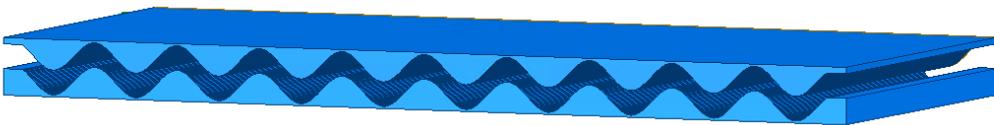


Figura 90. Diseño de ambos sustratos complementarios en *HFSS*.

Una vez tenemos ambos diseños, pasaremos a su fabricación. Para ello, obtendremos el formato .stl mediante el programa *FREECAD* y lo abriremos en *CHITUBOX*. Como las dimensiones son limítrofes, sobre todo en longitud, no podremos imprimir ambos sustratos en paralelo. Lo haremos de uno en uno, ajustando los mismos parámetros de impresión para los dos.

Los parámetros de impresión que vamos a ajustar son los siguientes: 0 capas inferiores, tiempo de exposición de las capas 14s y una altura de capa de 0.05mm. El resto de parámetros no los modificamos.

Tras todo el proceso de impresión, dejaremos unos 20 min los sustratos limpiándose y eliminando los restos de resina sin curar mediante el *Resin Cleaner*. El resultado obtenido es el siguiente:

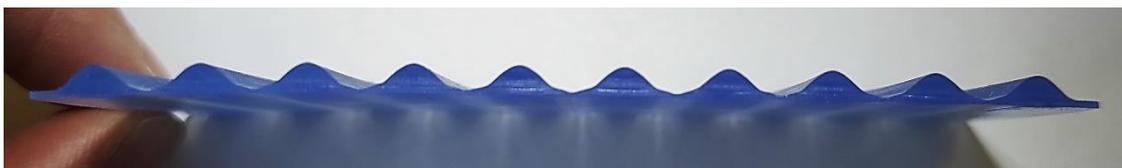


Figura 91. Sustrato de perfil sinusoidal impreso.

Además, podemos comprobar, que el sustrato adicional y el sustrato correspondiente a nuestro circuito, se acoplan perfectamente tras su fabricación (Figura 92).



Figura 92. Sustratos perfectamente ensamblados.

Una vez finalizado el proceso de fabricación del sustrato de la estructura y del sustrato complementario, procederemos a su metalización.

5.3. METALIZACIÓN DEL SUSTRATO

Para la metalización del sustrato de nuestro circuito, deberemos llevar sumo cuidado y asegurar que la lámina de cobre se amolda de forma correcta al perfil sinusoidal del diseño. Para ello, como bien hemos comentado anteriormente, emplearemos el sustrato complementario que hemos diseñado y fabricado.

Comenzaremos añadiendo una fina capa de epoxi sobre la superficie ondulada y colocaremos el cobre encima. Ejerceremos presión en dicha cara a través del elemento complementario. De esta forma, conseguiremos que el epoxi sobrante rebase hasta los extremos y se adhiera correctamente el cobre a nuestro perfil (Figura 93).



(a)



(b)

Figura 93. Proceso de metalización. (a) Vista desde la superficie lisa. (b) Vista desde la superficie sinusoidal.

Observando la Figura 93 (a), podemos comprobar que la metalización se está realizando correctamente puesto que en los mínimos de la sinusoide ($200\mu\text{m}$), se observa claramente el color del cobre. A través de la Figura 93 (b), vemos cómo la lámina de cobre sigue perfectamente el perfil de la onda sinusoidal de nuestro diseño.

Seguidamente, metalizaremos la cara donde irá fresada la línea de transmisión y dejaremos que se adhieran debidamente ejerciendo presión con un sargento durante unas 12 horas.

Posteriormente, con cuidado de no dañar el sustrato de resina, recortaremos el exceso de cobre del contorno y lijaremos los laterales hasta obtener un acabado óptimo.



Figura 94. Metalizado de la superficie sinusoidal.

5.4. FRESADO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Para poder fresar correctamente la línea de transmisión en la superficie lisa de nuestro sustrato metalizado, utilizaremos de base el sustrato complementario para evitar que se quiebre al ser fresado. Simplemente, llevaremos a cabo el mismo proceso que describimos en el apartado 4.1.5 de este proyecto. Realizaremos un trazo de prueba para comprobar que la profundidad de fresado es la correcta y posteriormente fresaremos nuestra línea de transmisión (Figura 95).

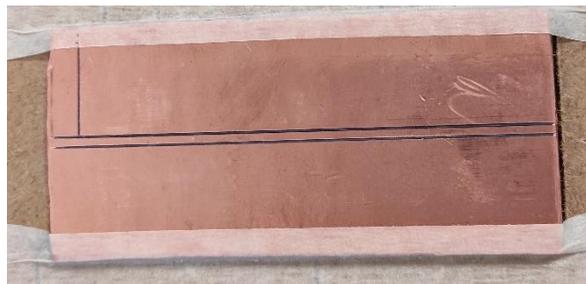


Figura 95. Fresado de la línea de transmisión en el sustrato metalizado.

5.5. ACABADO

Una vez terminamos el proceso del fresado de la línea, procederemos a refinar el acabado del circuito. Podemos observar en la Figura 95, que los extremos de la línea no han sido fresados hasta el borde. Mediante un bisturí y el microscopio, repasaremos la pista de la línea siguiendo el surco de la fresa para poder retirar la lámina de cobre sobrante sin dañar la pista conductora. Tras retirar el cobre restante, fijaremos los bordes y contornos del circuito para obtener un buen acabado del circuito final. El resultado obtenido después de todo el proceso de diseño y de fabricación podemos verlo en las siguientes figuras.

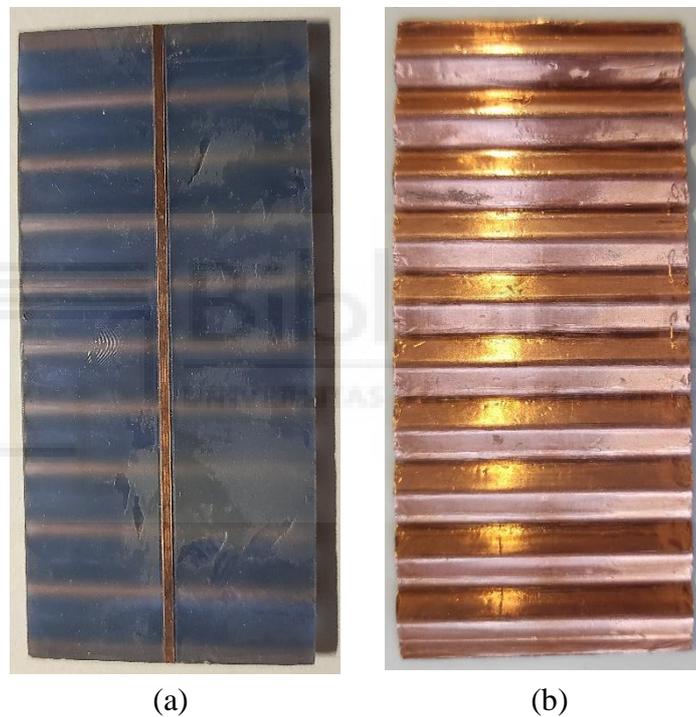


Figura 96. Circuito fabricado. (a) Cara superior. (b) Cara posterior.



Figura 97. Perfil del circuito fabricado.

5.6. MEDICIÓN DEL CIRCUITO

En este apartado, comprobaremos que el comportamiento de la estructura periódica con perfil sinusoidal que hemos fabricado concuerda con los resultados esperados del diseño. Para ello, primeramente, vamos a comprobar todas las dimensiones del circuito puesto que alguna de ellas podría haber variado durante el proceso de fabricación.

Comenzaremos con el ancho de la pista. Usaremos el *DinoCapture* para comprobar dicha anchura.

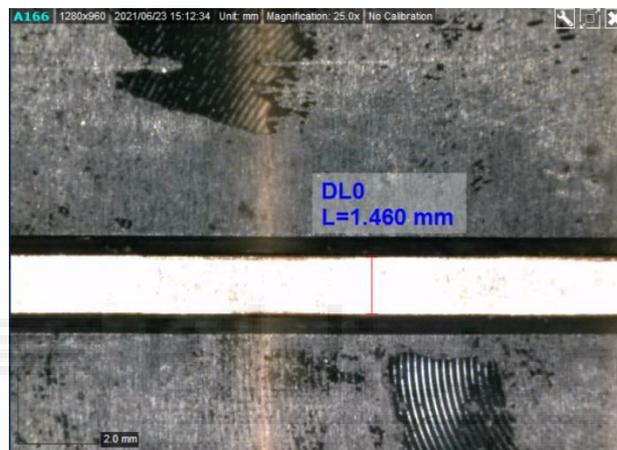


Figura 98. Medición de la anchura de la pista con *DinoCapture*.

Podemos comprobar a través de la Figura 98, que el ancho de la línea de transmisión de nuestro circuito ha variado de 1.53mm (diseño) a 1.46mm. Puede deberse a que, en el proceso de fresado de la línea, la fresa estuviese colocada a una altura un poco inferior a la que debiera estar y haya penetrado más en el sustrato, perforando más de lo debido.

