

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN



UNIVERSITAS
Miguel Hernández

"DISEÑO Y FABRICACIÓN DE
CIRCUITOS PASIVOS DE
MICROONDAS CON GEOMETRÍA
COMPLEJA MEDIANTE TÉCNICAS
DE IMPRESIÓN 3D"

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre-2021

AUTOR: Federico Linares Lucas

DIRECTOR/ES: Héctor García Martínez

RESUMEN

En este trabajo final de grado se implementarán circuitos pasivos de microondas mediante estructuras periódicas utilizando una impresora 3D de bajo coste. En primer lugar, se realizará el estudio de la estructura periódica generando una banda de rechazo a una frecuencia determinada. Una vez realizado el diseño teórico de la estructura periódica, se realizará la simulación de la misma con los softwares de simulación ADS y EMPro, combinando dos materiales con distinta ϵ_r y modificando la altura del sustrato. Finalmente, diseñaremos y fabricaremos dos filtros típicos de microondas mejorando las características de los mismos mediante la utilización de las estructuras periódicas y la impresión 3D.

Palabras clave: impresión 3D, modelado por disposición fundida, fabricación de circuitos de microondas.



ABSTRACT

In this final grade work, passive microwave circuits will be implemented through periodic structures using a low-cost 3D printer. First, the periodic structure will be studied, generating a frequency rejection band. Once the theoretical design of the periodic structure has been carried out, it will be simulated with the simulation software ADS and EMPro, combining two materials with different ϵ_r and modifying the height of the substrate. Finally, we will design and manufacture two typical microwave filters improving their characteristics by using the periodic structures and 3D printing.

Key words: 3D printing, fused deposition modeling, manufacture of microwave circuits.



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi tutor, Héctor García por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto y por su implicación y paciencia, así como por las muestras de ánimo en momentos difíciles durante la realización del trabajo.

Dar las gracias a mi familia, en particular a mis padres y a mi hermana por todos los ánimos que me han dado y el esfuerzo que han realizado por mí.

Gracias a todos mis amigos y amigas por todo el apoyo que me han dado siempre y por darme el tiempo de desconexión necesario cuando lo necesitaba.

Por último, no me quiero olvidar de cada uno de los compañeros que me han acompañado en esta etapa de mi vida.

A todos ellos, gracias.



CONTENIDO

RESUMEN	3
ABSTRACT	5
AGRADECIMIENTOS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	12
ÍNDICE DE GRÁFICAS	14
LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	16
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1 HISTORIA DE LA IMPRESIÓN 3D.....	7
2.2 TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D.....	9
2.2.1 FDM Modelado por disposición fundida	10
2.2.2 SLA Estereolitografía.....	16
2.2.3 DLP, Procesamiento Digital de Luz.....	18
2.2.4 MSLA, SLA Enmascarado o DLP LCD	19
2.2.5 MPL Litografía multifotónica	19
2.2.6 CLIP Producción Continua de Interfaz Líquida.....	19
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1 IMPRESORA 3D.....	21
3.2 FILAMENTO UTILIZADO PARA LA IMPRESIÓN.	22
3.3 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	22
3.4 PROGRAMAS SOFTWARE	23
3.4.1 Matlab.....	23
3.4.2 ADS.....	24
3.4.3 EMPro	25

3.4.4 Cura 3D, división en capas de la pieza Slicer	26
3.5 PROCESO DE CALIBRADO Y MANTENIMIENTO DE LA IMPRESORA 3D	27
3.6 INTRODUCCIÓN A LAS ESTRUCTURAS PERIÓDICAS.....	28
CAPÍTULO 4. PRUEBAS PRELIMINARES CON ESTRUCTURAS PERIÓDICAS BÁSICAS.....	31
4.1 DISEÑO DE CIRCUITO DE TEST VARIANDO ϵ_r DEL MATERIAL	31
4.1.1 Diseño en Matlab	31
4.1.2 Diseño en ADS.....	33
4.1.3 Diseño EMPro	36
4.2 DISEÑO DE CIRCUITO DE TEST VARIANDO LA ALTURA DEL MATERIAL.....	37
4.2.1 Diseño en Matlab	37
4.2.2 Diseño en ADS.....	39
4.2.3 Diseño EMPro	41
4.2.4 Proceso de fabricación de la pieza de impresión 3D.....	43
4.2.5 Medidas del dispositivo fabricado.....	44
CAPÍTULO 5. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE CIRCUITOS PASIVOS DE MICROONDAS EN UN SUBSTRATO CON GEOMETRÍA PERIÓDICA	49
5.1 FILTRO PASO BAJO	49
5.1.1 Diseño teórico	49
5.1.2 Diseño en ADS.....	50
5.1.3 Diseño en EMPro	55
5.1.4 Proceso de fabricación y medidas	57
5.2 FILTRO PASO BANDA	58
5.2.1 Diseño teórico	58
5.2.2 Diseño en ADS.....	60
5.2.3 Diseño en EMPro	66

5.2.4 Proceso de fabricación del filtro paso banda.....	67
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	73
6.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO	73
6.2 LÍNEAS FUTURAS	74
ANEXOS.	75
ANEXO A: CÓDIGO DE MATLAB UTILIZADO PARA LAS SIMULACIONES.	75
ANEXO B: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DEL ADHESIVO EPOXI.....	77
ANEXO C: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DEL SPRAY	86
ANEXO D: PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA PERIÓDICA	94
BIBLIOGRAFÍA	98



ÍNDICE DE FIGURAS

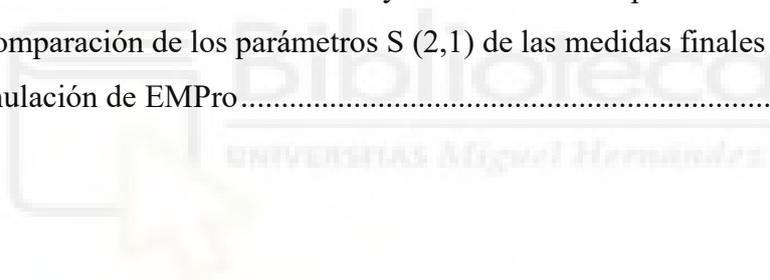
Figura 1: (a) Implante productor de insulina para la diabetes tipo 1 [2]. Figura 1: (b) Modelo corazón de un niño de 9 años [24].	2
Figura 1: (c) Prótesis de mano [25] Figura 1: (d) Modelo dental [26]	2
Figura 2: Casa impresa en 3D edificada en Eindhoven, Países Bajos.	2
Figura 3: Filetes impresos en 3D.	3
Figura 4: Bicicleta impresa en 3D, denominada Waldwiesel.	3
Figura 5: Modelo de guía de onda	4
Figura 6: Impresora prusa i3 [16]	11
Figura 7: Impresora 3D System Cube [17]	11
Figura 8: Impresora 3D XYZPrinting [18]	12
Figura 9: Impresora 3D FLSUN QQ-S [19]	13
Figura 10: Impresora Polar 3D [20]	13
Figura 11: Impresora 3D de tipo cinta transportadora [21]	14
Figura 12: Pieza 3D impresa con material soluble [28].	14
Figura 13: Esquema de componentes en SLA [14].	17
Figura 14: Impresora 3D basada en la técnica de SLA [15]	18
Figura 15: Impresora Bq Hephestos	21
Figura 16: Bobina de PLA de color azul	22
Figura 17: Analizador vectorial de redes.	23
Figura 18: Ejemplo de modelo circuital en ADS	25
Figura 19: Espacio de trabajo en EMPro	26
Figura 20: Espacio de trabajo en Cura 3D	26
Figura 21: Diseño de antena en tecnología EBG de alta directividad [23]	29
Figura 22: (a) Filtro líneas acopladas clásico. (b) Filtro siguiendo ley senoidal [29].	29
Figura 23: Diseño en ADS de circuito de test con variación de la ϵ_r .	35
Figura 24: Diseño en EMPro del circuito de test con variación de la ϵ_r .	36
Figura 25: Diseño en ADS de circuito de test con cambio de altura.	40
Figura 26: Diseño en EMPro del circuito de test con cambio de altura (A).	41
Figura 27: Diseño en EMPro del circuito de test con cambio de altura (B).	41
Figura 28: Diseño en Cura del circuito de test con cambio de altura (A)	44
Figura 29: Diseño en Cura del circuito de test con cambio de altura (B)	44
Figura 30: (a) Diseño final con cambio de altura. (b) Cara bottom.	45

Figura 31: Diseño filtro paso bajo en ADS con líneas ideales	51
Figura 32: Diseño filtro paso bajo en ADS con líneas reales	52
Figura 33: Diseño banda de rechazo a 5GHz en ADS	54
Figura 34: Diseño en ADS de banda de rechazo en serie con filtro paso bajo.....	54
Figura 35: Diseño en EMPro del filtro paso bajo con cambio de altura	56
Figura 36: (a) Diseño final circuito paso bajo. (b) Diseño final circuito paso bajo cara bottom.....	57
Figura 37: Diseño filtro paso banda en ADS con líneas ideales	60
Figura 38: Diseño filtro paso banda en ADS con líneas reales	61
Figura 39: Diseño en ADS de la banda de rechazo a 5GHz.....	62
Figura 40: Diseño en ADS de la banda de rechazo a 5GHz en serie con el filtro paso banda.....	63
Figura 41: Diseño en ADS de la banda de rechazo a 4GHz.....	64
Figura 42: Diseño en ADS de la banda de rechazo a 4GHz en serie con el filtro paso banda.....	64
Figura 43: Diseño en EMPro del filtro paso banda con cambio de altura.....	66
Figura 44: Filtro paso banda impreso por la impresora 3D.....	67
Figura 45: Spray 843AR-340G de MG Chemicals	67
Figura 46: Metalización filtro paso banda.....	68
Figura 47: Metalización filtro paso banda utilizando el proceso de galvanoplastia.....	69
Figura 48: Metalización filtro paso banda tras su paso por el agitador.....	70
Figura 49: Fresado del filtro paso banda	70
Figura 50: Filtro final fabricado	71
Figura 51: Adhesivo epoxi Scotch-Weld EC-2216 gray de 3M.....	94
Figura 52: Pieza diseñada por la impresora 3D con cambio de altura	95
Figura 53: Proceso de metalización circuito paso bajo	95
Figura 54: Fresado del circuito paso bajo.....	96

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Parámetros S combinando dos materiales con distinta ϵ_r	32
Gráfica 2: Señal cuadrada que representa el cambio de impedancia necesario para obtener el cambio de ϵ_r	33
Gráfica 3: Simulación en ADS del circuito de test con variación de la ϵ_r	35
Gráfica 4: Simulación de EMPro pasada a ADS del circuito de test con variación de la ϵ_r	36
Gráfica 5: Señal cuadrada que representa el cambio de impedancia necesario para obtener el cambio de altura.....	38
Gráfica 6: Parámetros S combinando dos alturas distintas.....	39
Gráfica 7: Simulación en ADS del circuito de test con cambio de altura	40
Gráfica 8: Simulación de EMPro pasada a ADS del circuito de test cambiando altura. 42	
Gráfica 9: Comparación de los parámetros S(1,1) del modelo circuital con la simulación de EMPro.....	42
Gráfica 10: Comparación de los parámetros S(2,1) del modelo circuital con la simulación de EMPro	43
Gráfica 11: Comparación de los parámetros S (1,1) del diseño final con cambio de altura	46
Gráfica 12: Comparación de los parámetros S (1,1) del diseño final con cambio de altura	46
Gráfica 13: Simulación de parámetro S(2,1) del diseño del filtro paso bajo en ADS con líneas ideales.....	51
Gráfica 14: Simulación del parámetro S (2,1) del diseño filtro paso bajo en ADS con líneas reales.....	52
Gráfica 15: Señal cuadrada que representa el cambio de impedancia necesario para obtener el cambio de altura de la estructura periódica	53
Gráfica 16: Banda de rechazo generada en Matlab para el filtro paso bajo	53
Gráfica 17: Banda de rechazo generada en ADS para el filtro paso bajo	54
Gráfica 18: Gráfica en ADS del para metro S (2,1) con la banda de rechazo en serie con filtro paso bajo	55
Gráfica 19: Comparación filtro paso bajo con estructura periódica y sin estructura periódica	55
Gráfica 20: Simulación del parámetro S (2,1) en EMPro del filtro implementado	56

Gráfica 21: Gráfica en ADS de los parámetros S (2,1) y S (1,1) obtenidos de las medidas realizadas al circuito paso bajo final.	57
Gráfica 22: Comparación en ADS de los parámetros S (2,1) de las medidas del filtro final y la simulación de EMPro	58
Gráfica 23. Parámetro S (2,1) del diseño filtro paso banda en ADS con líneas ideales. 60	
Gráfica 24. Parámetro S (2,1) del diseño filtro paso banda en ADS con líneas reales. .	61
Gráfica 25: Parámetros S del diseño de la banda de rechazo a 5GHz.....	62
Gráfica 26: Comparación parámetros S (2,1) del filtro paso banda con el filtro paso banda en serie con la banda de rechazo a 5GHz.....	63
Gráfica 27: Parámetro S (2,1) del diseño de la banda de rechazo a 4GHz.....	64
Gráfica 28: Comparación parámetros S (2,1) del filtro paso banda con el filtro paso banda en serie con la banda de rechazo a 4 GHz.....	65
Gráfica 29: Comparación de los parámetros S (2,1) de los tres diseños paso banda	65
Gráfica 30: Parámetro S (2,1) del diseño en EMPro del filtro paso banda	66
Gráfica 31: Parámetros S finales del diseño y fabricación filtro paso banda	71
Gráfica 32: Comparación de los parámetros S (2,1) de las medidas finales del filtro paso banda y la simulación de EMPro	72



LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

A

ABS Acrylonitrile Butadiene Styrene

ADS Advanced Design System

C

CNRS Centro Nacional de Investigación Científica de Francia

CLIP Producción continua de Interfaz Líquida

Cm centímetros,

°C grados Celsius

CAD Diseño Asistido por Computadora

D

DLP Procesamiento Digital de Luz

dB Decibelio

E

EMPro PathWave EM Design

EM Electromagnética

EBG Electromagnetic Band Gap

F

FDM Modelado por deposición fundida

G

GHz Gigahercio

H

H altura

I

Impresora 3D Impresora 3 Dimensiones

L

LCD Liquid Crystal Display

L Longitud

M

MIT Instituto Tecnológico de Massachusetts

MSLA Estereolitografía enmascarada

MPL Litografía Multifotónica

Micra micrómetro

Mm/s milímetro por segundo

MLIN Microstrip Line

MLOC Microstrip Open-Circuited Stub

MCLIN Microstrip Coupled Lines

O

Ohm Ohmio

P

PLA Polylactic Acid

PET Tereftalato de Polietileno

R

Rep-Rap Replicating Rapid-Prototypers

S

SLA estereolitografía

SLS Selective Laser Sinteting

STL Stereo Litography

T

TPU Poliuretano termoplástico

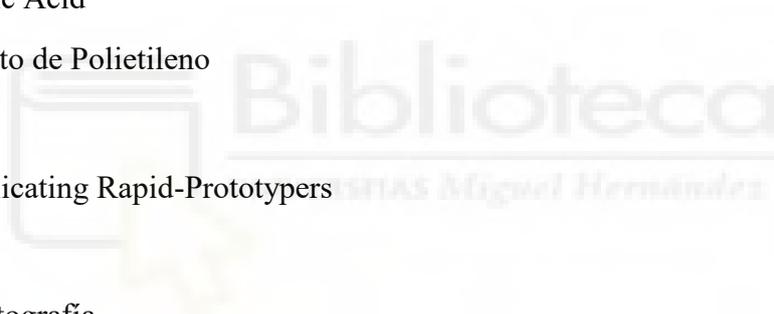
TLIN Terminal Transmission Line

U

UV Ultravioleta

W

W ancho



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En estos últimos años la impresión 3D ha crecido mucho y se ha popularizado entre diversos sectores tecnológicos, utilizando técnicas y métodos que nos permiten fabricar piezas únicas y con geometrías complejas que no se pueden implementar utilizando tecnologías tradicionales de mecanizado y con coste muy reducido.