En cuanto a las dimensiones del circuito, también habrán variado debido a la capa de cobre que hemos empleado para la metalización y por el adhesivo epoxi. Tras verificar las dimensiones, observamos que la altura máxima del sustrato ahora es de 2.79mm (3mm diseño) y la mínima de 563 μ m (200 μ m diseño). El segmento de adaptación de los extremos mide 1mm tras su fabricación (Figura 99).

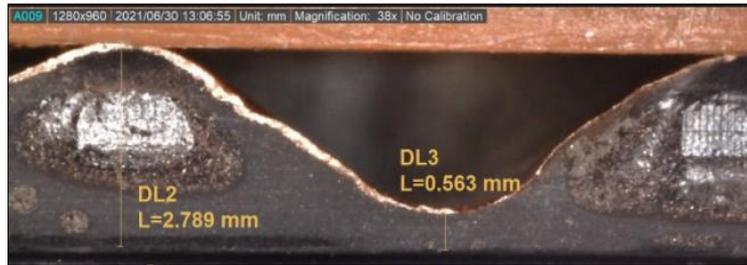
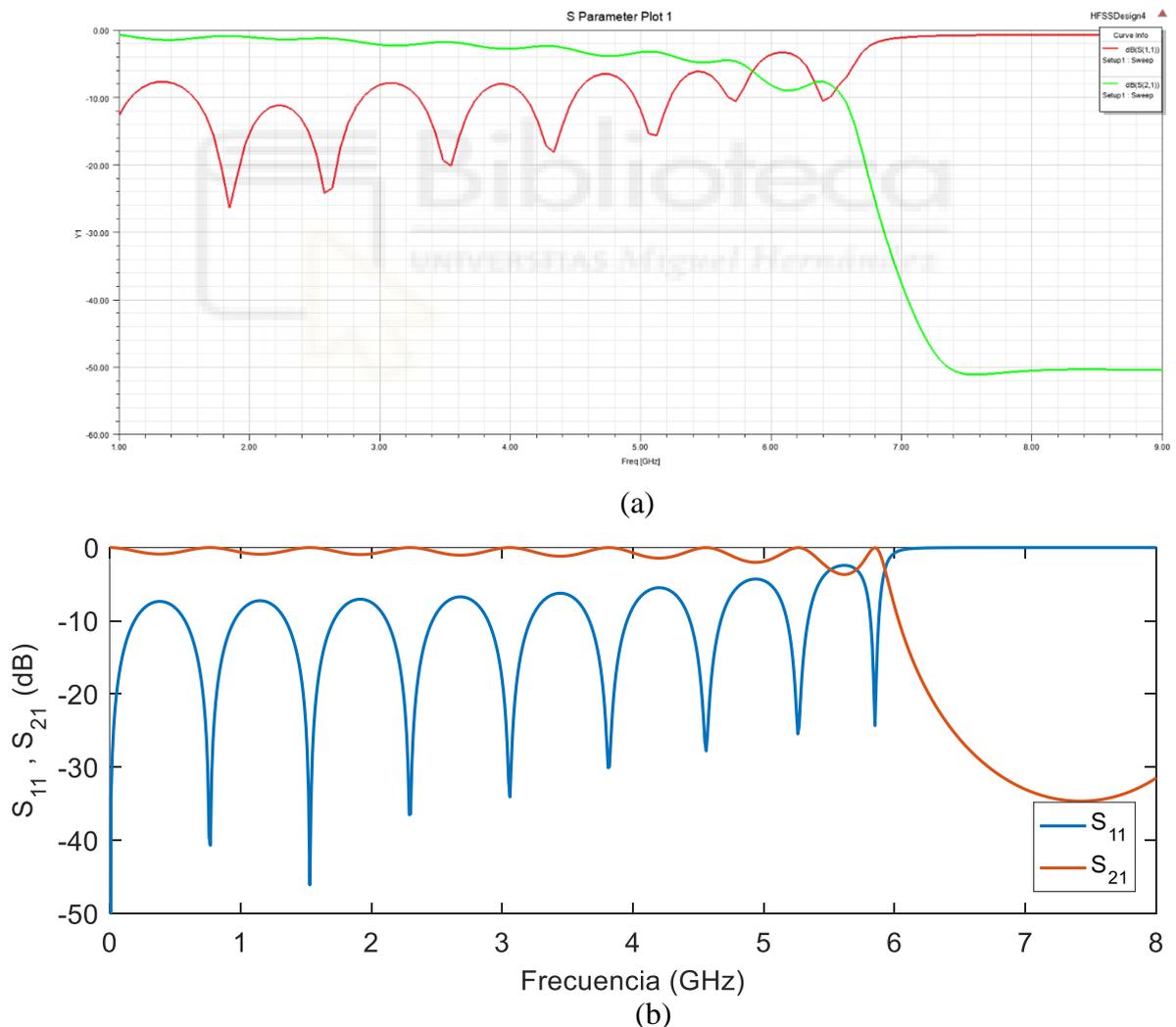


Figura 99. Medición altura sustrato tras su fabricación mediante *DinoCapture*.

Para corroborar si estas variaciones físicas tienen influencia sobre el diseño original, realizaremos de nuevo las simulaciones en *HFSS* y *MATLAB* modificando los valores de las alturas y el ancho de la pista. Tras las debidas simulaciones en ambos programas, podemos comprobar que no varía apenas la respuesta de la banda prohibida. Por lo tanto, estas pequeñas variaciones en las dimensiones no afectan al resultado final que esperábamos (Gráfica 12).



Gráfica 12. (a) Segunda simulación en *HFSS*. (b) Segunda simulación en *MATLAB*.

Después de demostrar que a pesar de las variaciones físicas seguimos obteniendo la banda prohibida de frecuencias a 6GHz, procederemos a medir el circuito mediante el analizador de redes vectorial. Usaremos el *Universal Test Fixture* para poder realizar la medición (Figura 100).

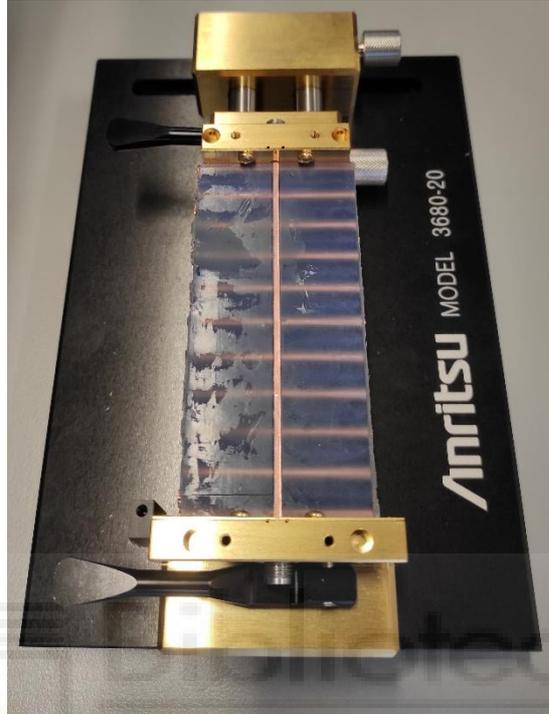
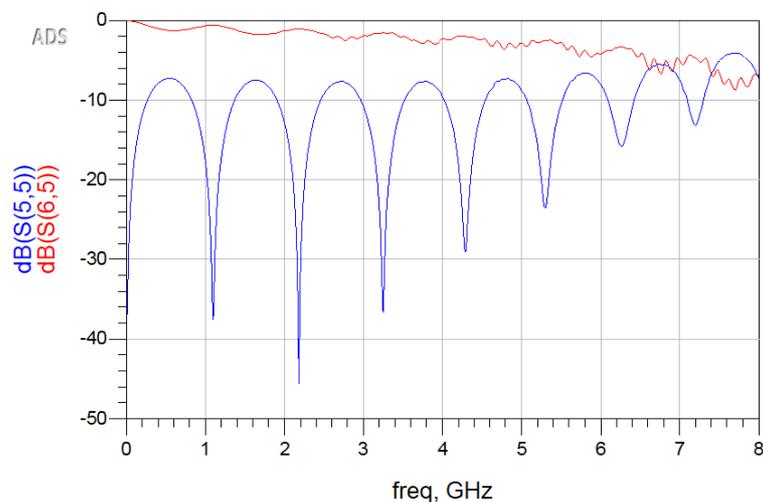


Figura 100. Medición de la estructura mediante el UTF.