La impresión 3D, también es conocida como fabricación aditiva y está basada en la superposición de capas de un material determinado. Es un proceso en el cual creamos un objeto físico en tres dimensiones a través de un modelo digital utilizando materiales como son el PLA (Polylactic Acid) y ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), entre otros, la elección dependerá de las propiedades físicas y mecánicas que estemos buscando para una determinada aplicación.

Las impresoras 3D actuales pueden producir objetos a todo color a partir de más de 250 materiales diferentes, incluyendo metales, plásticos, cerámica, vidrio, caucho, cuero, células madre e incluso chocolate y otros alimentos. Recientemente, los innovadores métodos de estereolitografía han logrado producir formas complejas a una velocidad hasta 100 veces más rápido que una impresora tradicional.

Más allá de una producción rápida y de alta resolución, la impresión 3D avecina unos costes económicos y medioambientales prometedores, ya que elimina enormes cantidades de residuos como consecuencia de la reducción, hasta en un 90%, de los requisitos de materia prima. [1]

Las aplicaciones que puede ofrecer la impresión 3D en los distintos sectores tecnológicos pueden ser ilimitadas. Anteriormente la fabricación aditiva sólo se centró en la creación rápida de prototipos, pero hoy en día la tecnología aditiva se utiliza para diferentes aplicaciones como los aviones, automóviles, biomedicina, satélites, la construcción, el arte e incluso piezas de joyería.

En el mundo de la medicina, la impresión 3D puede ser explotada para fabricar estructuras anatómicas, prótesis, implantes, piezas dentales, etc, tal y como podemos ver en la figura 1.



Figura 1: (a) Implante productor de insulina para la diabetes tipo 1 [2].



Figura 1: (b) Modelo corazón de un niño de 9 años [24].



Figura 1: (c) Prótesis de mano [25]



Figura 1: (d) Modelo dental [26]

Dentro del sector de la construcción la impresión 3D está consiguiendo que sea más rápida, más barata, eficiente y segura, construyendo barrios impresos en 3D sostenibles y asequibles. Las casas impresas en 3D aparecieron por primera vez en Eindhoven (Holanda) (como se muestra en la figura 2), donde la escasez de albañiles provocó un aumento de la demanda de esta tecnología [3].



Figura 2: Casa impresa en 3D edificada en Eindhoven, Países Bajos.

En el ámbito de la cocina la impresión 3D también está siendo utilizada por ejemplo para realizar deliciosos filetes (figura 3) y hamburguesas impresas en 3D. Esta carne utiliza

proteínas vegetales que proporcionarán una solución más sostenible para alimentar a la creciente población mundial. La empresa israelí Chef-it y NovaMeat, de Giuseppe Scionti, ya están avanzando en reducir los costes de fabricación, se espera que en cinco años estos costes bajen y se mejore la textura de los alimentos [4].



Figura 3: Filetes impresos en 3D.

La impresión 3D también está muy presente en el mundo del deporte, empresas como Urwahn Bikes están fabricando algunas de sus bicicletas con la ayuda la impresión 3D. Esta empresa alemana ha creado una bicicleta eléctrica que combina la fabricación artesanal con la utilización de tubos impresos en 3D (figura 4) [5].



Figura 4: Bicicleta impresa en 3D, denominada Waldwiesel.

Dentro del sector de las microondas la impresión 3D también ha tenido un gran impacto, ya que permite crear circuitos electrónicos con diferentes características eléctricas y con las formas geométricas que el ingeniero de radiofrecuencia desee. Por ejemplo, podemos diseñar modelos de guías de onda personalizados a nuestro criterio, tal y como se muestra en la figura 5.

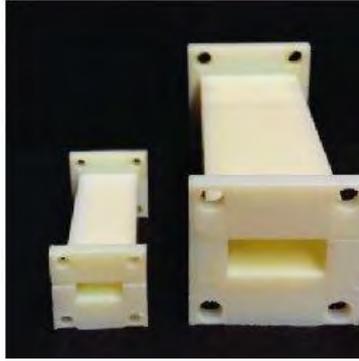


Figura 5: Modelo de guía de onda

1.1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

La motivación de este trabajo final de grado consiste en utilizar la tecnología de impresión 3D para implementar dispositivos de alta frecuencia complejos y de bajo coste de una manera rápida y que permitan mejorar las prestaciones de los circuitos de microondas tradicionales. En particular, se pretende realizar el diseño, desarrollo y fabricación de dispositivos de microondas en tecnología microstrip incluyendo estructuras periódicas.

Los objetivos que se pretenden abordar en este trabajo final de grado son:

En primer lugar, realizaremos una introducción más profunda a la impresión 3D, adentrándonos más en el diseño de circuitos con una geometría periódica. Así como en los materiales utilizados, tipos de impresión, etc.

A continuación, diseñaremos y analizaremos algunos circuitos pasivos de microondas mediante estructuras periódicas generando una banda de rechazo a una frecuencia determinada.

Una vez que tengamos el diseño teórico de la estructura periódica, se realizará la simulación en ADS y EMPro (PathWave EM Design), combinando dos materiales con distinta ϵ_r y modificando la altura del sustrato.

Para terminar, diseñaremos y fabricaremos dos filtros típicos de microondas mejorando las características de los mismos mediante la utilización de las estructuras periódicas. Así como una conclusión que será el punto de partida hacia futuros estudios sobre esta técnica de diseño de circuitos.





CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo explicaremos los conceptos más importantes de este proyecto. Analizaremos como ha ido evolucionando la impresión 3D en su historia y realizaremos un repaso de las diferentes técnicas y métodos que se pueden utilizar en una impresora 3D para la fabricación de las piezas 3D, así como la variedad de materiales que pueden ser utilizados.

2.1 HISTORIA DE LA IMPRESIÓN 3D

La primera vez que escuchamos hablar de algo parecido a una impresora 3D probablemente nos tendríamos que ir a la ciencia-ficción, para ser más preciso al científico futurista y escritor británico, Arthur C. Clarke. En 1966 sale a la luz la serie televisiva Star Trek, en la cual aparece “el replicador” que básicamente tal y como lo describe Arthur C. Clarke es una máquina duplicadora [6].

En 1980 el doctor Hideo Kodama del instituto municipal de investigación industrial de Nagoya en Japón, fue la primera persona que solicitó la patente para un sistema de prototipado rápido de polímeros. Por problemas de financiación la solicitud nunca se aprobó e Hideo Kodama no pudo completar el proceso en el plazo establecido de un año [6].

Aunque no se pudo completar la patente, la idea de Hideo Kodama continuó, y Oliver de Witte, Jean-Claude André y Alain le Méhauté continuaron estudiando el concepto. Alain le Méhauté era un ingeniero electroquímico que estaba llevando a cabo una investigación sobre geometría fractal. Méhauté debía crear un objeto fractal con propiedades locales que son equivalentes a sus propiedades globales, pero estas piezas en aquella época eran muy difíciles de fabricar. Por lo que pidió ayuda a su amigo Oliver de Witte que trabajaba en una empresa de láseres y tecnología óptica. Witte le dijo que cuando dos láseres se cruzan en un líquido monómero puede convertirse en un sólido polímero. Con esta técnica

ambos querían fabricar la pieza deseada por Méhauté pero los primeros experimentos no fueron concluyentes y le presentaron su idea a Jean-Claude André, un investigador del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia (CNRS). André propuso realizar la pieza capa por capa y a partir de ese momento los tres comenzaron a trabajar juntos con la idea de construir una impresora 3D. El 16 de Julio de 1983 presentaron su patente para el proceso de estereolitografía (SLA), la aplicación de los inventores franceses fue abandonada por la CNRS debido, según ellos, a las escasas áreas de aplicación.

El 11 de marzo de 1986 obtuvo la patente Chuck Hall, que es conocido como el padre de la impresión 3D. Tras obtener la patente Hall fundó 3D System en Valencia (California), fue la primera empresa en comercializar con las impresoras SLA.

La impresión 3D fue avanzando hasta que en 1987 los investigadores Breaman y Deckard inventaron un nuevo sistema de impresión 3D, la sinterización láser selectiva (SLS, Selective Laser Sinteting). Este tipo de sistema era capaz de sintetizar polvo de resina para convertirlo en un sólido.

En 1988 Scott Crump quería fabricar una rana de juguete para su hija, en su cocina intentó mezclar cera de vela con polietileno y utilizando una pistola de pegamento caliente se dio cuenta que podía crear un objeto en 3D. Crump quería automatizar el proceso y pensó que si esa pistola de pegamento se conectaba a un sistema robótico cartesiano el proceso de modelado se realizaría de forma automática, así fue como nació la técnica de Modelado por Deposición Fundida (FDM). Crump, junto a su esposa, patentaron la tecnología FDM en 1989 y ese mismo año fundaron Stratasys. Esta es la técnica en la que se basan la mayoría de impresoras 3D que conocemos, además permitió la difusión de la impresión 3D abaratando costes y permitiendo a pequeños usuarios tener acceso a esta tecnología para fines propios.

En 1993 Jim Bredt y Tim Anderson diseñaron un modelo de impresora 3D por inyección jakeando una viaja impresora de inyección de tinta. El proceso se

conoció como inyección de aglutinante (Binder Jetting). Esta tecnología fue la primera que permitió imprimir piezas a todo color. En 1993 el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) patentó esta tecnología y en 1995 los estudiantes fundaron su propia empresa Z Corporation. En esta década la impresión 3D también se desarrolló en sectores como la medicina y la odontología para la creación de prótesis y órganos.

La impresión 3D lleva décadas entre nosotros, pero es en estos últimos años cuando ha tomado una mayor visibilidad ante el mundo. Esto es debido al proyecto Replicating Rapid-Prototypers (RepRap) que comenzó en Inglaterra en el 2005 fundado por el doctor Adrian Bowyer. RepRap es una iniciativa que pretende crear una impresora de código abierto y que sea capaz de imprimir la mayoría de sus propios componentes. En 2006 el prototipo RepRap imprimió con éxito la primera parte de sí mismo [6].

En la actualidad el precio de las impresoras 3D es más económico que hace unos años y esto hace que sea muy utilizada en ámbitos domésticos, académicos y en pequeños laboratorios de investigación.

2.2 TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D son todas aquellas técnicas en las que el material se une o se solidifica bajo el control de un ordenador para crear un objeto tridimensional. Para realizar la pieza tridimensional antes debemos crear el diseño de la pieza en el ordenador utilizando un software de modelado, en este proyecto se ha utilizado EMPro. Una vez que tenemos el objeto tridimensional que queremos debemos utilizar una interfaz entre EMPro y la impresora. El formato utilizado por la impresora es el Stereo Litography (STL), ideado por la empresa 3D Systems. Para ello utilizamos el software de impresión Ultimaker Cura, aunque existen una gran variedad de *Slicers* que dividirá nuestro objeto en un conjunto de capas horizontales de una determinada altura.

A continuación, se expondrán los distintos tipos de tecnologías utilizadas en la creación de piezas tridimensionales con impresoras 3D. Se hará una breve explicación de las más importantes, haciendo un mayor hincapié en la tecnología que vamos a utilizar en este proyecto.

2.2.1 FDM Modelado por disposición fundida

Es una tecnología de impresión 3D que consiste en calentar un termoplástico por encima de su punto de fusión, el cual sale por una boquilla. Dependiendo del tipo de filamento la temperatura de fusión cambiara. Esos pequeños hilos de plástico fundido se utilizan para formar capas, con el apilado sucesivo de dichas capas obtenemos el objeto 3D. Una de las características más importantes que tenemos que tener en cuenta a la hora de imprimir es la altura de capa, la cual está comprendida entre 50 y 400 micras. Si la altura de capa es pequeña se imprimirán piezas precisas y lisas, mientras que si la altura de capa es mayor obtendremos piezas con menos detalle. Algunas de las grandes ventajas de este tipo de impresoras es su bajo coste y la facilidad de uso.

No todas las impresoras FDM trabajan con filamento algunas trabajan directamente con pequeños pedacitos de plástico, llamados pellets.

Existen distintos tipos de impresoras FDM que se pueden clasificar de muchas maneras distintas. Uno de estas clasificaciones es dependiendo del tipo de movimientos que realiza. Según estos movimientos podemos clasificar a las impresoras en:

- Impresoras cartesianas: Son las más comunes, donde cada motor o grupo de motores se encarga del movimiento de cada uno de los ejes cartesianos (x, y, z).

Estas a su vez se pueden clasificar según el movimiento de su cabezal o de su cama. En algunas de las impresoras más populares el cabezal se mueve en los ejes (x, z), mientras que la cama se mueve solo en el eje y, como en la Prusa i3.



Figura 6: Impresora prusa i3 [16]

En otras impresoras el cabezal se mueve solo en el eje x mientras que la cama lo hace en el eje (y, z), como en la 3D System Cube.



Figura 7: Impresora 3D System Cube [17]

Un tipo de impresoras muy interesantes son aquellas en las que el cabezal se mueve en (x, y) mientras que la cama se mueve en z. Esto permite que las impresoras tengan forma de caja y las hace ideales para colocarlas en un escritorio. Suelen ser las más elegidas por los grandes fabricantes como Ultimaker, Makerbot, Zortrax, etc.



Figura 8: Impresora 3D XYZPrinting [18]

Por último, están las impresoras en las que la cama está quieta y el cabezal se mueve en los ejes (x, y, z). Un ejemplo de este tipo de impresoras es la que hemos utilizado en este trabajo final de grado.

- Impresoras tipo Delta: basadas en lo que se denomina cinemática paralela, donde el movimiento se produce por la combinación del movimiento a lo largo de tres ejes paralelos. La ventaja principal es que la cama y los tres motores están estáticos, lo que reduce considerablemente la masa en movimiento. La relación entre la superficie que ocupa la

impresora y la pieza es buena. Aunque la altura de la impresora es considerablemente más alta que la de la pieza impresa.



Figura 9: Impresora 3D FLSUN QQ-S [19]

- Impresoras polares: En este tipo de impresoras la cama puede girar por lo que el movimiento se basa en un sistema de coordenadas cilíndricas, es decir un sistema de coordenadas polares más el movimiento del eje z.



Figura 10: Impresora Polar 3D [20]

- Impresoras de cinta transportadora: El cabezal se mueve en un plano 45 grados respecto a una cinta transportadora. Este tipo de impresoras permiten imprimir piezas con una superficie mayor a la de la propia impresora. También imprimen una pieza detrás de otra sin necesidad de ser retiradas.



Figura 11: Impresora 3D de tipo cinta transportadora [21]

El extrusor es el encargado de depositar el filamento fundido está compuesto por tres partes principales: el mecanismo encargado de empujar el filamento, el bloque que calienta el filamento y la boquilla que es por donde sale el filamento fundido. Existen impresoras con dos extrusores, que permiten trabajar con más de un filamento. Por ejemplo, uno para la pieza y un filamento soluble en agua para el material de soporte.



Figura 12: Pieza 3D impresa con material soluble [28].

Las impresoras más económicas utilizan lo que se denomina una cama fría, esto quiere decir que la pieza se imprime sobre una cama que está a la temperatura ambiente, normalmente se utiliza cinta de carroceros para aumentar la adherencia de la pieza. En este tipo de impresora solo se puede imprimir con algunos materiales. El uso de una cama caliente no solo mejora la adherencia de la pieza que es un tema muy importante en la impresión FDM sino que también hace que el abanico de filamentos aumente.

Existen una gran variedad de filamentos que están en constante evolución. Los más utilizados son el PLA, ABS, PET (Tereftalato de Polietileno), y TPU (poliuretano termoplástico).

- PLA:

Es el más utilizado, es un plástico biodegradable que se obtiene a partir de almidones por lo que no está basado en el petróleo. Se imprime a baja temperatura entre los 160 grados y 220 grados. No se curva fácilmente por lo que se puede imprimir sin cama caliente, aunque es aconsejable imprimir con cama caliente para que la pieza se adhiera mejor. No soporta muy bien el calor a 50 grados comienza a ser endeble, por lo que no es recomendable imprimir piezas que vayan a estar expuestas a altas temperaturas.

- ABS:

Este filamento también es muy utilizado porque es resistente al impacto y bastante rígido. Tiene una

elevada resistencia térmica, desde -20 grados hasta los 80 grados aproximadamente. Estas propiedades hacen que sea muy utilizado en las piezas industriales y de automoción al soportar altas temperaturas. El punto de fusión, superior al del PLA, esta entre 230 grados y 260 grados. Se curva fácilmente por lo que necesita de una cama caliente.

- PET:

Es un material con una buena resistencia al desgaste y a la corrosión, además es ligeramente flexible. Podemos imprimir desde los 215 grados hasta los 250 grados. Al igual que en el PLA, no es necesario la utilización de una cama caliente. Es muy utilizado en envases de alimentos y botellas desechable.

- TPU:

Es el filamento más flexible y resistente. Aunque esta flexibilidad hace que sea un material muy difícil de imprimir ya que es posible que se obstruya en el extrusor. Debemos imprimir de 220 grados hasta 250 grados. No necesita de cama caliente. Es un filamento muy utilizado en ruedas, calzado, etc. [8]

2.2.2 SLA Estereolitografía

Consiste en una bandeja que contiene ftopolímoro líquido, el cual se convierte en sólido por acción de luz ultravioleta. Un láser ultravioleta traza una sección transversal de un objeto sobre la resina y de esta manera

se forma una fina capa sólida. Una vez que tenemos esa capa, la plataforma se desplaza para fabricar una nueva capa adherida a esta última. Mediante el apilado de sucesivas capas logramos el objeto tridimensional. En algunas impresoras el láser incide desde arriba y la plataforma desciende dentro del fotorolímico, con la ayuda de un rodillo u otro mecanismo se alisa la superficie antes de imprimir la siguiente capa. Los espesores típicos de capa van desde 0.05 mm a 0.15 mm por lo que estamos ante una tecnología capaz de imprimir objetos con gran detalle y precisión. En otras impresoras el láser incide desde abajo en una bandeja con fondo transparente y la plataforma asciende después de cada capa. La estereolitografía necesita estructuras de soporte para fijar la pieza a la plataforma y otros soportes dependiendo de su geometría. Una vez que la pieza tridimensional se ha fabricado se sumerge en un baño químico, normalmente en alcohol etílico, que retira el exceso de resina. Para finalizar se retira la estructura de soporte de forma manual.

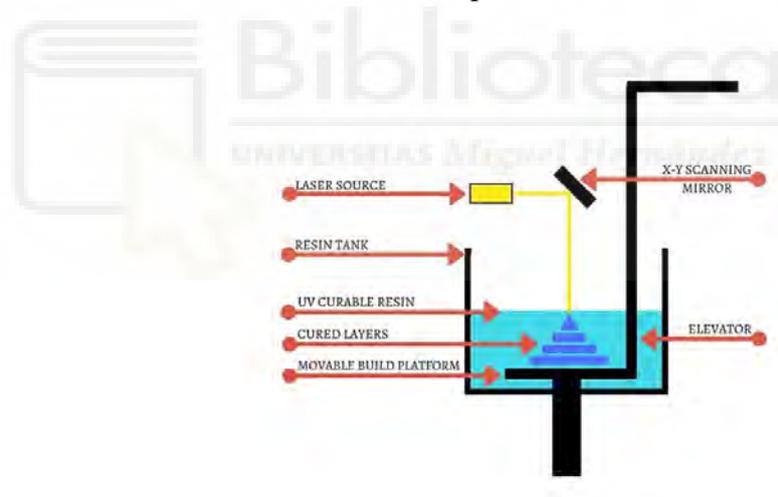


Figura 13: Esquema de componentes en SLA [14].

Existen varios tipos de resina de distintos colores, translúcidas, opacas, flexibles, moldeables, de alto impacto, etc. Algunas de las ventajas de utilizar esta técnica son su alta precisión y un acabado superficial suave. Entre las desventajas podemos nombrar la necesidad de estructuras de soporte, la fragilidad de la pieza y el coste de impresoras y resinas.



Figura 14: Impresora 3D basada en la técnica de SLA [15]

2.2.3 DLP, Procesamiento Digital de Luz

El DLP es una tecnología muy similar a la estereolitografía, ya que ambas se basan en la solidificación de un fotopolímero expuesto a la luz. La diferencia entre ambas radica en que DLP utiliza un proyector como fuente de luz en vez de un láser. Debido a que el proyector es una pantalla digital la imagen de cada capa se compone de píxeles cuadrados, dando lugar a una capa formada por pequeños ladrillos rectangulares llamados vóxels. A diferencia de la SLA donde el láser tiene que escanear el área e ir recorriendo punto a punto la figura que quiere curar, esta tecnología en una proyección abarca toda la capa. DLP puede llegar a alcanzar tiempos de impresión más rápidos en dos casos, cuando la impresión es grande y densa, donde la impresión llenará gran parte de la pieza y, en segundo lugar, para impresiones muy pequeñas y de gran detalle. La resolución en DLP depende directamente de la resolución del proyector y del área de trabajo.

2.2.4 MSLA, SLA Enmascarado o DLP LCD

Esta técnica es la tercera variante de la estereolitografía que utiliza como fuente una matriz de diodos LED's ultravioleta (UV). La luz UV se emite a través de una pantalla LCD (*Liquid Crystal Display*) que actúa como máscara. 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 debe solidificarse la resina. Esta técnica puede alcanzar tiempo de impresión más rápidos en comparación con la estereolitografía. Este tipo de tecnología es muy utilizada en ámbito doméstico, ya que tiene un coste reducido.

2.2.5 MPL Litografía multifotónica

La litografía multifotónica, también es conocida como litografía láser directa, escritura láser directa o polimerización de dos fotones, permite fabricar estructuras 3D en forma arbitraria sin la necesidad de utilizar sistemas ópticos complejos. Se basa en un láser de femtosegundo de una longitud de onda cercana al infrarrojo que induce la polimerización multifotón. Para que se produzca este efecto es necesario que la luz láser sea muy intensa lo que se produce solo en el foco del láser por lo que se puede realizar la polimerización en cualquier posición del fotopolímero y no solo en la superficie como en las tecnologías anteriores. Los principales usos de esta tecnología son metamateriales, cristales fotónicos, interconexiones ópticas, microestructuras para estudios biológicos, etc.

2.2.6 CLIP Producción Continua de Interfaz Líquida

Esta técnica se basa en un proyector que emite luz ultravioleta en una cuba con resina de fotopolímero endureciendo la resina hasta que se forma un

objeto 3D completo. Esta técnica es de veinticinco a cien veces más rápida que la de DLP convencional [7].

Aunque requiere de una calibración minuciosa y los detalles de impresión no suelen ser los mejores, se ha seleccionado la tecnología FDM por diversos factores; es una tecnología con un mecanismo sencillo, podemos crear piezas en un tiempo reducido, menor coste de las impresoras y los filamentos utilizados en comparación con las otras técnicas de impresión 3D, gran cantidad de opciones en cuanto a la elección del filamento, etc.



CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo vamos a describir todos los equipos y materiales que hemos utilizado para la realización de este proyecto. Así, como una explicación de las estructuras periódicas, los procedimientos experimentales realizados y métodos a seguir para la fabricación de objetos 3D.

3.1 IMPRESORA 3D

En este proyecto vamos a utilizar la impresora BQ Hephestos que es una impresora de bajo coste, con un precio de alrededor de 500€. Todos los componentes electrónicos BQ Hephestos están integrados en una sola placa: BQ Zum Mega 3D que mejora la disipación de calor y optimiza el control del motor. Esta impresora utiliza la técnica de impresión FDM, técnica explicada en el punto 2.2.1. El material utilizado para realizar los circuitos será PLA, que es un material de bajo coste y fácil de imprimir. La principal ventaja de Hephestos radica en sus cadenas de cable, que se pueden abrir para facilitar la inserción de cables. Gracias a ellos, los cables se recogen convenientemente en la parte superior del extrusor y la parte posterior de la impresora, sin interferir con el movimiento.

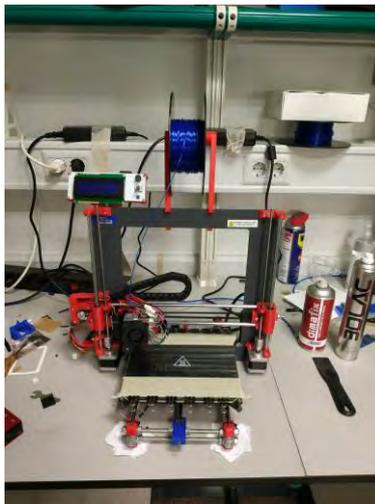


Figura 15: Impresora Bq Hephestos

En cuanto a las especificaciones físicas, la impresora tiene unas dimensiones de 38.3 cm de largo (L), 58 cm de ancho (W) y 46 cm de alto (H), mientras que el peso total es de 14 kilogramos. Su volumen de impresión depende de la cama de la impresora, cuyas dimensiones son de 21,5 x 21 x 18 cm. En cuanto a la resolución del eje Z tenemos: muy alta de 60 micras, alta de 100 micras, media de 200 micras y baja de 300 micras. La velocidad máxima de impresión ronda los 80-100 mm/s, cuenta con una pantalla LCD con enconder rotativo con pulsador para la navegación y un lector de tarjetas SD estándar, así como un puerto micro-USB tipo B [9].

3.2 FILAMENTO UTILIZADO PARA LA IMPRESIÓN.

El filamento utilizado será PLA de color azul de la empresa German RepRap con un diámetro de 1.75 mm, la bobina tiene un precio muy económico y es muy fácil de imprimir ya que no necesita cama caliente, aun así se van a realizar las piezas en 3D con cama caliente para que se adhieran mejor a la cama. La temperatura de impresión mínima es de 180 ° C y la máxima es de 220 ° C [10].



Figura 16: Bobina de PLA de color azul

3.3 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Para realizar las medidas de nuestros circuitos utilizaremos el analizador vectorial de redes vectorial E8363B de la marca Keysight. Las líneas de alimentación de

entrada y salida de los puertos están conectadas al analizador vectorial de redes mediante dos conectores SMA.

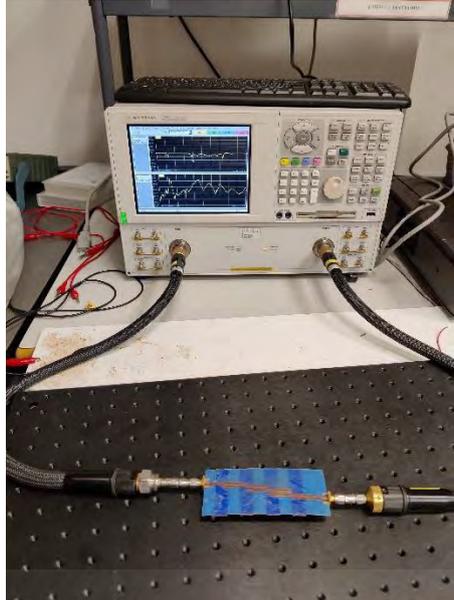


Figura 17: Analizador vectorial de redes

3.4 PROGRAMAS SOFTWARE

En este apartado vamos a describir cada uno de los programas software utilizados para la realización de este proyecto.

3.4.1 Matlab

Matlab es una abreviatura de “matrix laboratory” (laboratorio de matrices), funciona principalmente con matrices y arreglos complejos. Este software es utilizado por millones de ingenieros y científicos en todo el mundo para realizar los sistemas y productos que transforman nuestro mundo. Las gráficas integradas facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos.

Con la ayuda del código de Matlab (Anexo A) somos capaces de simular en una gráfica una banda de rechazo a la frecuencia que deseamos y en otra nos mostrará el cambio de impedancia que necesitamos para conseguirla. Debemos conseguir que la atenuación de la banda de rechazo este por debajo de -10 dB, para ello debemos ir variando los periodos y los ciclos de cada periodo. Gracias a la gráfica de cambio de impedancia, podremos calcular la longitud de las líneas microstrip (MLIN) que vamos a utilizar posteriormente en ADS [11].

3.4.2 ADS

Es un programa de diseño circuital y simulación electromagnética, en el que se disponen de dos ventanas de trabajo;

- *Schematic*: en esta ventana diseñamos el circuito mediante las librerías que disponemos de ADS. Sobre el circuito realizaremos simulaciones y podremos analizar los resultados
- *Layout*: en esta ventana podemos observar que forma tendrá el circuito sobre la placa.

En este trabajo final de grado solo trabajaremos con el modelo circuital (*Schematic*) para poder analizar el comportamiento de las estructuras periódicas realizaremos diferentes circuitos y sus respectivas simulaciones para poder analizar su comportamiento.

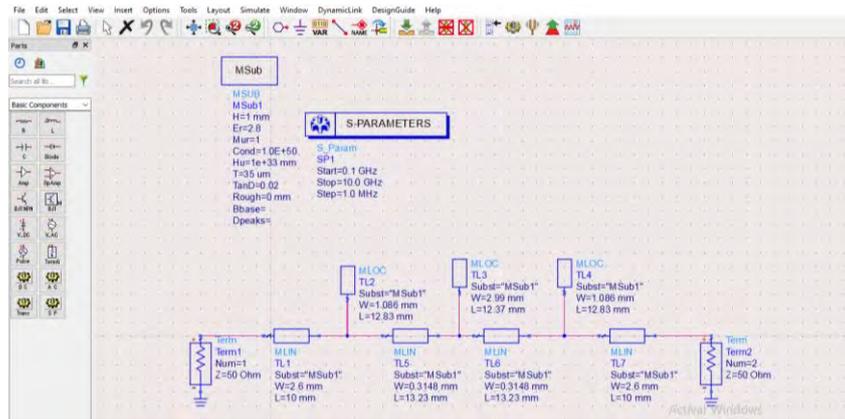


Figura 18: Ejemplo de modelo circuital en ADS

3.4.3 EMPro

Este software permite crear estructuras 3D y realizar su simulación electromagnética. En el entorno de dibujo encontramos muchas funciones avanzadas y herramientas, para crear estructuras complejas en 3D. Además, nos da la opción de importar estructuras de otros entornos CAD (Diseño Asistido por Computadora).

En nuestro caso vamos a realizar la pieza 3D en EMPro. Una vez creada seleccionamos las propiedades del material que deseemos, se pondrán las propiedades del PLA. Cuando tengamos la pieza creada debemos colocar dos puertos, uno en la entrada y otro en la salida, y realizar la simulación electromagnética (EM). Si los resultados son los que esperamos ya podemos pasar el archivo de EMPro a Cura 3D para poder ser impreso en la impresora 3D [12].