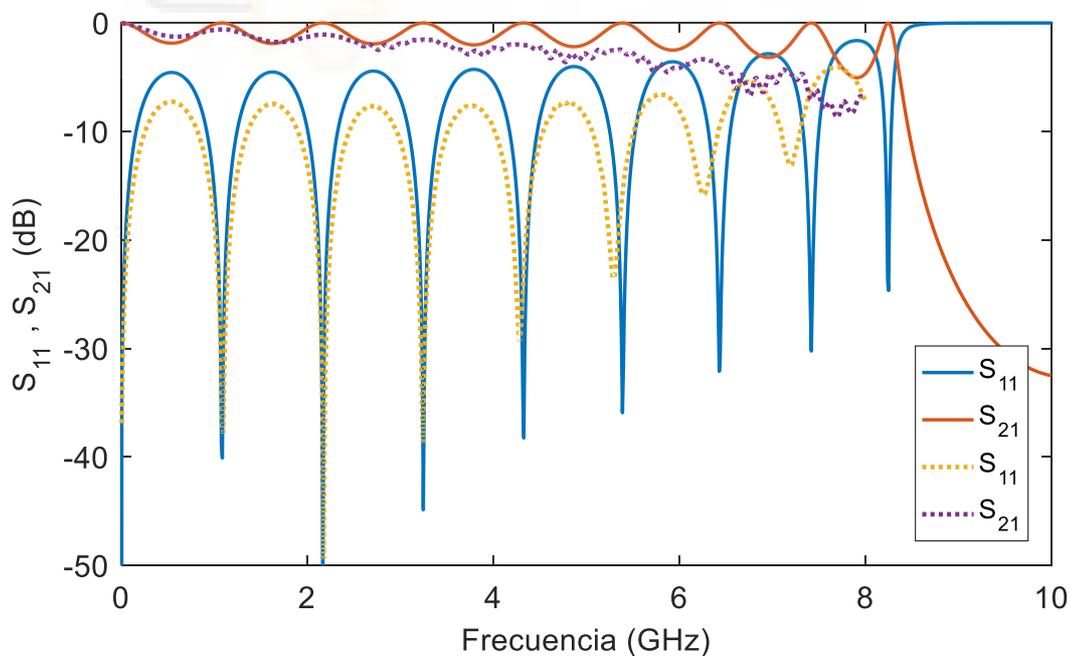
Tras la calibración correspondiente del VNA, procedemos a la medición final de los Parámetros S del circuito. A primera vista, parece ser que no obtenemos la respuesta que deseábamos. Para poder representar los datos, exportamos la medición a ADS, y a través de una red de 2 puertos, representamos el parámetro de transmisión y de reflexión. Obtenemos los siguientes resultados:



Gráfica 13. Medición del circuito con el VNA.

Si observamos la Gráfica 12, no se observa la banda prohibida de la que hablábamos. No divisamos la frecuencia de corte en torno a los 6GHz. Si es cierto que su comportamiento hasta los 7GHz se asemeja bastante al diseño. Sin embargo, notamos que faltaría un periodo por representar en el coeficiente de reflexión. Este hecho nos lleva a plantear, que a pesar de que las dimensiones del sustrato como de la pista hayan variado, la única respuesta a estos resultados es que la constante dieléctrica de la resina haya cambiado. Cabe la posibilidad que haya disminuido y, en consecuencia, la banda prohibida de frecuencias se haya desplazado a frecuencias superiores, con la particularidad de que el VNA del laboratorio solo es capaz de realizar mediciones hasta los 8GHz. Para salir de dudas, realizaremos de nuevo las simulaciones del circuito en *HFSS* y *MATLAB* variando la ϵ_r a un valor inferior, a 3.13 y el barrido de frecuencias hasta los 10GHz.

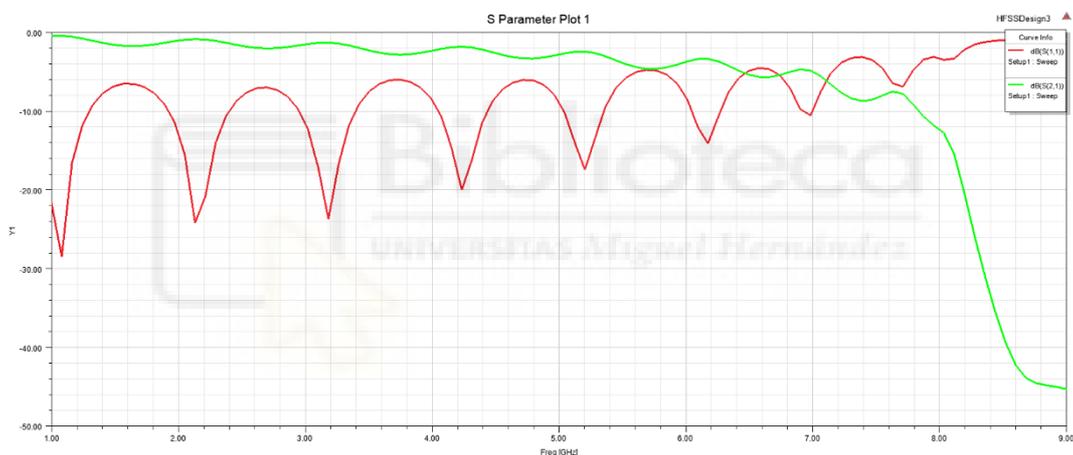
Emplearemos *MATLAB* para encontrar el valor que debería de tener la constante dieléctrica de la resina. Exportaremos el archivo de datos de la medición del VNA a *MATLAB* e iremos modificando el valor de la ϵ_r hasta hacer que coincidan la representación de la simulación con la de la medición. Tras el ajuste, hemos aproximado el valor de la constante dieléctrica a 2.1.



Gráfica 14. Representación de los Parámetros S simulados y medidos en *MATLAB*.

Observando la Gráfica 14, las funciones discontinuas representan los parámetros medidos experimentalmente a través del VNA. Las funciones continuas, a los parámetros de la simulación. Analizando la gráfica, podemos ver que efectivamente, el analizador de redes vectorial sólo es capaz de medir hasta los 8GHz. A partir de dicho valor, no podemos comprobar de forma empírica el comportamiento real del circuito fabricado. No obstante, gracias a las simulaciones, comprobamos que la constante dieléctrica de la resina ha disminuido y la frecuencia de corte ha aumentado hasta los 8.2GHz, aproximadamente. El ajuste lo hemos realizado adaptando los coeficientes de reflexión hasta que coincidieran lo máximo posible. El valor final estimado de la ϵ_r en este circuito es de 2.1.

Para realizar esta nueva simulación en *HFSS*, modificaremos el valor de la constante dieléctrica relativa a $\epsilon_r=2.1$. Obtenemos:



Gráfica 15. Simulación circuito *HFSS* con $\epsilon_r=2.1$.

En efecto, a través de la Gráfica 15 afirmamos que el *Band-Gap* se ha desplazado a frecuencias superiores, concretamente hasta los 8GHz aproximadamente, como hemos podido comprobar también en la Gráfica 14.

Analizando los resultados obtenidos y especulando sobre qué factor ha sido el causante de esta variación en la constante dieléctrica de la resina, podemos decir que posiblemente haya influido algún factor durante el proceso de metalización del sustrato. Descartamos el tiempo de curado de la resina, ya que los parámetros de impresión no han sido modificados en ningún momento. En cuanto al proceso de posacabado, el producto que empleamos para la limpieza del sustrato una vez impreso, no afecta a las propiedades intrínsecas de la resina, únicamente se utiliza

para eliminar los restos de resina que no se hayan solidificado sobre la superficie. Por ende, contemplamos la posibilidad que a la hora de la metalización del perfil senoidal, haya quedado alguna partícula de aire a pesar que haber ejercido presión suficiente con el sustrato complementario, y en consecuencia, haya disminuido la ϵ_r . También, al tratarse de un perfil con valles y crestas, es posible que en las zonas de valles, se haya acumulado más adhesivo epoxi y haya influido en los resultados. Vamos a comprobar este factor mediante el *DinoCapture*.

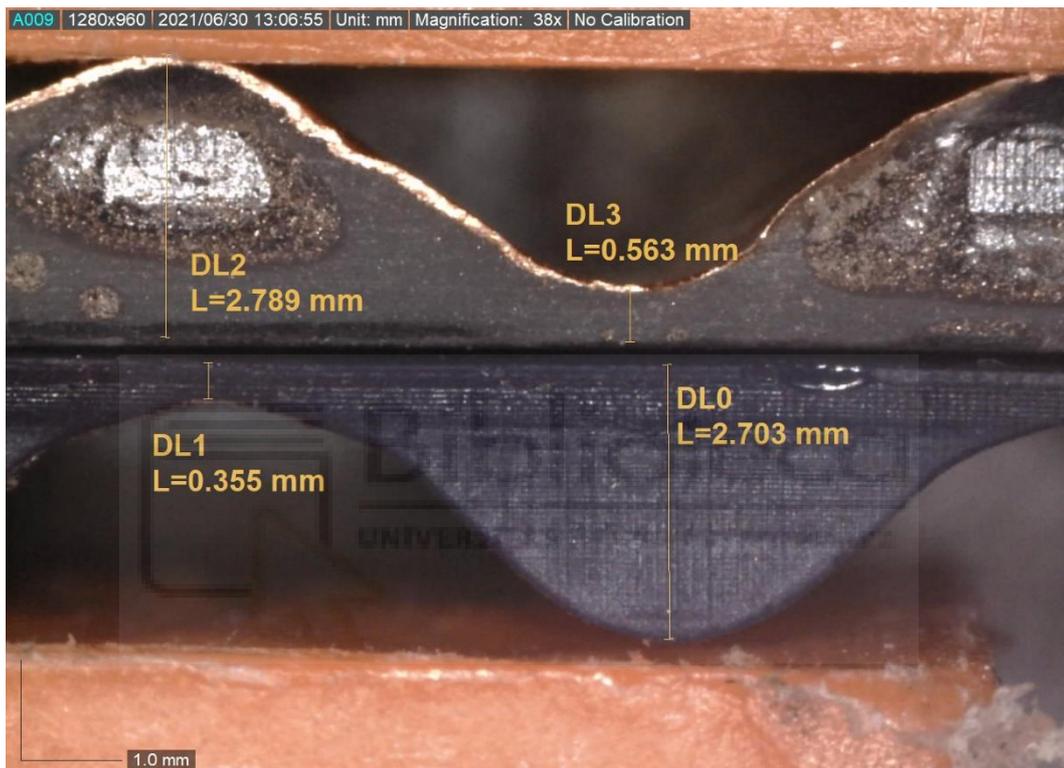


Figura 101. Comparación dimensiones del sustrato metalizado y sin metalizar.