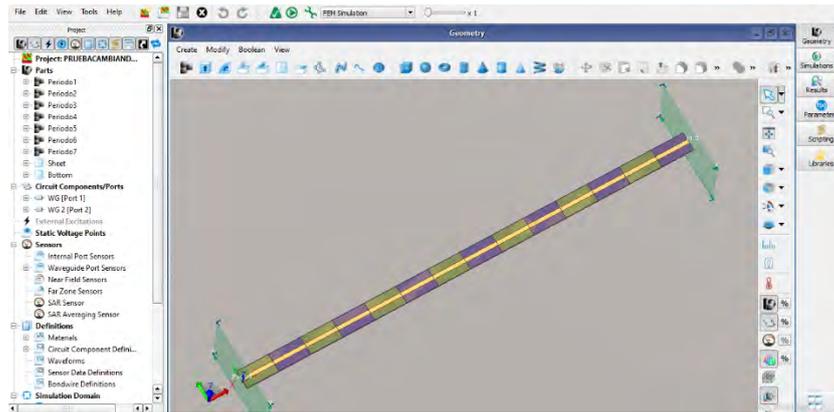


Figura 19: Espacio de trabajo en EMPro

3.4.4 Cura 3D, división en capas de la pieza Slicer

Este software nos permite realizar conversiones de archivos de diseño 3D en archivos de laminado que nos sirva para poder hacer impresiones en 3D. Para ello Cura convierte archivos en 3D que no son entendibles por la impresora en archivos que sean entendibles por ella. Cura tiene muchas opciones para la impresión de la pieza como la altura de capa, el grosor de la pared, densidad del relleno, patrón de relleno, temperatura del material, etc., todas estas opciones deben ser ajustadas para que obtengamos una pieza de dimensiones y calidad óptima [13].

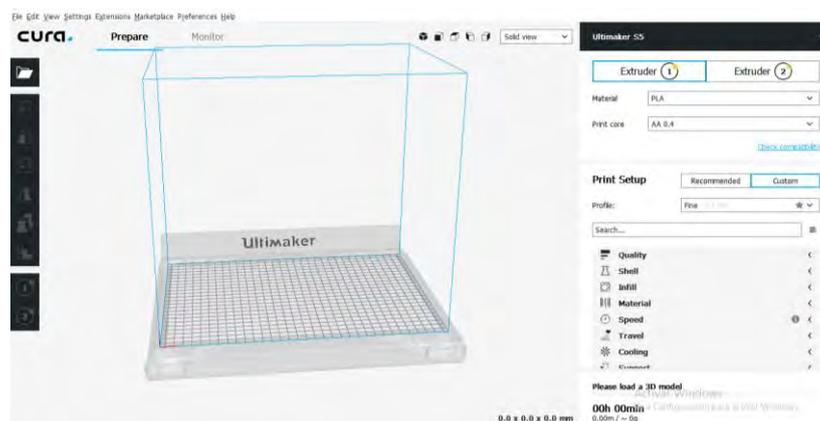


Figura 20: Espacio de trabajo en Cura 3D

3.5 PROCESO DE CALIBRADO Y MANTENIMIENTO DE LA IMPRESORA 3D

Una de las cosas más importantes que tenemos que hacer para que las piezas de impresión 3D sean impresas de la mejor forma posible es el proceso de calibrado y mantenimiento de la impresora.

Debemos calibrar la base o cama de la impresora 3D, ya que si no está bien nivelada no obtendremos buenos resultados de impresión. Para ello tenemos que ajustar el eje Z para que al desplazarse el extrusor no se produzcan distintos niveles de altura entre el extrusor y la cama. Para empezar, comprobaremos que la altura en ambos lados sea la misma, para ello mediremos desde un punto fijo de la impresora 3D a un punto de la guía del eje Z. Para que ambos lados estén igualados tenemos que girar manualmente el motor del lado que queramos, sujetando el otro para que no gire.

Una vez que tenemos ajustado el eje Z debemos pasar a realizar el nivelado de la cama, esta tiene cuatro tornillos los cuales deben ser ajustados. La boquilla de la impresora también debe ser calibrada para una correcta impresión. Debemos pasar un folio entre la boquilla y la cama. El folio tiene que pasar sin problemas, y la punta de la boquilla tiene que estar pegada al folio, pero sin que haya demasiada resistencia. Esto se debe hacer primero en las cuatro esquinas de la cama para comprobar que la calibración es igual en todas ellas y, después, en el centro de la cama.

Antes de realizar los circuitos de test necesarios es recomendable realizar unas pequeñas impresiones de prueba para comprobar que las medidas de las mismas sean correctas. Para ello, hemos realizado varios cubos de calibración de 1x1x1 cm. Una vez impresos hemos medido mediante un pie de rey para comprobar que las medidas sean correctas. Cuando estas medidas se ajustan a las ideales es cuando podemos comenzar a imprimir.

El mantenimiento de la impresora es muy importante. Debemos tener la cama y la boquilla del extrusor limpia de impurezas cada vez que tengamos que imprimir una pieza. El proceso de calibración debemos realizarlo una vez por semana como mínimo [22].

3.6 INTRODUCCIÓN A LAS ESTRUCTURAS PERIÓDICAS

Las estructuras periódicas EBG (electromagnetic bandgap) provienen del campo de la óptica y en la actualidad están teniendo un gran interés en el sector de las telecomunicaciones por sus aplicaciones en las bandas de microondas y ondas milimétricas [23]. La característica más importante de este tipo de estructuras es que proporciona una banda prohibida en unas frecuencias determinadas. Estas estructuras son esencialmente una distribución espacial periódica de distintos materiales dieléctricos y conductores metálicos. Para aplicaciones de filtrado proporcionan dimensiones físicas más reducidas y una banda de rechazo más selectiva en comparación a la misma estructura no periódica. Podemos conseguir filtros con mayor selectividad en la banda de rechazo y líneas de transmisión de baja dispersión.

En cuanto a las aplicaciones, podemos encontrar, entre otras:

- Antenas de alta ganancia: La superficie curva de las antenas parabólicas hace difícil su uso en plataformas móviles y largas configuraciones de array sufren grandes pérdidas en las redes de alimentación. En lugar de utilizar antenas parabólicas o grandes arrays, con estructuras EBG podemos conseguir antenas resonantes de elevada ganancia [23].

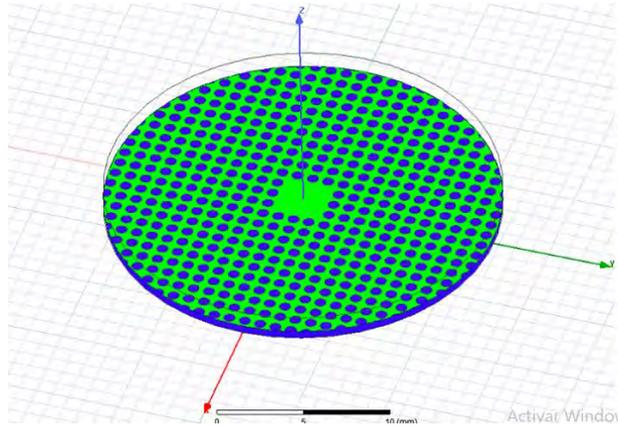
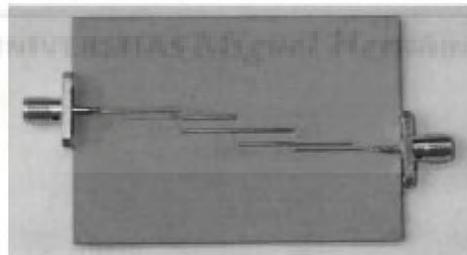
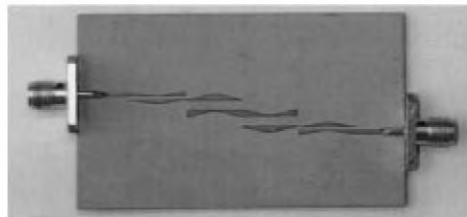


Figura 21: Diseño de antena en tecnología EBG de alta directividad [23]

- Podemos diseñar filtros más selectivos; existen estudios que utilizando una perturbación continua del ancho de las líneas acopladas siguiendo una ley senoidal se consigue rechazar la banda de frecuencias que deseemos mientras que los demás rangos de frecuencias se mantienen prácticamente inalterados. Además, no hace falta volver a calcular los parámetros del filtro, podemos seguir utilizando la metodología de diseño clásica [23].



(a)



(b)

Figura 22: (a) Filtro líneas acopladas clásico. (b) Filtro siguiendo ley senoidal [29].



CAPÍTULO 4. PRUEBAS PRELIMINARES CON ESTRUCTURAS PERIÓDICAS BÁSICAS

Antes de realizar el diseño y fabricación de los dos circuitos pasivos de alta frecuencia debemos realizar algunos circuitos básicos de prueba con geometría periódica y comprobar si el band gap, banda de rechazo, se realiza de forma correcta. Para ello realizaremos dos diseños, el primero variando la ϵ_r del material y el segundo variando la altura.

4.1 DISEÑO DE CIRCUITO DE TEST VARIANDO ϵ_r DEL MATERIAL

En este primer circuito de test vamos a realizar una estructura periódica combinando dos materiales con distinta ϵ_r modificando la densidad del material [30]. Una vez realizado el diseño comprobaremos si es posible su fabricación en la impresora 3D.

4.1.1 Diseño en Matlab

Lo primero que debemos hacer es el diseño del band gap en Matlab a una frecuencia de diseño. Este software implementado nos permitirá realizar simulaciones ideales de una manera rápida para visualizar como queda nuestra banda de rechazo.

Tenemos una limitación en la variación de la ϵ_r , que va desde 1.456 hasta 2.8 [30], ya que es la mínima ϵ_r que podemos obtener en el PLA modificando la densidad, cada uno de estos valores tendrá una impedancia de línea asociada. Para calcular los valores de las impedancias de las líneas nos vamos a ADS y abrimos la herramienta LineCalc. Para calcular estas impedancias en LineCalc debemos poner los siguientes datos; $\epsilon_r=2.8$, $H=1$ mm, $T=35$ μ m, $TanD=0.02$ y frecuencia de 2 GHz, una vez que tenemos

estos datos en LineCalc ponemos 50 Ohm en Z_0 y pulsamos en Synthesize para calcular el ancho (W) y la longitud de la línea (L). Con esos valores de W y L , y sin cambiarlos, nos vamos a la ϵ_r y la modificamos a 1.456. Seguidamente pulsamos Analyze y obtenemos la impedancia asociada para ese valor de ϵ_r , obtenemos una impedancia de 65.4259 Ohm.

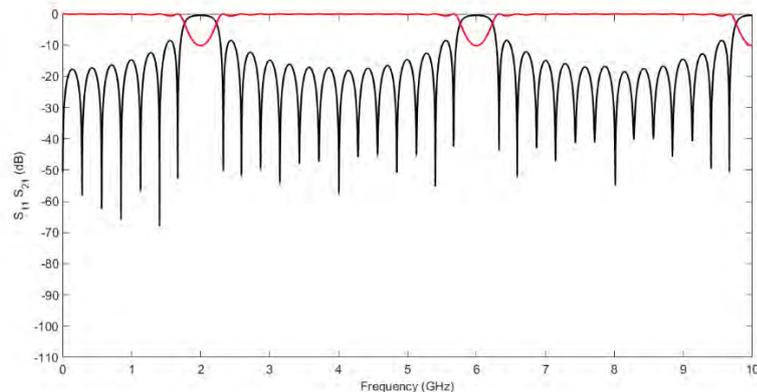
Nuestra gráfica tendrá un cambio de impedancia de 50 a 65 Ohm aproximadamente, por lo que la impedancia máxima (Z_{amp}) es de 15 Ohm. La frecuencia de diseño del band gap se ha seleccionado a 2 GHz por lo tanto el código de Matlab es [31]:

$$Zc=ZL+(-Z_amp*\text{square}(2*\text{pi}*(1/\text{lambda_dis}*2)))+Z_amp;$$

En este caso, para tener una atenuación considerable a la frecuencia de diseño del band gap se tienen que tener en cuenta un número elevado de periodos, para que el parámetro $S(2,1)$ esté por debajo de -10dB. Por lo tanto, a la frecuencia de diseño del band gap de 2 GHz y después de realizar varias pruebas obtenemos que para tener -10 dB de atenuación en la banda de rechazo necesitamos 7 periodos de la estructura periódica:

$$l=0:\text{paso}:3.5*\text{lambda_dis};$$

Los parámetros $S(1,1)$ y $S(2,1)$ son los siguiente:



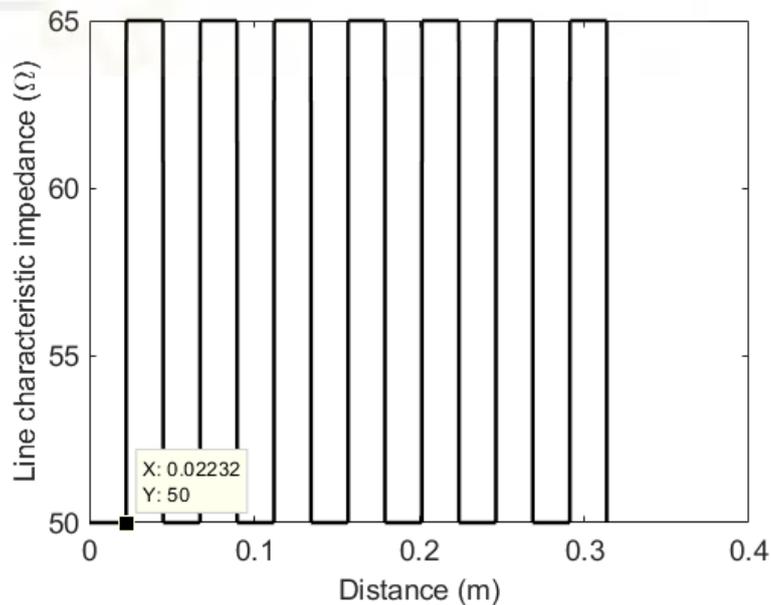
Gráfica 1: Parámetros S combinando dos materiales con distinta ϵ_r

Como podemos ver en la gráfica 1 hemos conseguido la atenuación que estábamos buscando para 7 periodos y una longitud total de la estructura de 31.37 cm.

4.1.2 Diseño en ADS

Una vez realizado el diseño teórico de la estructura periódica, el siguiente paso es simularlo en ADS para ver que los resultados obtenidos son similares en comparación con Matlab. Para cada cambio de impedancia de la gráfica de Matlab tenemos que poner en ADS una MLIN, con una L y W que tenemos que calcular.

Para obtener la distancia entre periodos basta con ir a la gráfica que hemos simulado en Matlab y ver cuanta distancia se mantiene en cada variación de impedancia. Como podemos observar en la gráfica 2, la longitud es de 22.32 mm.



Gráfica 2: Señal cuadrada que representa el cambio de impedancia necesario para obtener el cambio de ϵ_r

Para calcular el ancho de la línea microstrip (W) de 50 ohm nos debemos ir de nuevo a la herramienta LineCalc e introducir los mismos datos que anteriormente, $\epsilon_r=2.8$, $H=1$ mm, $T=35$ μm , $TanD=0.02$ y $f=2$ GHz. Ahora nos faltaría poner la impedancia de 50 Ohm y pulsar en Synthesize, el valor de W que obtenemos es de 2.601180 mm.