En la parte superior de la Figura 101, observamos el sustrato del circuito metalizado. En la inferior, el sustrato complementario sin metalizar. Recordemos que ambos sustratos fueron impresos bajo los mismos parámetros de impresión y calibrado, por lo que en principio, deberían contar con dimensiones semejantes. Como podemos observar, la altura correspondiente al máximo del perfil senoidal, coincide prácticamente en ambos sustratos, a pesar de la metalización. La lámina de cobre apenas tiene un espesor de $35\mu\text{m}$, por lo que no debería de ser determinante para los resultados. En cambio, si nos fijamos en los puntos de altura mínima, vemos que hay una gran discrepancia entre ambos. Por una parte, el sustrato sin metalizar, apenas

cuenta con 350 μ m de altura, mientras que en nuestro circuito metalizado es de 560 μ m. La única explicación posible es que se haya concentrado una mayor cantidad de epoxi en todos periodos de la estructura, influyendo así en el comportamiento global del dieléctrico.



CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.

En este capítulo se comentarán las conclusiones obtenidas del proyecto una vez finalizado. Por otra parte, se comentarán las líneas futuras de investigación tomando de base las conclusiones obtenidas, así como posibles mejoras en el proceso de fabricación mediante la impresora 3D y las limitaciones que conlleva la fabricación de sustratos para circuitos de microondas mediante esta tecnología.

6.1. CONCLUSIONES DEL PROYECTO

El objeto de estudio de este Trabajo Fin de Grado era la puesta en marcha de la impresión 3D a través de la estereolitografía para la creación de sustratos dieléctricos para circuitos de microondas, además de la caracterización de la resina empleada.

Se ha conseguido de forma satisfactoria conocer el funcionamiento de esta tecnología, así como las propiedades de los materiales que emplea, los parámetros óptimos de impresión y el proceso de calibración de la impresora 3D y su mantenimiento para la elaboración de sustratos.

Por otra parte, se han diseñado mediante software de simulación de circuitos de alta frecuencia unos circuitos simples de test para su posterior fabricación mediante un sustrato de resina impreso, metalización, fresado y posacabado. De esta forma, hemos sido capaces de caracterizar los parámetros de la resina gracias a la puesta en marcha de un nuevo equipo de medición: una estación de puntas. Así, hemos obtenido una constante dieléctrica de 3.13 y una tangente de pérdidas de 0.0286, caracterizando así la resina. Dichos resultados rondan los valores del FR4, con la diferencia que mediante la impresión 3D, podemos fabricar cualquier modelo de sustrato según las dimensiones y especificaciones de interés y de forma económica, sencilla y rápida.

Del mismo modo, hemos sido capaces de caracterizar el epoxi y determinar que su presencia en el proceso de metalización no influye en el comportamiento de la resina, ya que se emplea una fina capa de este adhesivo (30 μ m aprox.).

Finalmente, hemos diseñado y fabricado una estructura periódica de perfil sinusoidal

con una banda de frecuencias prohibidas en 6GHz mediante una línea de transmisión. De esta forma, y manteniendo constante el ancho de la línea, el perfil de alturas del sustrato variaba a lo largo de la línea de transmisión. Sin embargo, el comportamiento de la resina en este circuito ha variado, disminuyendo el valor de la constante dieléctrica a 2.1. Posiblemente haya sido por un exceso de epoxi en las zonas de los valles de la sinusoide.

Podemos concluir, que el uso de la impresión 3D abre un mundo de posibilidades en este sector a la hora del diseño y fabricación de circuitería de alta frecuencia.

6.2. LÍNEAS FUTURAS

Una vez finalizado el proyecto y analizados los resultados, se presenta la posibilidad de perfeccionar el sistema de calibrado de la impresora para obtener resultados más precisos en el eje Z. Concretamente, trabajaremos en la fabricación de una ‘escalera de calibración’ para poder determinar exactamente el nivel de precisión de la impresora para alturas de pocas micras. Por otra parte, se persistirá en la caracterización de la resina, para obtener resultados más fiables a través de la fabricación de nuevos circuitos y analizando sus respectivos comportamientos.

Finalmente, se experimentaría con la fabricación de distintos perfiles de sustratos (sinusoidal, rectangular, con cavidades...) para analizar sus comportamientos e innovar en este ámbito, explotando el potencial que tiene el uso de la impresión 3D mediante estereolitografía para la fabricación de circuitos de microondas.

ANEXOS.

ANEXO A: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DE LA RESINA 3DJAKE AZUL OSCURO

Technical Data Sheet



Product name: **3DJAKE Resin**

Version: 1.0

Date: 03.12.2019

Physical properties

Description	Typical value
Viscosity	33 – 57 mPa/s
Hardness (Shore)	D82
E-Modulus	1270 MPa
Tensile Strength	36 MPa
Shrinkage:	approx. < 0,5%
Elongation at Break	4,5 %

Packaging:

The resin is filled in HDPE bottles with UN-approval for transportation.

Additional info:

3DJake Resin is specially designed for 3D printers using DLP or LCD/LED light sources. Safety aspects are described in the according safety data sheet.

The product is neither tested nor certified as suitable for medical uses. Before handling and usage, please carefully read the safety data sheet of this product.

Storage: The bottle shall be stored in a dry, dark and cool place.

Before using the resin, shake the bottle well. Always use protection gloves and safety glasses – use respirator in case of inadequate ventilation.

Web: www.3djake.com
Mail: office@3djake.com
Tel: +43 800 100 350 15

Niceshops GmbH
Saaz 99, Paldau
Austria

3M

Scotch-Weld™

Epoxy Adhesive

EC-2216 B/A

Technical Datasheet

June 2009

Product Description 3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive EC-2216 B/A is a flexible, two-part, room temperature curing epoxy with high peel and shear strength. Scotch-Weld EC-2216 Adhesive has been tested and certified for aircraft and aerospace application.

Typical Uncured Physical Properties **Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.**

Product	3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive			
	EC-2216 B/A Gray		EC-2216 B/A Translucent	
	Base	Accelerator	Base	Accelerator
Color:	White	Gray	Translucent	Amber
Base:	Modified Epoxy	Modified Amine	Modified Epoxy	Modified Amine
Net Wt.: (lb/gal)	11.1-11.6	10.5-11.0	9.4-9.8	8.0-8.5
Viscosity: (cps) (Approx.) Brookfield RVF #7 sp. @ 20 rpm	75,000 - 150,000	40,000 - 80,000	11,000 - 15,000	5,000 - 9,000
Mix Ratio: (by weight)	5 parts	7 parts	1 part	1 part
Mix Ratio: (by volume)	2 parts	3 parts	1 part	1 part
Work Life: 100 g Mass @ 75°F (24°C)	90 minutes	90 minutes	120 minutes	120 minutes

- Features**
- Excellent for bonding many metals, woods, plastics, rubbers, and masonry products.
 - Base and Accelerator are contrasting colors.
 - Good retention of strength after environmental aging.
 - Resistant to extreme shock, vibration, and flexing.
 - Excellent for cryogenic bonding applications.
 - The translucent can be injected.
 - Meets DOD-A-82720.

3M™ Scotch-Weld™
Epoxy Adhesive EC-2216 B/A
 Technical Datasheet

Typical Cured Physical Properties	Product	3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive	
		EC-2216 B/A Gray	EC-2216 B/A Translucent
Shore D Hardness ASTM D 2240		50-65	35-50
Time to Handling Strength		8-12 hrs.	12-16 hrs.

Typical Cured Electrical Properties	Product	3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive	
		EC-2216 B/A Gray	EC-2216 B/A Translucent
Arc Resistance		130 seconds	—
Dielectric Strength		408 volts/mil	630 volts/mil
Dielectric Constant @ 73°F (23°C)		5.51—Measured @ 1.00 KHz	6.3 @ 1 KHz
Dielectric Constant @ 140°F (60°C)		14.17—Measured @ 1.00 KHz	—
Dissipation Factor 73°F (23°C)		0.112 Measured @ 1.00 KHz	0.119 @ 1 KHz
Dissipation Factor 140°F (60°C)		0.422—Measured @ 1.00 KHz	—
Surface Resistivity @ 73°F (23°C)		5.5 x 10 ¹⁶ ohm-@ 500 volts DC	—
Volume Resistivity @ 73°F (23°C)		1.9 x 10 ¹² ohm-cm- @ 500 volts DC	3.0 x 10 ¹² ohm-cm @ 500 volts DC

—No value present.

Typical Cured Thermal Properties	Product	3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive	
		EC-2216 B/A Gray	EC-2216 B/A Translucent
Thermal Conductivity		0.228 Btu-ft/ft ² h°F	0.114 Btu-ft/ft ² h°F
Coefficient of Thermal Expansion		102 x 10 ⁻⁶ in/in/°C between 0-40°C	81 x 10 ⁻⁶ in/in/°C between -50-0°C
		134 x 10 ⁻⁶ in/in/°C between 40-80°C	207 x 10 ⁻⁶ in/in/°C between 60-150°C

Typical Cured Outgassing Properties	Outgassing Data NASA 1124 Revision 4			
		% TML	% CVCM	% Wtr
	3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive EC-2216 B/A Gray	.77	.04	.23

Cured in air for 7 days @ 77°F (25°C).

Handling/Curing Information	Directions for Use	
		<ol style="list-style-type: none"> For high strength structural bonds, paint, oxide films, oils, dust, mold release agents and all other surface contaminants must be completely removed. However, the amount of surface preparation directly depends on the required bond strength and the environmental aging resistance desired by user. For suggested surface preparations of common substrates, see the following section on surface preparation. These products consist of two parts. Mix thoroughly by weight or volume in the proportions specified on the product label and in the uncured properties section. Mix approximately 15 seconds after a uniform color is obtained.

3M™ Scotch-Weld™
Epoxy Adhesive EC-2216 B/A
 Technical Datasheet

Handling/Curing Information (continued)

3. For maximum bond strength, apply product evenly to both surfaces to be joined.
4. Application to the substrates should be made within 90 minutes. Larger quantities and/or higher temperatures will reduce this working time.
5. Join the adhesive coated surfaces and allow to cure at 60°F (16°C) or above until firm. Heat, up to 200°F (93°C), will speed curing.
6. The following times and temperatures will result in a full cure:

Product	3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive	
	EC-2216 B/A Gray	EC-2216 B/A Translucent
Cure Temperature	Time	Time
75°F (24°C)	7 days	30 days
150°F (66°C)	120 minutes	240 minutes
200°F (93°C)	30 minutes	60 minutes

7. Keep parts from moving until handling strength is reached. Contact pressure is necessary. Maximum shear strength is obtained with a 3-5 mil bond line. Maximum peel strength is obtained with a 17-25 mil bond line.
8. Excess uncured adhesive can be cleaned up with ketone type solvents.*

Adhesive Coverage: A 0.005 in. thick bondline will typically yield a coverage of 320 sq. ft/gallon

Application and Equipment Suggestions

These products may be applied by spatula, trowel or flow equipment. Two-part mixing/proportioning/dispensing equipment is available for intermittent or production line use. These systems are ideal because of their variable shot size and flow rate characteristics and are adaptable to many applications.

Surface Preparation

For high strength structural bonds, paint, oxide films, oils, dust, mold release agents and all other surface contaminants must be completely removed. However, the amount of surface preparation directly depends on the required bond strength and the environmental aging resistance desired by user.

The following cleaning methods are suggested for common surfaces.

Steel or Aluminum (Mechanical Abrasion)

1. Wipe free of dust with oil-free solvent such as acetone or alcohol solvents.*
2. Sandblast or abrade using clean fine grit abrasives (180 grit or finer).
3. Wipe again with solvents to remove loose particles.
4. If a primer is used, it should be applied within 4 hours after surface preparation. If 3M™ Scotch-Weld™ Structural Adhesive Primer EC-1945 B/A is used, apply a thin coating (0.0005") on the metal surfaces to be bonded, air dry for 10 minutes, then cure for 30 minutes at 180°F (82°C) prior to bonding.

*When using solvents, extinguish all ignition sources, including pilot lights, and follow the manufacturer's precautions and directions for use. Use solvents in accordance with local regulations.

3M™ Scotch-Weld™
Epoxy Adhesive EC-2216 B/A
Technical Datasheet

Surface Preparation
(continued)

Aluminum (Chemical Etch)

Aluminum alloys may be chemically cleaned and etched as per ASTM D 2651. This procedure states to:

1. Alkaline Degrease – Oakite® Aluminum Cleaner 164 solution (9-11 oz/gal of water) at 190°F ± 10°F (88°C ± 5°C) for 10-20 minutes. Rinse immediately in large quantities of cold running water.

2. **Optimized FPL Etch Solution (1 liter):**

Material	Amount
Distilled Water	700 ml plus balance of liter (see below)
Sodium Dichromate	28 to 67.3 grams
Sulfuric Acid	287.9 to 310.0 grams
Aluminum Chips	1.5 grams/liter of mixed solution

To prepare 1 liter of this solution, dissolve sodium dichromate in 700 ml of distilled water. Add sulfuric acid and mix well. Add additional distilled water to fill to 1 liter. Heat mixed solution to 66 to 71°C (150 to 160°F). Dissolve 1.5 grams of 2024 bare aluminum chips per liter of mixed solution. Gentle agitation will help aluminum dissolve in about 24 hours.

To etch aluminum panels, place them in FPL etch solution heated to 66 to 71°C (150 to 160°F). Panels should soak for 12 to 15 minutes.

3. Rinse: Rinse panels in clear running tap water.
4. Dry: Air dry 15 minutes; force dry 10 minutes (minimum) at 140°F (60°C) maximum.
5. If primer is to be used, it should be applied within 4 hours after surface preparation.

Plastics/Rubber

1. Wipe with isopropyl alcohol.*
2. Abrade using fine grit abrasives (180 grit or finer).
3. Wipe with isopropyl alcohol.*

Glass

1. Solvent wipe surface using acetone or Methyl Ethyl Ketone (MEK).*
2. Apply a thin coating (0.0001 in. or less) of 3M™ Scotch-Weld™ Structural Adhesive Primer EC-3901 to the glass surfaces to be bonded and allow the primer to dry a minimum of 30 minutes @ 75°F (24°C) before bonding.

*When using solvents, extinguish all ignition sources, including pilot lights, and follow the manufacturer's precautions and directions for use. Use solvents in accordance with local regulations.

3M™ Scotch-Weld™
Epoxy Adhesive EC-2216 B/A
 Technical Datasheet

**Typical Adhesive
 Performance
 Characteristics**

A. Typical Shear Properties on Etched Aluminum
 ASTM D 1002
 Cure: 2 hours @ 150 ± 5°F (66°C ± 2°C), 2 psi pressure

Test Temperature	Overlap Shear (psi)	
	3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive	
	EC-2216 B/A Gray	EC-2216 B/A Translucent
-423°F (-253°C)	2440	—
-320°F (-196°C)	2740	—
-100°F (-73°C)	3000	—
-67°F (-53°C)	3000	3000
75°F (24°C)	3200	1700
180°F (82°C)	400	140

—No value present.

Test Temperature	Shear Modulus (Torsion Pendulum Method)
-148°F (-100°C)	398,000 psi (2745 MPa)
-76°F (-60°C)	318,855 psi (2199 MPa)
-40°F (-40°C)	282,315 psi (1947 MPa)
32°F (0°C)	218,805 psi (1500 MPa)
75°F (24°C)	49,580 psi (342 MPa)

B. Typical T-Peel Strength
 ASTM D 1876

Test Temperature	T-Peel Strength (piw) @ 75°F (24°C)	
	3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive	
	EC-2216 B/A Gray	EC-2216 B/A Translucent
75°F (24°C)	25	25

3M™ Scotch-Weld™
Epoxy Adhesive EC-2216 B/A
 Technical Datasheet

Typical Adhesive
 Performance
 Characteristics
 (continued)

C. Overlap Shear Strength After Environmental Aging-Etched Aluminum

Environment	Time	Overlap Shear (psi) 75°F (24°C)	
		3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive	
		EC-2216 B/A Gray	EC-2216 B/A Translucent
100% Relative Humidity @ 120°F (49°C)	14 days	2950 psi	—
	30 days	1985 psi	1390 psi
	90 days	1505 psi	—
*Salt Spray @ 75°F (24°C)	14 days	2300 psi	—
	30 days	500 psi	1260 psi
	60 days	300 psi	—
Tap Water @ 75°F (24°C)	14 days	3120 psi	—
	30 days	2942 psi	1950 psi
	90 days	2075 psi	—
Air @ 160°F (71°C)	35 days	4650 psi	—
Air @ 300°F (149°C)	40 days	4930 psi	3500 psi
Anti-icing Fluid @ 75°F (24°C)	7 days	3300 psi	2500 psi
Hydraulic Oil @ 75°F (24°C)	30 days	2500 psi	2500 psi
JP-4 Fuel	30 days	2500 psi	2500 psi
Hydrocarbon Fluid	7 days	3300 psi	3000 psi

*Substrate corrosion resulted in adhesive failure.
 —No value present.

D. Heat Aging of 3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive 2216 B/A Gray
 (Cured for 7 days @ 75°F [24°C])

Overlap Shear (psi)	Time aged @ 300°F (149°C)			
	0 days	12 days	40 days	51 days
Test Temperature				
-67°F (-53°C)	2200	3310	3120	2860
75°F (24°C)	3100	5150	4930	4740
180°F (82°C)	500	1000	760	1120
350°F (177°C)	420	440	560	—

—No value present.

3M™ Scotch-Weld™
Epoxy Adhesive EC-2216 B/A
 Technical Datasheet

**Typical Adhesive
 Performance
 Characteristics**
(continued)

E. Overlap Shear Strength on Abraded Metals, Plastics, and Rubbers.

Overlap shear strengths were measured on 1" x 1/2" overlap specimens. These bonds were made individually using 1" by 4" pieces of substrate (Tested per ASTM D 1002).

The thickness of the substrates were: cold rolled, galvanized and stainless steel – 0.056-0.062", copper – 0.032", brass – 0.036", rubbers – 0.125", plastics – 0.125". All surfaces were prepared by solvent wiping/abrading/ solvent wiping.

The free crosshead speed used for testing was 0.1 in/min for metals, 2 in/min for plastics, and 20 in/min for rubbers.