Para conseguir el cambio de impedancia que hemos obtenido en la gráfica de Matlab (gráfica 2) se podría hacer de dos formas. La primera sería calculando el ancho y la longitud tanto para 50 como para 65 Ohm como se realizó en [32]. Una vez calculada la L y W , con el mismo substrato ir alternando estas longitudes y anchuras para conseguir realizar el band gap o el filtro de salto de impedancia. Esto haría que nuestra línea cambiara, pero no queremos que la línea cambie ya que estamos buscando que sin cambiar la anchura y la longitud de la línea consigamos el mismo efecto.

En el segundo caso, manteniendo el ancho de línea W a 50 ohm se modifica la ϵ_r del material hasta conseguir la variación de impedancia de 65 ohm. Para ello, se crean dos substratos en ADS modificando sus características eléctricas:

Para el substrato de 50 Ohm:

$$\epsilon_r = 2.8, H=1 \text{ mm}, T=35 \mu\text{m}, TanD=0.02.$$

Para el substrato de 65 Ohm:

$$\epsilon_r = 1.456, H=1 \text{ mm}, T=35 \mu\text{m}, TanD=0.02.$$

Una vez que tengamos los dos substratos en ADS simulamos el circuito y este es el resultado:

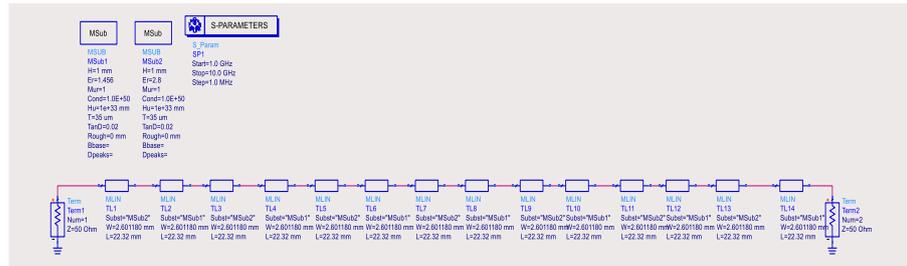
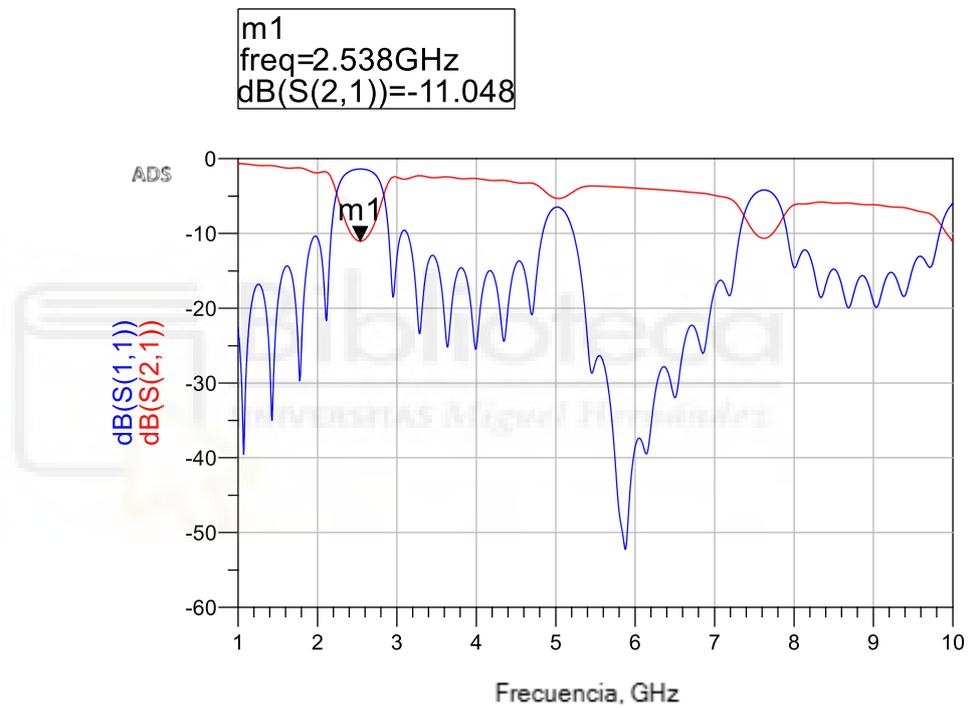


Figura 23: Diseño en ADS de circuito de test con variación de la ϵ_r

La simulación calculada es:



Gráfica 3: Simulación en ADS del circuito de test con variación de la ϵ_r

Como podemos observar en la simulación de ADS al introducir dos substratos con distinta ϵ_r y tangente de pérdidas generaremos unas pérdidas adicionales respecto de la simulación ideal de Matlab y podemos observar que la frecuencia de diseño se ha desplazado hasta los 2.538 GHz.

4.1.3 Diseño EMPro

Tras realizar la simulación circuital en ADS, pasamos a realizar la simulación de la estructura periódica en 3D.

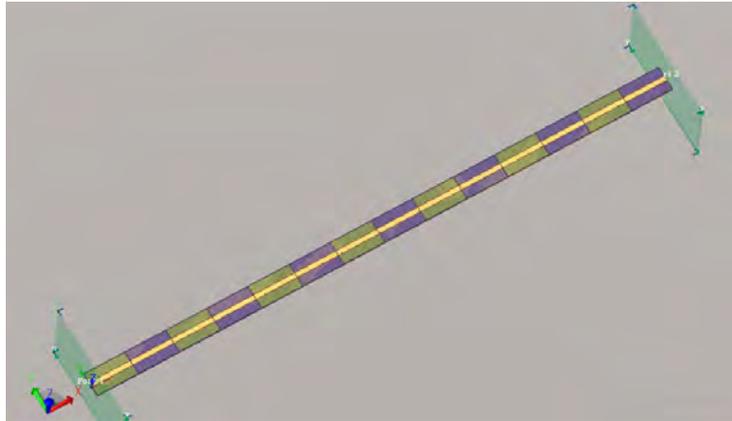
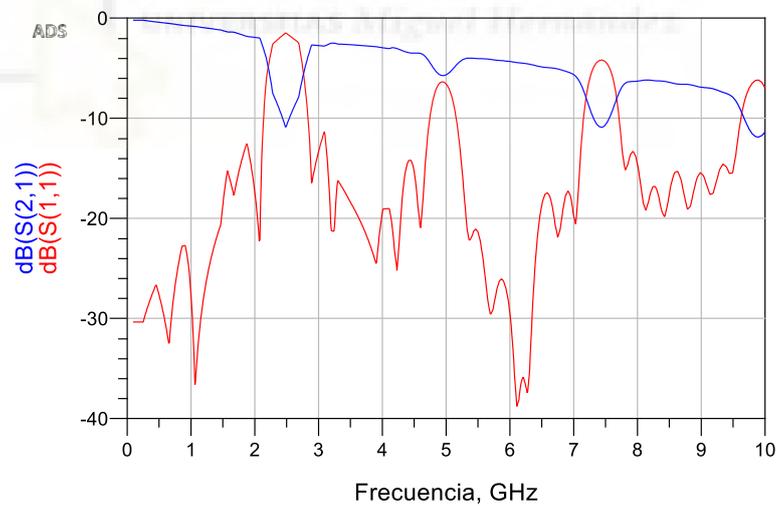


Figura 24: Diseño en EMPro del circuito de test con variación de la ϵ_r

La simulación realizada da como resultado:



Gráfica 4: Simulación de EMPro pasada a ADS del circuito de test con variación de la ϵ_r

Aunque hemos conseguido unos buenos resultados en cuanto a ancho de banda y atenuación, este filtro no es capaz de fabricarse con la impresora 3D ya que es demasiado largo (31.37 cm) y supera la superficie de impresión máxima de la impresora 3D (21 cm) por lo que para fabricarlo de esta forma deberíamos poner codos para hacer una especie de laberinto en la placa y poder acotarlo a las medidas deseadas.

4.2 DISEÑO DE CIRCUITO DE TEST VARIANDO LA ALTURA DEL MATERIAL

Como hemos podido comprobar el circuito diseñado en el apartado 4.1 no puede imprimirse en la impresora 3D porque el tamaño de la cama es menor a la longitud del circuito. Para ello ahora no vamos a cambiar la ϵ_r del material, si no que vamos a cambiar la altura del mismo para seguir modificando la impedancia de la línea de transmisión. El proceso de diseño es muy similar al que hemos realizado en el punto 4.1.

4.2.1 Diseño en Matlab

En primer lugar, debemos calcular las impedancias asociadas que vamos a obtener para cada cambio de altura del sustrato, nos debemos ir a ADS y mediante la herramienta LineCalc calcularlas. Una vez que tengamos las dos impedancias características asociadas a cada altura del sustrato, podremos obtener la variación de impedancia máxima (Z_{amp}).

El cambio de altura que vamos a tener en el sustrato va a ir de 0.8 mm a 3 mm con una $\epsilon_r = 2.8$, $T = 35 \mu\text{m}$, $\text{Tan}D = 0.02$. Una vez que tenemos estos datos en LineCalc calculamos la W y L para una altura de 0.8 mm y una impedancia de $Z_0 = 50 \text{ Ohm}$. Con esos valores de W y L , modificamos la altura del sustrato a $H = 3.0 \text{ mm}$ y calculamos la impedancia de la línea que en este caso es de 100.946 Ohm.

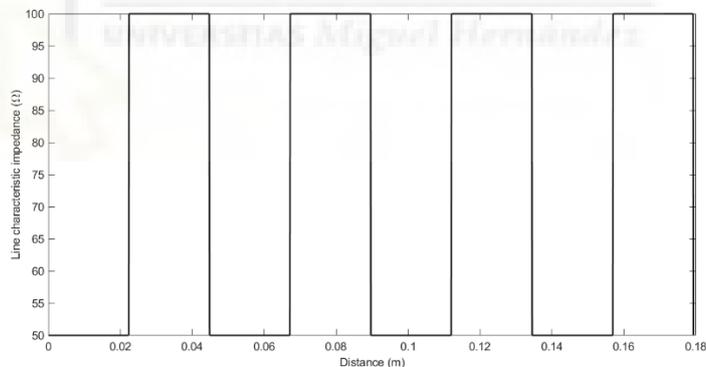
Como hemos podido observar nuestra grafica tendrá un cambio de impedancia de 50 a 100 Ohm aproximadamente, por lo que la variación de impedancia es de 50 Ohm. Una vez obtenida la variación de impedancia para las distintas alturas del substrato diseñamos la longitud del periodo del band gap para que esté a 2 GHz mediante el siguiente código de Matlab:

```
Zc=ZL+(-Z_amp*square(2*pi*(1/lambda_dis*2)))+Z_amp;
```

Como hemos comentado en el apartado 4.1.1, estamos buscando que el parámetro S(2,1) quede por debajo de -10dB como mínimo, para que el band gap tenga una atenuación suficiente a la frecuencia de diseño. Por lo tanto, a la frecuencia que estamos buscando y después de realizar varias pruebas debemos poner en nuestro código de Matlab:

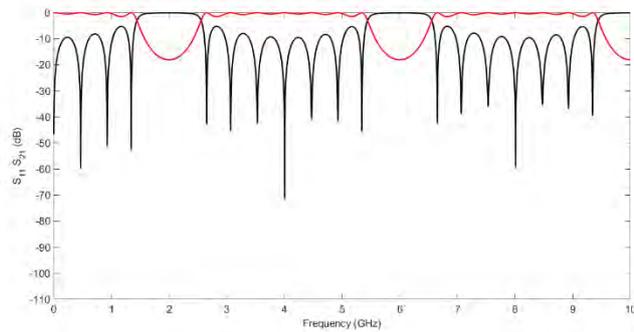
```
l=0:paso:2*lambda_dis;
```

Con las modificaciones realizadas obtenemos la siguiente señal cuadrada.



Gráfica 5: Señal cuadrada que representa el cambio de impedancia necesario para obtener el cambio de altura

Los parámetros $S(1,1)$ y $S(2,1)$ son los siguiente:



Gráfica 6: Parámetros S combinando dos alturas distintas

Como podemos observar en la gráfica 6 hemos conseguido una atenuación mayor que 10dB a la frecuencia de diseño, con una longitud del periodo de 4.464 cm y una longitud total de la placa de 17.93 cm, esto hace que sea posible la fabricación del mismo en la impresora 3D, ya que la superficie de impresión máxima es de 21.0 cm.

4.2.2 Diseño en ADS

El siguiente paso es realizar la simulación circuital en ADS, donde en cada cambio de impedancia tenemos que poner una MLIN con una longitud y anchura (W) que seguidamente calcularemos.

La longitud de cada sección de impedancia viene determinada por un ciclo del periodo de la estructura periódica, que en este caso es de 22.32 mm. Para calcular el ancho de la línea de transmisión nos vamos de nuevo a la herramienta LineCalc, debemos poner los mismos datos que anteriormente, $\epsilon_r = 2.8$, $H = 0.8$ mm, $T = 35$ μm , $\text{TanD} = 0.02$ y $f = 2$ GHz, donde la W calculada es de 2.07 mm para una impedancia de línea de 50 ohm.

Por otro lado, para que la línea sea constante con un ancho de $W = 2.07352$ mm y se modifique la impedancia, debemos de crear dos substratos con distinta altura en ADS.

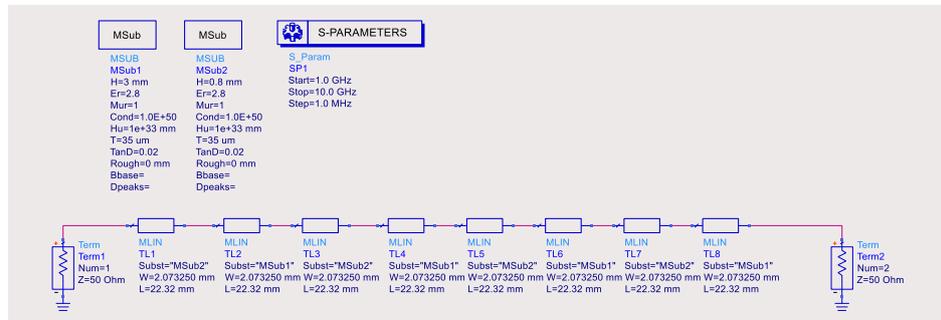
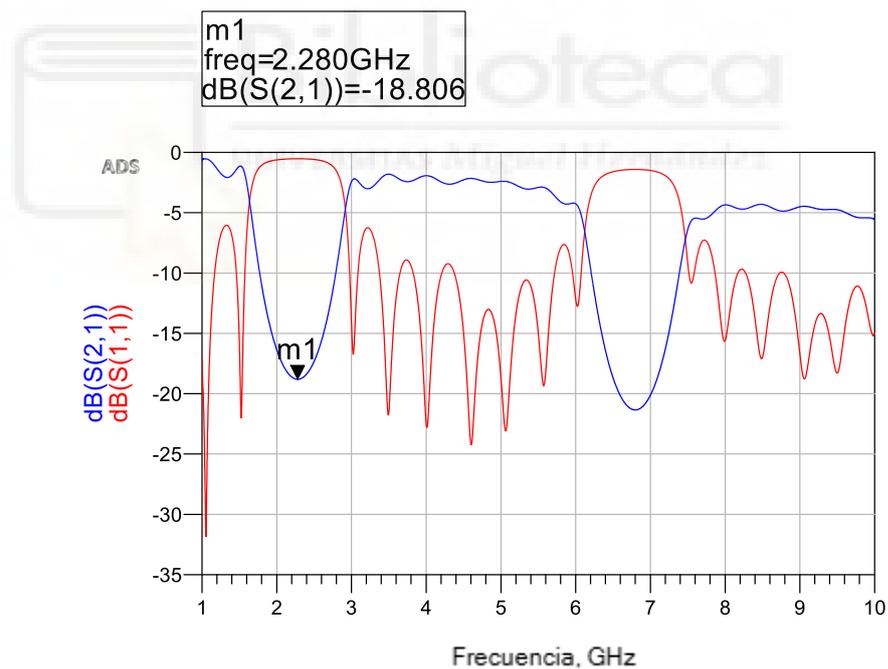


Figura 25: Diseño en ADS de circuito de test con cambio de altura

El siguiente paso es calcular los parámetros $S(2,1)$ y $S(1,1)$ del esquemático realizado.