Substrate	Overlap Shear (psi) @ 75°F (24°C)
	3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive
	EC-2216 B/A Gray
Aluminum/Aluminum	1850
Cold Rolled Steel/Cold Rolled Steel	1700
Stainless Steel/Stainless Steel	1900
Galvanized Steel/Galvanized Steel	1800
Copper/Copper	1050
Brass/Brass	850
Styrene Butadiene Rubber/Steel	200*
Neoprene Rubber/Steel	220*
ABS/ABS Plastic	990*
PVC/PVC, Rigid	940*
Polycarbonate/Polycarbonate	1170*
Acrylic/Acrylic	1100*
Fiber Reinforced Polyester/ Reinforced Polyester	1660*
Polyphenylene Oxide/PPO	610
PC/ABS Alloy / PC/ABS Alloy	1290

*The substrate failed during the test.

Storage

Store products at 60-80°F (16-27°C) for maximum storage life.

Shelf Life

When stored at the recommended temperatures in the original, unopened containers, the shelf life is two years from date of shipment from 3M or an authorized 3M Aerospace Distributor.

3M™ Scotch-Weld™
Epoxy Adhesive EC-2216 B/A
 Technical Datasheet

Precautionary Information Refer to Product Label and Material Safety Data Sheet for health and safety information before using this product. For additional health and safety information, please visit www.3M.com/msds or call 1-800-364-3577 or (651) 737-6501.

For Additional Information In the U.S., call toll free 1-800-235-2376, or fax 1-800-435-3082 or 651-737-2171. For U.S. Military, call 1-866-556-5714. If you are outside of the U.S., please contact your nearest 3M office or one of the following branches:

Australia 61-2-498-9711 tel 61-2-498-9710 fax	Austria 01-86686-298 tel 01-86686-229 fax	Brazil 55 19 3838-7876 tel 55 19 3838-6892 fax	Canada 800-410-6880 ext. 6018 tel 800-263-3489 fax
China 86-21-62753535 tel 86-21-62190698 fax	Denmark 45-43-480100 tel 45-43-968596 fax	France 0810-331-300 tel 30-31-6195 fax	Germany 02131-14-2344 tel 02131-14-3647 fax
Italy 02-7035-2177 tel 02-7035-2125 fax	Japan 03-3709-8245 tel 03-3709-8743 fax	Korea 02-3771-4114 tel 02-786-7429 fax	Netherlands 31-71-5-450-272 tel 31-71-5-450-280 fax
South Africa 11-922-9111 tel 11-922-2116 fax	Spain 34-91-321-6000 tel 34-91-321-6002 fax	Switzerland 01-724-9114 tel 01-724-9068 fax	United Kingdom (0) 161-237-6174 tel (0) 161-237-3371 fax

Technical Information The technical information, recommendations and other statements contained in this document are based upon tests or experience that 3M believes are reliable, but the accuracy or completeness of such information is not guaranteed.

Product Use Many factors beyond 3M's control and uniquely within user's knowledge and control can affect the use and performance of a 3M product in a particular application. Given the variety of factors that can affect the use and performance of a 3M product, user is solely responsible for evaluating the 3M product and determining whether it is fit for a particular purpose and suitable for user's method of application.

Warranty, Limited Remedy, and Disclaimer Unless an additional warranty is specifically stated on the applicable 3M product packaging or product literature, 3M warrants that each 3M product meets the applicable 3M product specification at the time 3M ships the product. 3M MAKES NO OTHER WARRANTIES OR CONDITIONS, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTY OR CONDITION OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR ANY IMPLIED WARRANTY OR CONDITION ARISING OUT OF A COURSE OF DEALING, CUSTOM OR USAGE OF TRADE. If the 3M product does not conform to this warranty, then the sole and exclusive remedy is, at 3M's option, replacement of the 3M product or refund of the purchase price.

Limitation of Liability Except where prohibited by law, 3M will not be liable for any loss or damage arising from the 3M product, whether direct, indirect, special, incidental or consequential, regardless of the legal theory asserted, including warranty, contract, negligence or strict liability.

This product was manufactured under a 3M quality system registered to AS9100 standards.



Aerospace & Aircraft Maintenance Department

3M Center, Building 223-1N-14
 St. Paul, MN 55144-1000
 1-800-235-2376
www.3M.com/aerospace

3M and Scotch-Weld are trademarks of the 3M Company.
 Oakite is a registered trademark of Chemetall, GmbH.

Please recycle. Printed in U.S.A.
 © 3M 2009 (6/09) All rights reserved.
 60-9700-0231-1

Technical Data Sheet

Anritsu envision:ensure

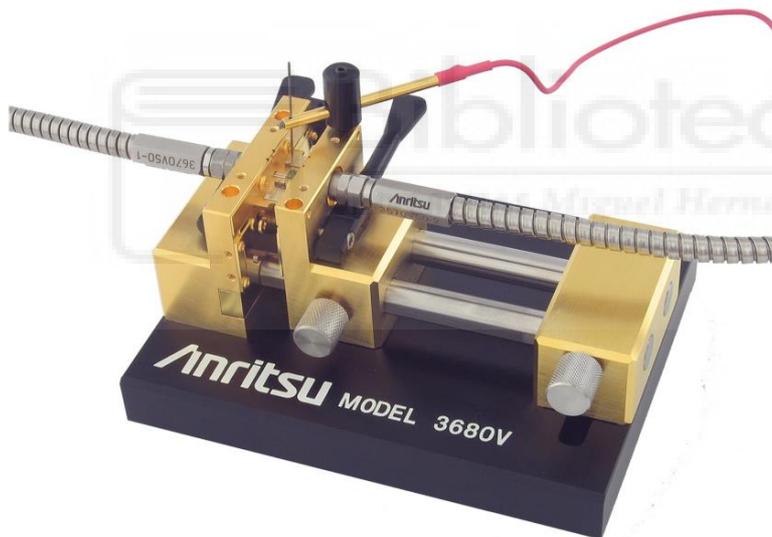
Universal Test Fixture

3680 Series

3680-20: DC to 20 GHz

3680K: DC to 40 GHz

3680V: DC to 60 GHz



Introduction

Providing substrate measurement capability for your microstrip or coplanar waveguide designs, the 3680 Series Universal Test Fixtures allow accurate, repeatable transitions from coax to microstrip or coax to coplanar waveguide (CPW). Complete substrate measurement systems comprised of a Universal Test Fixture, a vector or scalar network analyzer, and a "substrate" calibration kit can fulfill your microstrip or CPW test needs. Anritsu provides the complete measurement solution, the test fixtures, the calibration kits, and the test equipment for measurements on substrate devices. Our total system responsibility ensures compatible system components, designed to work together properly. Guaranteed system specs provide assurance that your test results are accurate and verifiable.

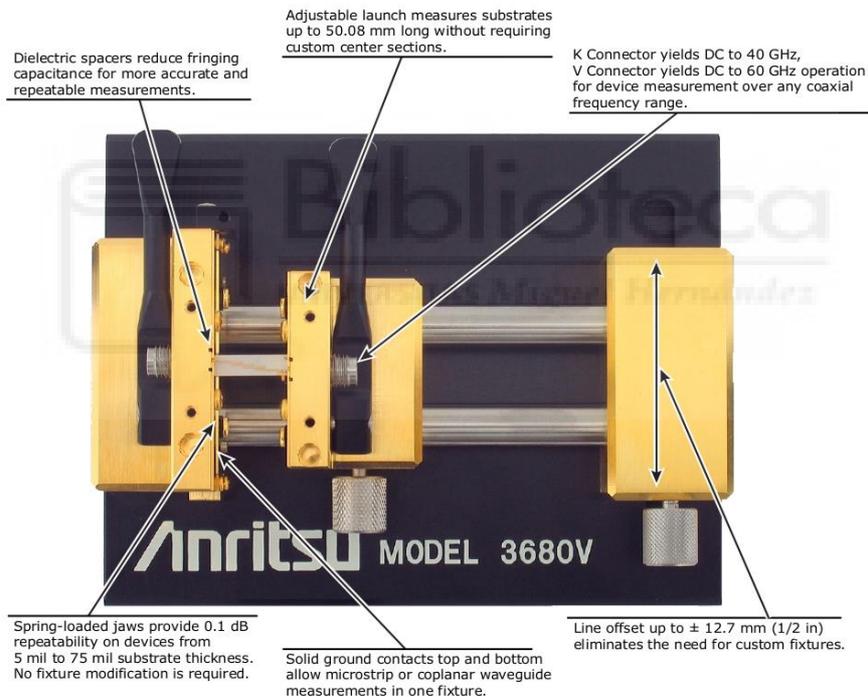
The most critical part of any substrate measurement system is the launching fixture. It must be simple yet flexible, easy to use, and most of all provide accurate, repeatable measurements. Our Universal Test Fixtures are designed to meet these requirements. Three versions of the 3680 Series Universal Test Fixture are available:

- 3680-20, DC to 20 GHz
- 3680K, DC to 40 GHz
- 3680V, DC to 60 GHz

With an Anritsu 3680 Series Universal Test Fixture, you can be sure your measurements are both accurate and repeatable.

General Features

The fixture consists of a fixed connector and a movable connector that can be positioned for substrates up to 50.08 mm (2 in) long. No center section is required. The substrate is held in place between spring loaded jaws. This allows the fixture to accommodate different devices without requiring a custom center section for each different length. The unique jaw action ensures solid, repeatable electrical contact. The jaw tension is defined by the force of a spring, independent of human judgment errors. This means the tension will always be the same, providing more repeatable measurements. Dielectric rods behind the jaws accurately position the substrate away from the launch to reduce fringing capacitance and contribute to the fixture's excellent repeatability.



Microstrip or Coplanar Waveguide Measurements

The unique design of the 3680 provides measurement capability for either microstrip or coplanar waveguide (CPW) designs. All that is required is a simple jaw change. The 3680 does the job of two fixtures, saving you time and money. A substrate measurement system with an Anritsu VNA is the only measurement system capable of directly providing microstrip dispersion compensation. Microstrip is a dispersive media - phase shift is not linear with respect to frequency. Our Vector Network Analyzer's ability to compensate for this dispersion can dramatically improve vector measurement accuracy and provide you with the most accurate vector measurements possible.

Offset Measurements

With a 3680 based substrate measurement system, there is not need to force your designs into a straight line or leave your designs untested. The 3680 has the ability to offset lines by as much as $\pm\frac{1}{2}$ inch. Many designs, such as filters, require parallel traces that are offset. In the past, designers were forced to add extra line lengths, create custom fixtures, or worse, not test offset designs. With the flexibility of the 3680, you can test offset or in-line designs with one setup. Formerly untestable designs can now be tested with ease.

Right-Angle Measurements

Testing designs with right-angle connections is made easy. The optional right-angle launcher adds a connection at 90° to the fixture. This lets you test devices with right-angle connections with precision and repeatability corresponding to an in-line measurement. The fixture is designed to fit your device; you don't have to design your device to fit the fixture. The right-angle launcher also provides another benefit - the ability to test multiport devices. With the addition of right-angle launchers, the 3680 can become a three port, or even four port launching fixture. An Anritsu VNA based microstrip measurement system with optional dual source control can interdependently control up to two sources and a receiver, for testing mixers or other frequency conversion devices. Now a microstrip or CPW mixer, converter, or other device can be tested, with the same convenience as a packaged device.

60 GHz Measurements

Anritsu was the first manufacturer to offer a coaxial VNA with continuous 0.04 GHz to 60 GHz measurement capability. With the 3680 Series Universal Test Fixtures, that measurement capability is extended onto the substrate. An Anritsu VNA based substrate measurement system is capable of measurements from 70 kHz to 60 GHz in one setup. And the optional 60 GHz time domain capability provides time or distance measurements with unsurpassed resolution. Discontinuities as close as 1.2 mm on alumina can be resolved. You can measure devices whose performance could previously only be theorized. The 3680V, thanks to the patented V Connector, has excellent return loss and insertion loss from DC to 60 GHz. In a substrate measurement system, that translates to improved accuracy and repeatability, for more accurate characterization of your microstrip or CPW designs.

Bias Capability

For active device measurements, the 3680 has bias capability either through the RF connection or through a bias probe. With optional multiple bias probes, you can inject bias into any point on your device under test. The bias probe provides infinite placement resolution and eliminates the need for external bias hardware. Alternately, if your active device is biased through an RF connection, bias tees can be used to combine bias and RF at any launch point. The 3680's flexible bias injection eliminates the need for multiple fixtures, saving you time and money. Up to four bias probes can be accommodated.

MMIC Measurements

With the optional MMIC attachment, you can test MMICs and very small components as conveniently as other devices. A MMIC attachment consists of a center carrier, with microstrip lines for launching, and cam-operated pressure rods. The MMIC component is placed on the center carrier between microstrip lines. (Machinable center carrier blocks are available for your custom designs.) Contact with the component is made with spring tabs, for reliability and damage protection. The unique design of the MMIC attachment assures solid, repeatable measurements on any small device. An Anritsu substrate measurement system can fulfill all your substrate measurement needs including, with a MMIC attachment, very small substrates and MMICs.

Calibration/Verification Kits

A full complement of calibration kits for microstrip or coplanar waveguide are available. Standard Open Short Load (OSL) and Line Reflect Line (LRL) calibration components are included. The substrates for these cal kits are carefully selected for proper impedance and consistency, to provide the most accurate measurements possible. Included with every cal kit is a Beatty standard (standard mismatch) and a 20 dB offset termination. Now you can verify, in the fixture, the quality of your calibrations. This verification ensures the validity of your device measurements.

Mechanical Specifications

3680 Series Universal Test Fixture

Substrate Types Supported	Microstrip or Coplanar Waveguide
Overall Size (WxLxH)	3680-20: 4.9 x 7 x 2.5 in (12.4 x 17.8 x 6.4 cm) 3680K and 3680V: 4 x 5 x 2.5 in (10.2 x 12.7 x 6.4 cm)
Substrate Length	3680-20: 0.2 in (0.5 cm) minimum, 4.0 in (10 cm) maximum 3680K and 3680V: 0.2 in (0.5 cm) minimum, 2.0 in (5 cm) maximum
Substrate Width	No limit on maximum width, 0.05 in (1.2 mm) minimum
Substrate Thickness	0.005 in (0.12 mm) minimum 0.075 in (1.9 mm) maximum
Line Offset	3680-20: ±1.0 in (2.5 cm) maximum 3680K and 3680V: ±0.5 in (1.2 cm) maximum
Input and Output Connectors	3680-20: 3.5 mm Female 3680K: K Connector Female 3680V: V Connector Female

36801 K and V Right-Angle Launcher

Distance from In-Line Connector, Axial	0.4 in (1 cm) minimum 1.7 in (4.3 cm) maximum
Distance from In-Line Connector, Offset	0.0 in minimum 1.0 in (2.54 cm) maximum

36802 MMIC Attachment

Substrate Thickness	Mounting blocks for 0.010, 0.015, or 0.025 inch substrates are supplied with the appropriate 36805 series launchers. (Mounting blocks can be modified for other thicknesses.)
Test Substrate Length	0.05 in (0.12 cm) minimum 0.46 in (1.17 cm) maximum
Line Offset	±0.5 in (1.2 cm) maximum

Electrical Specifications (all specifications typical)

Model	Universal Test Fixture			Right-Angle Launcher		MMIC Attachment
	3680-20	3680K	3680V	36801K	36801V	36802
Frequency Range (GHz)	DC to 20	DC to 40	DC to 60	DC to 40	DC to 60	DC to 60
Return Loss (Coax Calibration, dB)						
0.04 GHz to 20 GHz	> 17	> 17	> 17	> 16	> 16	> 12
20 GHz to 40 GHz		> 14	> 14	> 12	> 12	> 8
40 GHz to 60 GHz			> 8		> 7	> 6
Repeatability of Insertion Loss (dB)						
0.04 GHz to 20 GHz	< ±0.10	< ±0.10	< ±0.10	< ±0.15	< ±0.15	< ±0.20
20 GHz to 40 GHz		< ±0.20	< ±0.20	< ±0.25	< ±0.25	< ±0.40
40 GHz to 60 GHz			< ±0.30		< ±0.40	< ±0.60

Test Port Characteristics (When used with an Anritsu Vector Network Analyzer)

Test port characteristics apply after optimum 12-term calibration using an Anritsu 36804 calibration kit.

- 36804B-10M (0.04 to 50 GHz)
- 36804B-15M (0.04 to 30 GHz)
- 36804B-25M (0.04 to 15 GHz)
- 36804-25C (0.04 to 20 GHz)

Frequency (GHz)	Directivity (dB)	Source Match (dB)	Load Match (dB)
0.04	> 28	> 24	> 28
2.0	> 34	> 32	> 34
20	> 28	> 32	> 28
30	> 28	> 26	> 28
40	> 28	> 26	> 28
50	> 26	> 22	> 26

ANEXO D: CÓDIGO DE MATLAB EMPLEADO PARA LAS SIMULACIONES

```
close all, clear all, clc

c=3e8; %Velocidad de la luz en el vacío (m/s^2)
Z0=50; %Impedancia característica de la línea

epsr=2.1; %Constante dieléctrica del sustrato
W=1.3e-3; %Anchura pista (en metros)
T=8.61e-3; %Periodo del sustrato (en metros)
N=9.25; %Número de periodos
linout=2e-3;%Longitud del tramo de entrada y salida de
50 ohm (en metros)

paso=T/100; %Paso
%l=0:paso:(N*T)+2*linout;
l1=0:paso:linout; %Longitud tramo de entrada
l2=linout+paso:paso:N*T; %Longitud tramo perfil
sinusoidal
l3=N*T+paso:paso:N*T+linout;%Longitud tramo de salida
l=[l1 l2 l3]; %Vector de longitudes del
sustrato

%Perfil de alturas del sustrato (en metros)
d=[0.62e-3*ones(size(l1)) (1.6+1.0*sin(2*pi*l2/T-
pi*0.9))*1e-3 0.62e-3*ones(size(l3))];
W=1.3e-3*ones(size(d));
epseff=(epsr+1)/2+(epsr-1)/2./(sqrt(1+12*d./W));
%Constante dieléctrica efectiva

Zc=zeros(size(l));

%Cálculo de la impedancia característica en cada punto
de la línea según la altura del sustrato
for con=1:length(Zc)
    if W(con)/d(con) <= 1
        %Expresión de la impedancia característica
según la anchura de la línea y la altura del sustrato

Zc(con)=60/sqrt(epseff(con))*log(8*d(con)/W(con)+W(con)
)/4/d(con));
    else

Zc(con)=120*pi/sqrt(epseff(con))/(W(con)/d(con)+1.393+
0.667*log(W(con)/d(con)+1.444));
    end
end
end
```

```

f=0:0.01:10; %Rango de frecuencias a representar
f=f*1e9;      %Rango de frecuencias en GHz

Z_in=Z0*ones(size(f));

%Cálculo de la impedancia característica de entrada
para cada frecuencia
for conf=1:length(f) %es necesario emplear un doble
bucle 'for' uno para recorrer el vector de frecuencias
    Z_sec=Z0;
    for conl=1:length(l)-1 %Bucle para recorrer los
segmentos en que se divide la línea y obtener la
impedancia de entrada

Z_sec=Zc(conl)*(Z_sec+1i*Zc(conl)*tan(2*pi*f(conf)*eps
eff(conl)/c*paso))./(Zc(conl)+1i*Z_sec.*tan(2*pi*f(con
f)*epseff(conl)/c*paso));
    end
    Z_in(conf)=Z_sec;
end

%Cálculo de los Parámetros S
s11=(abs((Z_in-Z0)./(Z_in+Z0)));
s21=1-s11.^2; %ojo esto es s21^2=1-s11^2
s11=20*log10(s11);
s21=10*log10(abs(s21));

figure(1)
%Representación de la altura del sustrato según la
distancia
subplot(3,1,1);plot(l,d*1e3,'linewidth',2);
title('(a)');
h=gca;
set(h,'FontSize',14);
% xlabel('Distancia (m)','FontSize',14);
ylabel('Altura sustrato (mm)','FontSize',14);

%Representación de la permitividad dielectrica
efectiva relativa según la distancia
subplot(3,1,2);plot(l,epseff,'linewidth',2);
title('(b)');
h=gca;
set(h,'FontSize',14);
% xlabel('Distancia (m)','FontSize',14);
ylabel('\epsilon_{reff}','FontSize',18);

%Representación de la impedancia característica de la
línea según la distancia