Gráfica 7: Simulación en ADS del circuito de test con cambio de altura

Como podemos observar en la gráfica 7, la atenuación es de 18 dB a 2.28 GHz y la banda de rechazo se ha desplazado más allá de 2 GHz esto se

debe a que introducimos un cambio de altura y tangente de pérdidas que generan pérdidas adicionales.

4.2.3 Diseño EMPro

Una vez simulada la estructura periódica en ADS se diseña el circuito en EMPro para poder realizar las variaciones en altura de la estructura 3D.

La pieza 3D es la siguiente:

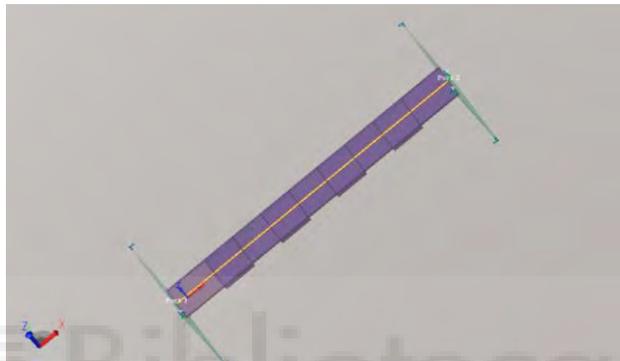


Figura 26: Diseño en EMPro del circuito de test con cambio de altura (A)

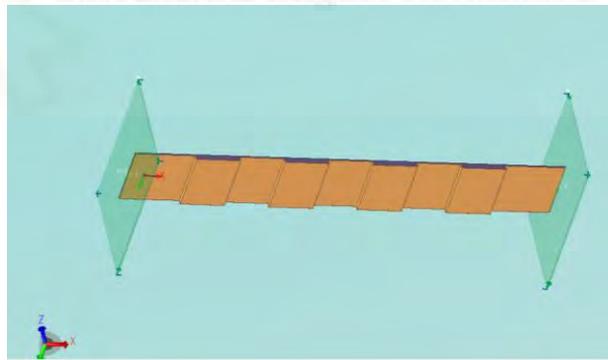
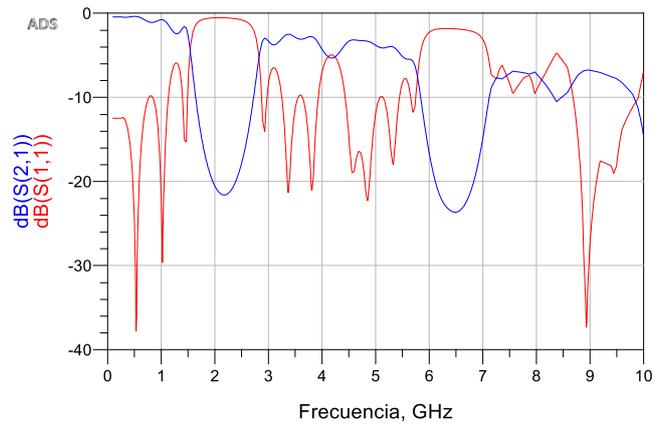


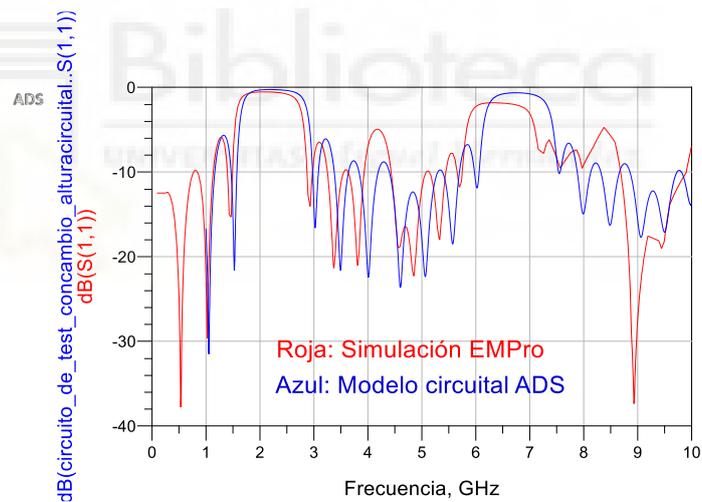
Figura 27: Diseño en EMPro del circuito de test con cambio de altura (B)

La simulación resultante del diseño en EMPro es la siguiente:

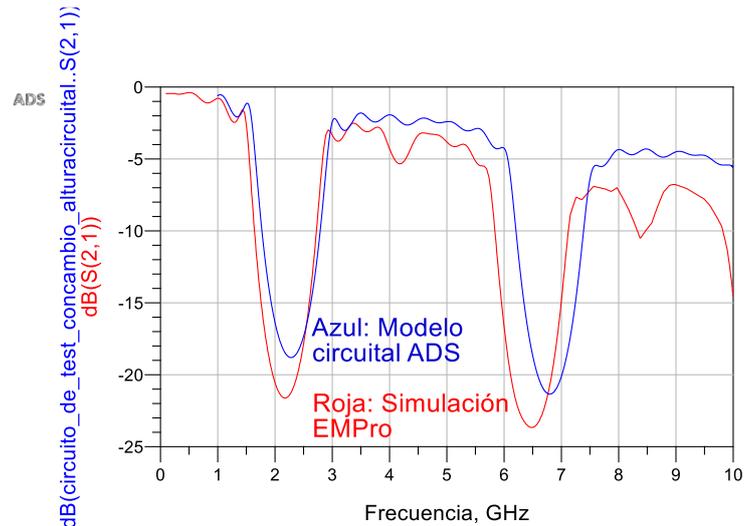


Gráfica 8: Simulación de EMPro pasada a ADS del circuito de test cambiando altura

Como podemos observar en la gráfica 8, la atenuación es de más de -20 dB y la banda de rechazo se ha desplazado más allá de 2GHz. Ahora vamos a realizar la comparación con el modelo circuital de ADS.



Gráfica 9: Comparación de los parámetros S(1,1) del modelo circuital con la simulación de EMPro



Gráfica 10: Comparación de los parámetros S(2,1) del modelo circuital con la simulación de EMPro

Como podemos observar en la gráfica 10 tenemos dos simulaciones muy parecidas, en ADS no podemos realizar la simulación EM debido a los cambios de altura de la pieza 3D pero con la simulación electromagnética realizada en EMPro hemos conseguido que la atenuación sea mayor y el desplazamiento de la banda de rechazo se reduzca un poco y se aproxime a la frecuencia de 2 GHz.

4.2.4 Proceso de fabricación de la pieza de impresión 3D

Para que la impresora sea capaz de imprimir nuestra pieza tenemos que convertirla en un archivo .stl, este archivo divide nuestra pieza de impresión 3D en capas.

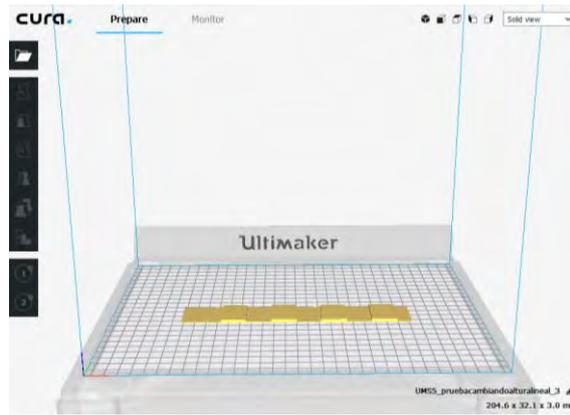


Figura 28: Diseño en Cura del circuito de test con cambio de altura (A)

La division en capas:

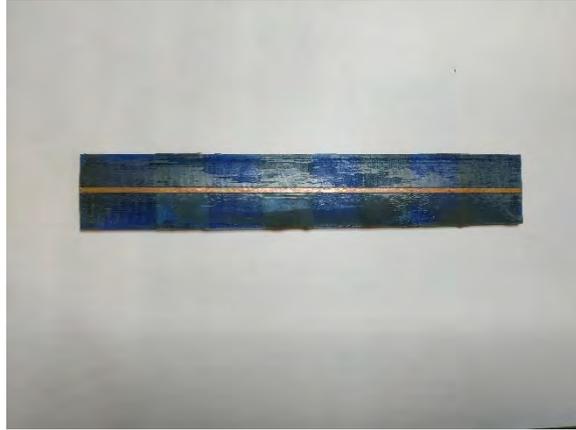


Figura 29: Diseño en Cura del circuito de test con cambio de altura (B)

El proceso de fabricación de la estructura periódica completa lo encontraremos en el Anexo D.

4.2.5 Medidas del dispositivo fabricado

Una vez que tengamos el circuito diseñado es el momento de tomar las medidas del mismo.



(a)

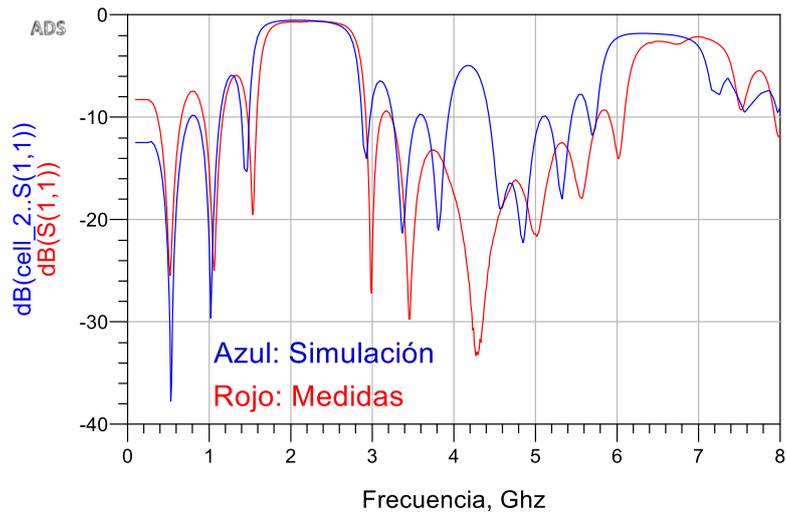


(b)

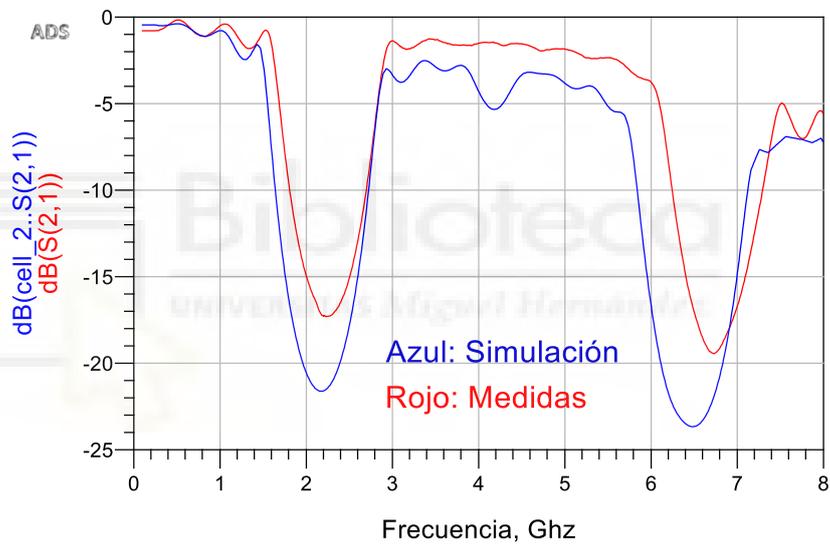
Figura 30: (a) Diseño final con cambio de altura. (b) Cara bottom

Para ello vamos a utilizar, como hemos dicho anteriormente en el apartado 3.3, el analizador de redes vectorial E8363B de la marca Keysight.

Vamos a realizar una comparación entre los resultados obtenidos en EMPro y las medidas obtenidas después de fabricar el circuito.



Gráfica 11: Comparación de los parámetros S(1,1) del diseño final con cambio de altura



Gráfica 12: Comparación de los parámetros S(2,1) del diseño final con cambio de altura

Como podemos observar en la gráfica 12 (gráfica roja) hemos conseguido una atenuación por debajo de -15 dB.

Los resultados obtenidos después de la fabricación del circuito (gráfica roja) son muy satisfactorios en comparación con los de EMPro (gráfica azul), como podemos observar hemos perdido un poco de atenuación, por debajo de -15 dB, en la banda de rechazo debido a las pérdidas generadas

por la fabricación. Estas pérdidas pueden ser debidas a los cables utilizados, conectores, capas de aire que se pueden crear entre el substrato y la hoja de cobre, etc.





CAPÍTULO 5. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE CIRCUITOS PASIVOS DE MICROONDAS EN UN SUBSTRATO CON GEOMETRÍA PERIÓDICA

En este capítulo vamos a diseñar y fabricar dos circuitos pasivos de microondas mejorando las prestaciones de los mismos aplicando una estructura periódica. El primer circuito de alta frecuencia que vamos a realizar es un filtro paso bajo mediante líneas de transmisión aplicando las transformaciones de Richard. El segundo diseño será un filtro paso banda mediante la utilización de líneas acopladas.

5.1 FILTRO PASO BAJO

Primeramente, vamos a realizar el diseño teórico del filtro aplicando las transformaciones de Richard, después lo simularemos en ADS y EMPro. Cuando el diseño del circuito esté terminado lo fabricaremos con la impresora 3D y, para finalizar, realizaremos las medidas finales del circuito implementado.

5.1.1 Diseño teórico

Las especificaciones del filtro paso bajo son las siguientes; frecuencia de corte de 2GHz, orden del filtro 3, impedancia de 50 Ohm y rizado constante de 0.5 dB.

Lo primero que debemos hacer es irnos a la tabla en las que se encuentran los valores tabulados de los g_k . Existen distintas tablas dependiendo de la respuesta de los filtros. Se deben obtener las g_k de la tabla de rizado constante 0.5dB y con el orden del filtro obtener:

$$g_0 = 1.0000$$

$$g_1 = 1.5963$$

$$g_2 = 1.0967$$

$$g_3 = 1.5963$$

$$g_4 = 1.0000$$

Tras esto debemos aplicar el sistema de ecuaciones de las identidades de Kuroda:

$$n^2 = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$$

$$\frac{Z_1}{n^2} = A$$

$$\frac{Z_2}{n^2} = B$$

Donde para nuestro caso $A = 1.5963$ y $B = 1$, despejando el sistema de ecuaciones obtenemos que:

$$Z_1 = 2.595$$

$$Z_2 = 1.626$$

Para finalizar con el diseño teórico debemos desnormalizar en frecuencia e impedancia.

$$Z_1 = 129.75$$

$$Z_2 = 81.3$$

5.1.2 Diseño en ADS

Una vez tenemos el diseño teórico del filtro paso bajo se realiza la implementación del circuito en ADS. En primer lugar, vamos a simular el filtro paso bajo con líneas ideales. Para ello utilizaremos el elemento TLIN de la librería para cada una de las líneas que hemos obtenido.