```

```

subplot(3,1,3);plot(1,Zc,'linewidth',2);
title(' (c) ');
h=gca;
set(h,'FontSize',14);
xlabel('Distancia (m)','FontSize',14);
ylabel('Z_{0} (\Omega)','FontSize',14);

figure(2)
%Representación de los parámetros S11 y S21 según la
frecuencia
plot(f/1e9,s11,'linewidth',1.5);
hold on;
plot(f/1e9,s21,'linewidth',1.5);
axis([0 max(f)/1e9 -50 0]);
h=gca;
set(h,'FontSize',14);
xlabel('Frecuencia (GHz)','FontSize',14);
ylabel('S_{11} , S_{21} (dB)','FontSize',14);
legend('S_{11}','S_{21}','Location','southeast')

%Adjuntamos los datos obtenidos de la medición
mediante el VNA
EMS=sparameters('line_sine.s2p');
f=EMS.Frequencies/1e9;
%Cálculo de los Parámetros S
s11=rfparam(EMS,1,1);
s11=10*log10((real(s11)).^2+(imag(s11)).^2);
s21=rfparam(EMS,2,1);
s21=10*log10((real(s21)).^2+(imag(s21)).^2);

%Representación de los parámetros S11 y S21 medidos
plot(f,s11,':','linewidth',2);
hold on;
plot(f,s21,':','linewidth',2);
legend('S_{11}','S_{21}','S_{11}','S_{21}','Location',
'southeast')
% warning off

```

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Breve Historia de la impresión 3D,» Impresoras3D.com, 1 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>. [Último acceso: 18 Abril 2021].
- [2] «La Historia de la impresión 3D,» bitfab, [En línea]. Available: https://bitfab.io/es/blog/historia-impresion-3d/#Las_primeras_maquinas_comerciales_de_impresion_en_3D. [Último acceso: 18 Abril 2021].
- [3] «Los 11 tipos de impresoras,» ALL3DP, [En línea]. Available: <https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>. [Último acceso: 17 Abril 2021].
- [4] EDDM, «Las ventajas de la impresión FDM multimaterial,» Ingenius, 13 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://eddm.es/blog-ingenius/fdm-multimaterial/>. [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [5] Impresoras3D.com, «Guía definitiva sobre tipos de filamentos 3D,» 1 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.impresoras3d.com/la-guia-definitiva-sobre-los-distintos-filamentos-para-impresoras-3d>. [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [6] ABAX, «PLA y PETG: características, diferencias y aplicaciones,» [En línea]. Available: <https://abax3dtech.com/2020/12/15/pla-y-petg-caracteristicas-diferencias-y-aplicaciones>. [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [7] «Filamento TPU,» Tractus3D, [En línea]. Available: <https://tractus3d.com/es/materials/tpu>. [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [8] tresdorinttech, «Materiales de impresión 3D: ABS y PLA,» [En línea]. Available: <https://tresdprinttech.com/content/9-servicio-de-impresion-3D>. [Último acceso: 20 Abril 2021].
- [9] s. Sanmetal, «Nylon-Poliamida 6,» [En línea]. Available: <http://www.sanmetal.es/productos/termoplasticos/nylon-poliamida-6/9>. [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [10] Resinex, «PA11,» Arkema, [En línea]. Available: <https://www.resinex.es/productos/rilsan.html>. [Último acceso: 20 Abril 2021].

- [11] Ensinger, «TECAMID 12 natural,» [En línea]. Available: <https://www.ensingerplastics.com/es-es/semielaborados/plastico/pa12-tecamid-12-natural>. [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [12] filament2print, «PA12 Smooth-Nylon 12 powder,» [En línea]. Available: <https://filament2print.com/gb/powders/1085-pa12-smooth-nylon-powder.html>. [Último acceso: 20 Abril 2021].
- [13] 3. SYSTEMS, «Sinterización selectiva por láser,» [En línea]. Available: <https://es.3dsystems.com/resources/information-guides/selective-laser-sintering/sls>. [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [14] Filament2print, «Tipos y aplicaciones de resinas para impresoras 3D,» 23 Octubre 2019. [En línea]. Available: https://filament2print.com/es/blog/73_tipos-aplicaciones-resinas-impresoras-3d.html. [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [15] Ingenius, «Estereolitografía (SLA),» EDDM, 23 Julio 2017. [En línea]. Available: <https://eddm.es/blog-ingenius/estereolitografia-sla/>. [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [16] 3Dneword, «La guía de impresión de estereolitografía (SLA) en 3D,» 2 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://3dneworld.com/la-guia-de-impresion-de-estereolitografia-sla-en-3d/>. [Último acceso: 19 Abril 2021].
- [17] «ELEGOO MARS PRO MSLA 3D PRINTER,» ELEGOO, [En línea]. Available: <https://www.elegoo.com/collections/mars-series/products/elegoo-mars-pro-lcd-3d-printer>. [Último acceso: 15 Abril 2021].
- [18] I. y. Tecnología, «Impresoras 3D por tecnología DLP,» 2 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/impresoras-3d-tecnologia-dlp/>. [Último acceso: 20 Abril 2021].
- [19] filament2print, «Impresoras 3D de Resina: SLA, DLP y LED-LCD,» 10 Septiembre 2020. [En línea]. Available: https://filament2print.com/es/blog/99_impresoras-3d-resina-SLA-DLP-LED-LCD.html. [Último acceso: 20 Abril 2021].
- [20] Anritsu, «3680 Series Universal Test Fixture Operation and Maintenance Manual,» Anritsu Company, 2019.
- [21] Héctor Gracia Martínez, Ernesto Ávila Navarro, Germán Torregrosa Penalva, Alberto Rodríguez Martínez, Carolina Blanco Angulo and Miguel A. de la Casa

- Lillo, «Low-Cost Additive Manufacturing Techniques Applied to the Design of Planar Microwave Circuits by Fused Deposition Modeling,» *MDPI*, 2020.
- [22] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons Inc., 2012.
- [23] L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan and V. K. Varadan, *Microwave Electronics. Measurement and Material Characterization*, John Wiley & Sons Inc., 2004.
- [24] «User's Guide- High Frequency Structure Simulator,» Ansoft Corporation, 2005.
- [25] F. Martín, *Artificial Transmission Lines for RF and Microwave Applications*, Wiley, 2015.
- [26] 3DJAKE, «Resina azul Oscuro,» 3DJAKE, [En línea]. Available: <https://www.3djake.es/3djake/resina-azul-oscur0>. [Último acceso: 15 Abril 2021].
- [27] 3DJAKE, «Cresin Cleaner,» 3DJAKE, [En línea]. Available: <https://www.3djake.es/3djake/resin-cleaner-1>. [Último acceso: 15 Abril 2021].
- [28] Jimmy Hester, Evan Nguyen, Jesse Tice and Vesna Radisic, «A Novel 3D-Printing- Enabled "Roller Coaster" Transmission Line,» Northrop Grumman Corporation, 2017.
- [29] «Guía definitiva sobre impresión 3D por estereolitografía (SLA),» formlabs, [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/>. [Último acceso: 17 Abril 2021].
- [30] «Buenas prácticas de orientación de modelos para la impresión por SLA,» formlabs, [En línea]. Available: <https://support.formlabs.com/s/article/Model-Orientation?language=es#base-selection>. [Último acceso: 18 Abril 2021].
- [31] «Fabricación aditiva vs Impresión 3D,» mizar alcor group, 20 Julio 2016. [En línea]. Available: <https://mizaradditive.com/impresion-3d/>. [Último acceso: 18 Abril 2021].
- [32] Anritsu, «Universal Test Fixtures 3680 Series,» [En línea]. Available: <https://www.anritsu.com/en-us/components-accessories/products/3680-series>. [Último acceso: 20 Abril 2021].