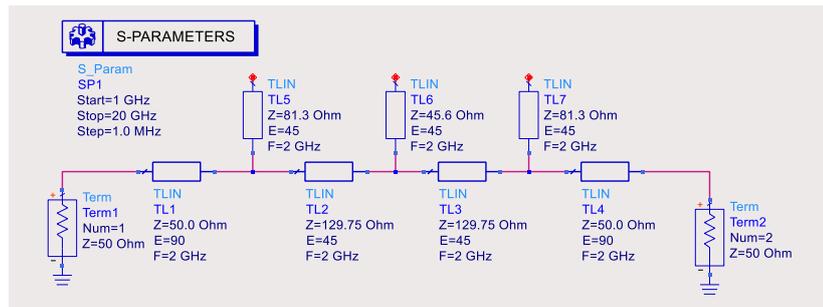
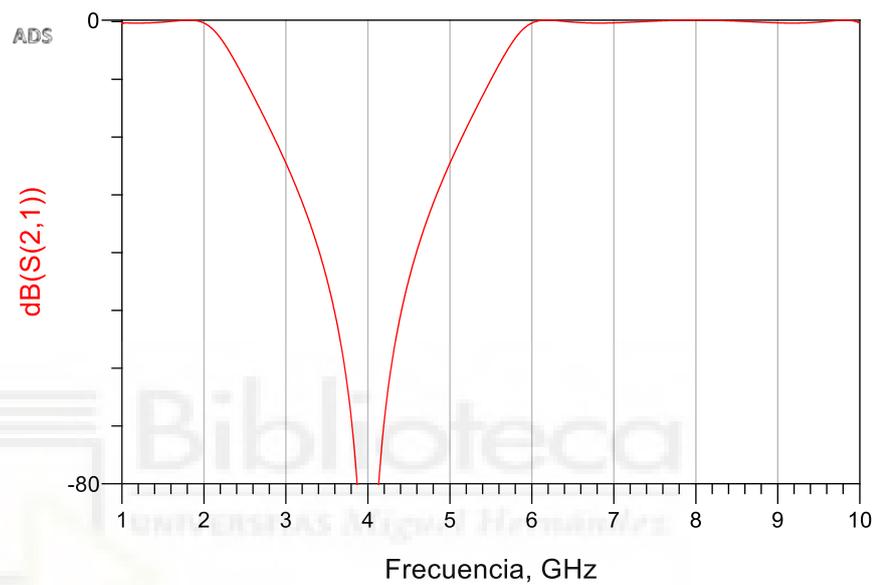


Figura 31: Diseño filtro paso bajo en ADS con líneas ideales



Gráfica 13: Simulación de parámetro S(2,1) del diseño del filtro paso bajo en ADS con líneas ideales

Ahora vamos a diseñar el filtro paso bajo real. Para ello, debemos cambiar las TLIN de las líneas en abierto por MLOC. Las líneas restantes debemos sustituirlas por MLIN. También debemos añadir a ADS un sustrato con las características en las que vamos a trabajar.

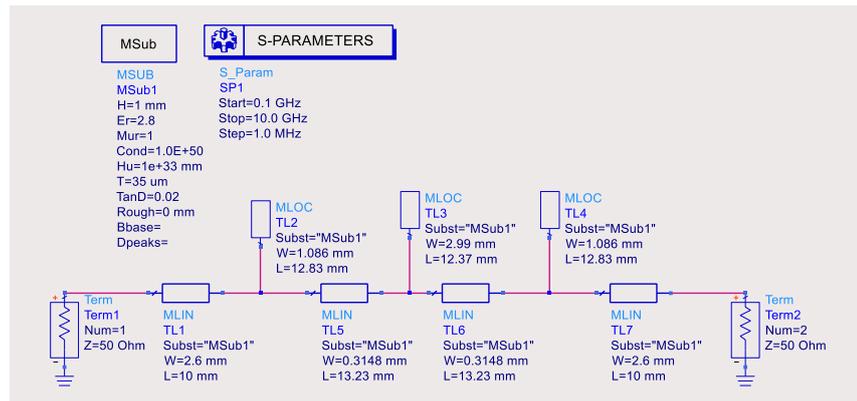
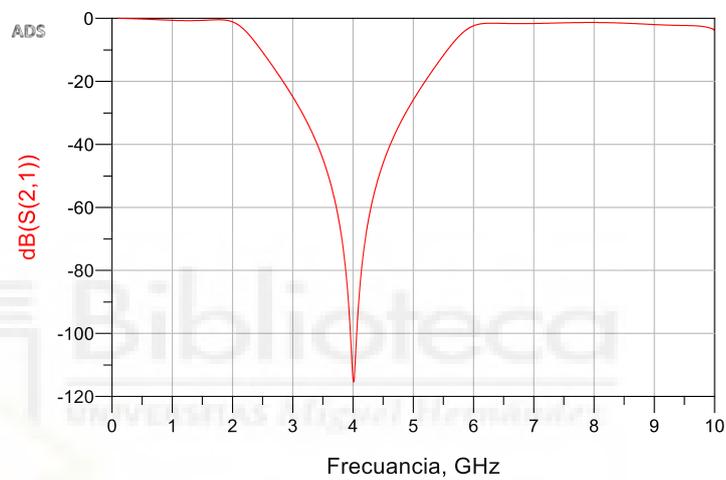


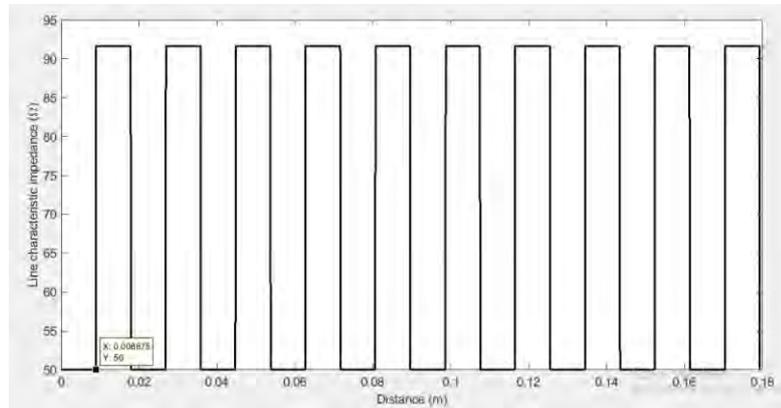
Figura 32: Diseño filtro paso bajo en ADS con líneas reales



Gráfica 14: Simulación del parámetro S (2,1) del diseño filtro paso bajo en ADS con líneas reales

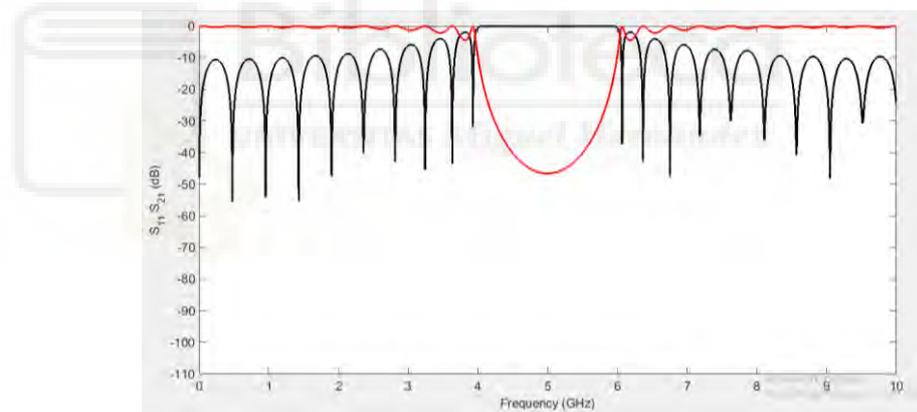
Para mejorar las características del filtro aplicando las estructuras periódicas, se implementa un band gap a la frecuencia de 5 GHz aproximadamente, para conseguir atenuar la frecuencia del primer armónico. Atenuaremos la banda de frecuencias en torno a la frecuencia de dicho band gap. Para realizar el band gap a 5 GHz debemos irnos primero a LineCalc en ADS y calcular el valor del cambio de impedancia. Cuando lo tengamos podremos saber la Z_{amp} que tenemos que poner en el código de Matlab. Una vez pongamos este valor solo tenemos que ir variando los periodos y los ciclos de cada periodo de la gráfica de la

variación de impedancia que obtenemos en Matlab para que tengamos una atenuación elevada, teniendo siempre en cuenta el tamaño total de la placa.



Gráfica 15: Señal cuadrada que representa el cambio de impedancia necesario para obtener el cambio de altura de la estructura periódica

La atenuación que estamos buscando en esta banda de frecuencia es de unos -20dB como mínimo.



Gráfica 16: Banda de rechazo generada en Matlab para el filtro paso bajo

Como hemos explicado anteriormente el ancho de la línea de 50 ohm se obtiene en ADS con la herramienta LineCalc mientras que la longitud del periodo de la estructura periódica se obtiene de la gráfica de Matlab, la distancia que se mantiene en cada cambio de impedancia es de 8.875 mm como podemos observar en la gráfica 15. El diseño final del band gap a 5 GHz es el siguiente:

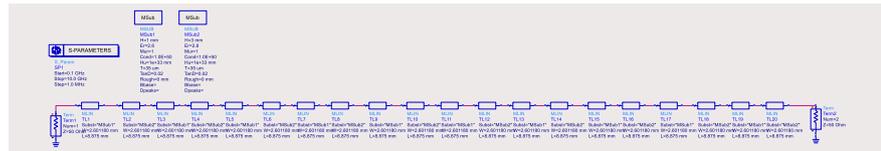
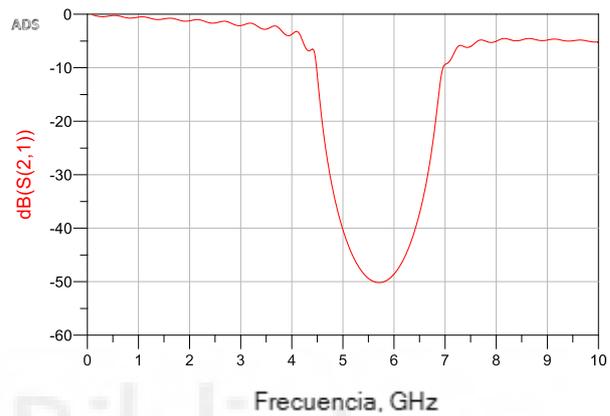


Figura 33: Diseño banda de rechazo a 5GHz en ADS

Como vamos a cambiar la altura, debemos añadir dos substratos distintos uno con una altura de 1 mm y otro con altura de 3 mm, e ir alternándolos.



Gráfica 17: Banda de rechazo generada en ADS para el filtro paso bajo

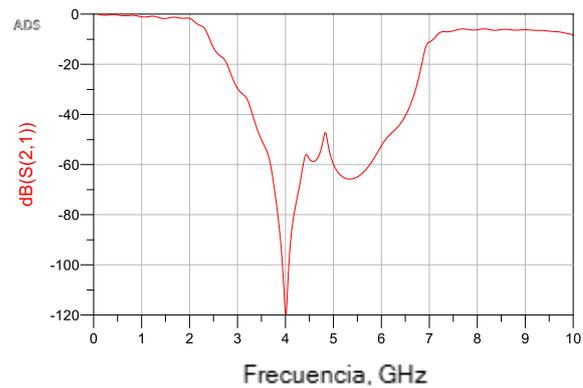
El band gap se ha desplazado como podemos observar en la gráfica 17, esto es debido a que hemos realizado una simulación real añadiendo substratos en ADS.

El siguiente paso es añadir el band gap y el filtro en serie en el mismo esquemático:

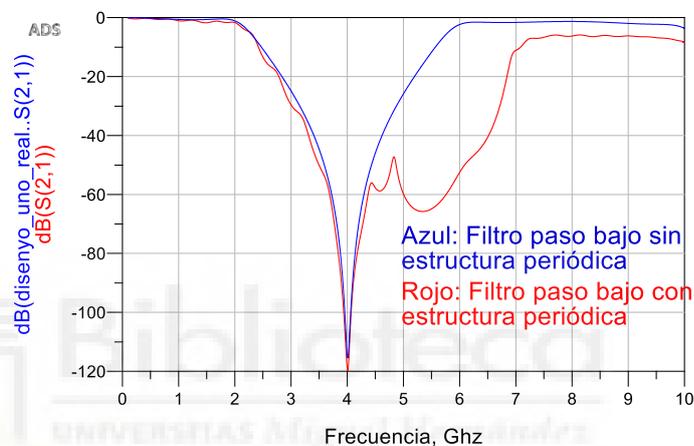


Figura 34: Diseño en ADS de banda de rechazo en serie con filtro paso bajo

Una vez diseñado realizamos la simulación:



Gráfica 18: Gráfica en ADS del para metro S(2,1) con la banda de rechazo en serie con filtro paso bajo



Gráfica 19: Comparación filtro paso bajo con estructura periódica y sin estructura periódica

Como podemos observar en la gráfica 19 al añadir el filtro en serie con el band gap (gráfica roja) hemos conseguido atenuar de forma considerable la banda de frecuencias deseada.

5.1.3 Diseño en EMPro

Una vez obtenida la respuesta en ADS del filtro paso bajo y aumentada la banda de rechazo, se realiza la implementación en EMPro, añadiendo la estructura periódica en el tamaño total del filtro paso bajo. El tamaño del filtro paso bajo es de 31.622 mm, como cada periodo tiene una longitud de

17.75 mm en nuestro diseño podemos colocar dos periodos de la estructura periódica. Para conseguir mejor atenuación vamos a añadir un periodo al principio y otro al final.

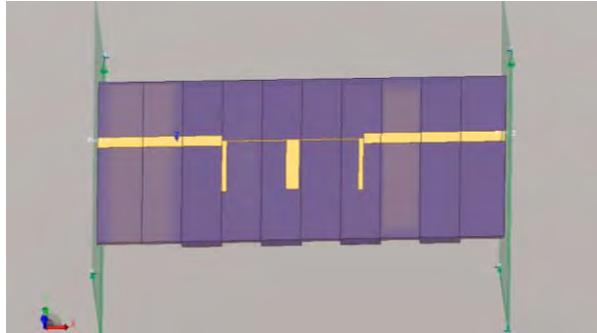
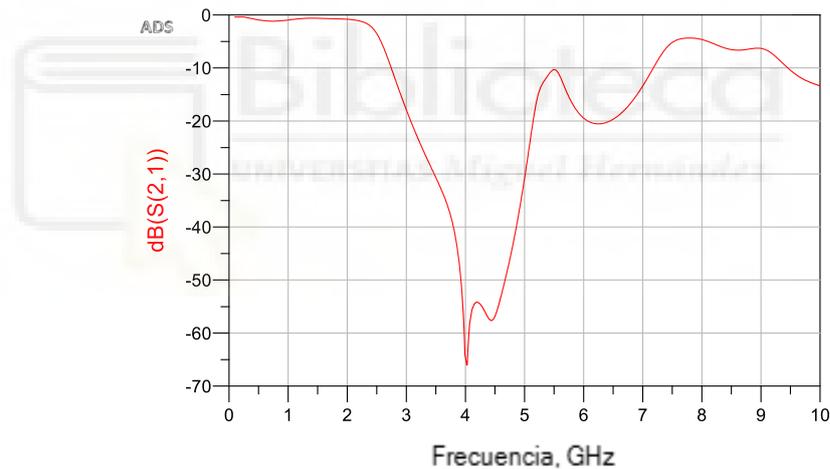


Figura 35: Diseño en EMPro del filtro paso bajo con cambio de altura

El resultado de la simulación es el siguiente:



Gráfica 20: Simulación del parámetro S(2,1) en EMPro del filtro implementado

Como podemos observar en la gráfica 20, tras diseñar el circuito en EMPro hemos conseguido atenuar la banda de frecuencias que deseábamos sin modificar las características de nuestro filtro paso bajo, por lo que ahora es más selectivo.

5.1.4 Proceso de fabricación y medidas

El proceso de fabricación de la estructura periódica viene en el Anexo D de este Trabajo Fin de Grado.

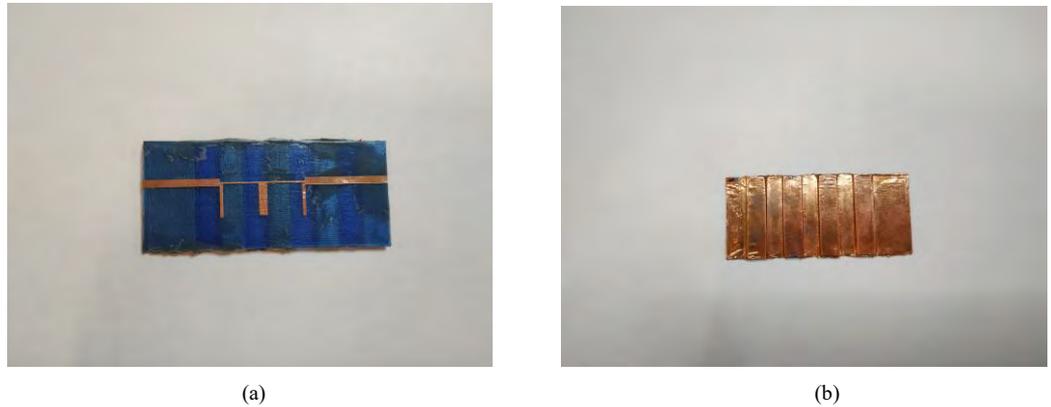
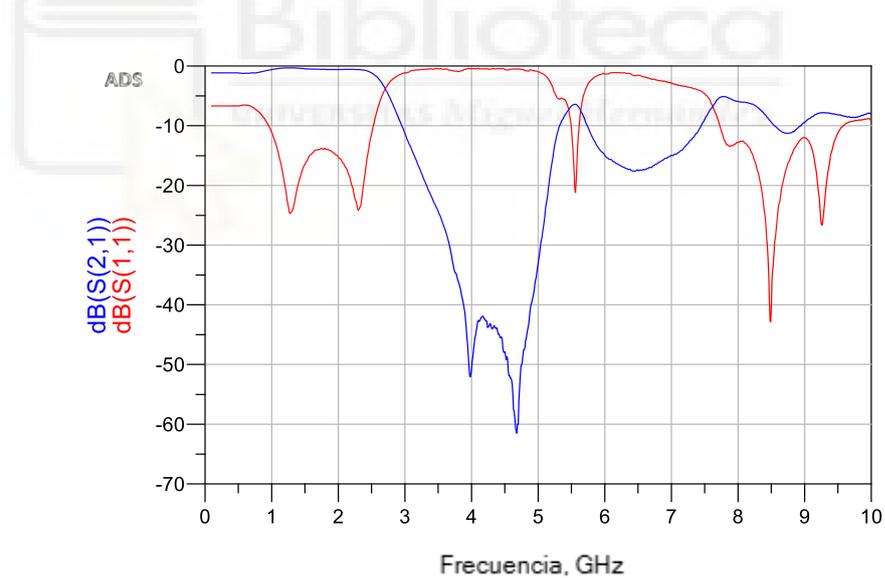


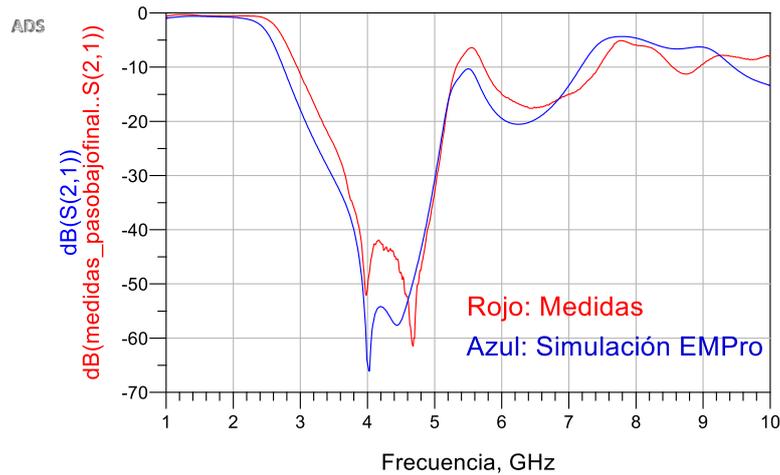
Figura 36: (a) Diseño final circuito paso bajo. (b) Diseño final circuito paso bajo cara bottom

Ahora que tenemos la pieza diseñada vamos a pasar a realizar las medidas de las misma en el analizador vectorial de redes.



Gráfica 21: Gráfica en ADS de los parámetros S(2,1) y S(1,1) obtenidos de las medidas realizadas al circuito paso bajo final.

Vamos a realizar una comparación de la simulación obtenida en EMPro y las medidas obtenidas en el analizador vectorial de redes:



Gráfica 22: Comparación en ADS de los parámetros S(2,1) de las medidas del filtro final y la simulación de EMPro

Los resultados obtenidos después de la fabricación del circuito (gráfica roja) son muy satisfactorios en comparación con los de EMPro (gráfica azul), como podemos observar hemos perdido un poco de atenuación, por debajo de -50 dB, en la banda de rechazo debido a las pérdidas generadas por la fabricación. Estas pérdidas pueden ser debidas a los cables utilizados, conectores, capas de aire que se pueden crear entre el sustrato y la hoja de cobre, etc.

5.2 FILTRO PASO BANDA

El segundo diseño que vamos a realizar es un filtro paso banda mediante la utilización de líneas acopladas. En primer lugar, realizaremos el diseño teórico del mismo, después lo simularemos en ADS y EMPro y, por último, cuando el diseño del circuito esté terminado lo fabricaremos con la impresora 3D y realizaremos las medidas finales.

5.2.1 Diseño teórico

Vamos a diseñar un filtro paso-banda mediante líneas acopladas con $N=3$ y 0.5 dB de rizado constante en la banda de paso. La frecuencia central es de 2 GHz, el ancho de banda es de 10% ($\Delta = 0.1$), $Z_0= 50 \Omega$.

Lo primero que debemos hacer es coger los valores de los elementos de la tabla de Chebychev de rizado 0.5dB y aplicamos las fórmulas para el cálculo de las impedancias pares e impares.

Las fórmulas que vamos a necesitar son las siguientes:

$$Z_0J_1 = \sqrt{\frac{\pi\Delta}{2g_1}}$$

$$Z_0J_n = \frac{\pi\Delta}{2\sqrt{g_{n-1}g_n}} \text{ para } n = 2, 3, \dots, N$$

$$Z_0J_{N+1} = \sqrt{\frac{\pi\Delta}{2g_Ng_{N+1}}}$$

$$Z_{0e} = Z_0[1 + JZ_0 + (JZ_0)^2]$$

$$Z_{0o} = Z_0[1 - JZ_0 + (JZ_0)^2]$$

Con los valores de g_n y las fórmulas de arriba calculamos todos los valores que necesitamos para el diseño del filtro.

n	g_n	Z_0J_n	$Z_{0e} (\Omega)$	$Z_{0o} (\Omega)$
1	1.5963	0.3137	70.61	39.24
2	1.0967	0.1187	56.64	44.77
3	1.5963	0.1187	56.64	44.77
4	1.0000	0.3137	70.61	39.24

Tabla 1: Valores necesarios para el diseño del filtro paso banda

5.2.2 Diseño en ADS

Ahora una vez que tenemos el diseño teórico del filtro paso banda lo pasamos a ADS. Lo primero que vamos a implementar es el filtro ideal. Para ello utilizaremos los elementos de la librería de ADS, TLIN y CLIN.

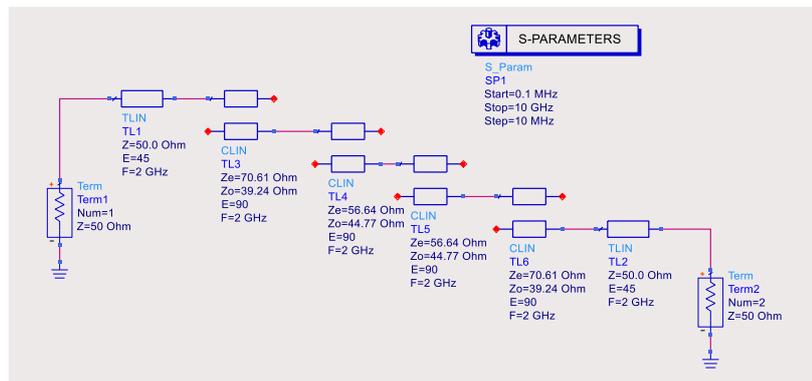
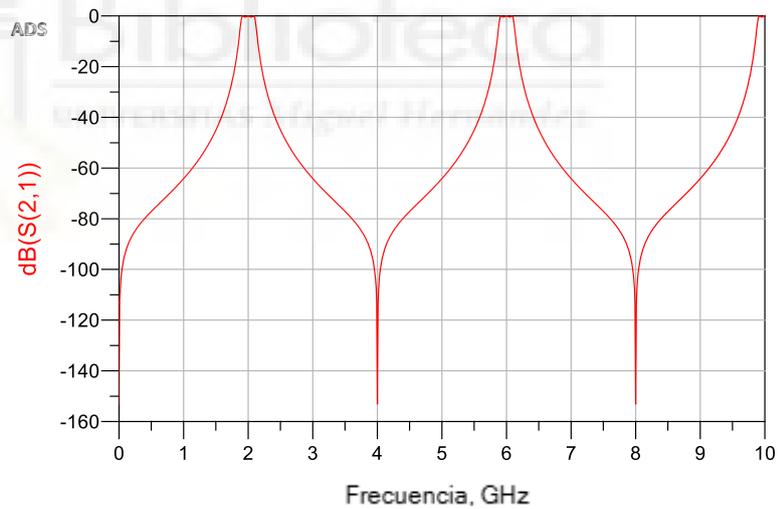


Figura 37: Diseño filtro paso banda en ADS con líneas ideales



Gráfica 23. Parámetro S(2,1) del diseño filtro paso banda en ADS con líneas ideales.

Esta simulación no es la que debemos fabricar ya que como hemos comentado es la simulación ideal. Ahora debemos realizar el diseño del filtro real utilizando líneas de transmisión microstrip. Para ello debemos cambiar los elementos TLIN y CLIN por MLIN y MCLIN,

respectivamente. Además, debemos añadir un sustrato con las características con las que trabajaremos, en este caso el PLA con $\epsilon_r=2.8$, $H=1\text{ mm}$, $T=35\text{ }\mu\text{m}$ y $TanD=0.02$.

A partir de los valores de Z_{0e} , Z_{0o} , la frecuencia y con la ayuda de la herramienta LineCalc de ADS se obtienen las dimensiones físicas de cada uno de los tramos de líneas acopladas; longitud, anchura y separación entre líneas.

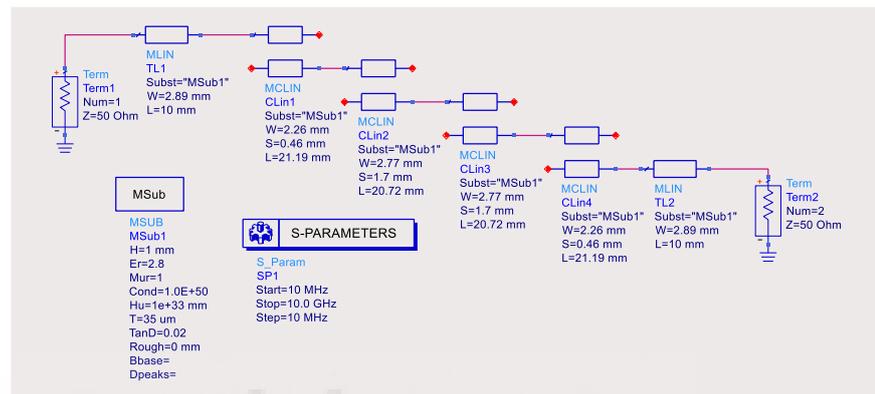
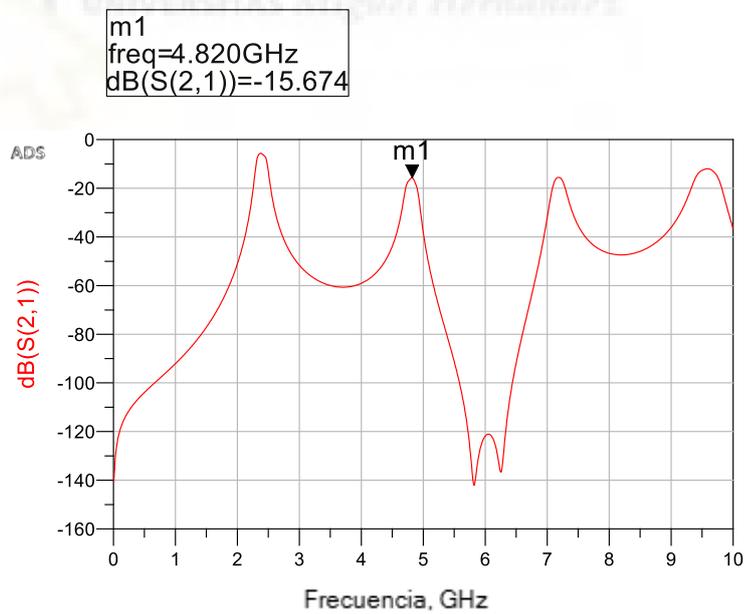


Figura 38: Diseño filtro paso banda en ADS con líneas reales



Gráfica 24. Parámetro S(2,1) del diseño filtro paso banda en ADS con líneas reales.

En la gráfica 24 se muestra la simulación del filtro implementado, donde aparecen varios armónicos a la frecuencia de 4.82 GHz, 7.1 GHz y 9 GHz. Para conseguir un filtro más selectivo en frecuencia, se diseña un band gap en torno a la frecuencia de 4.82 GHz para conseguir atenuar el primer armónico. Como hemos podido observar en el diseño del filtro paso bajo del apartado 5.1.2 el band gap se desplaza cuando lo diseñamos en ADS. Por tanto, vamos a realizar dos band gap, uno a la frecuencia de 4 GHz y otro a la de 5 GHz, realizaremos una comparación de los resultados en ambos casos y nos quedaremos con el que obtengamos un filtro más selectivo en frecuencia.

En primer lugar, realizaremos un band gap de 5GHz.

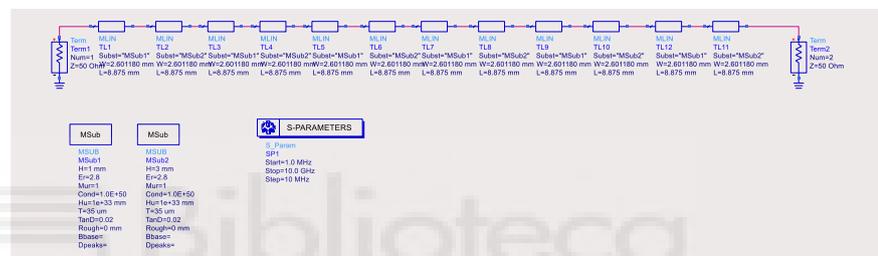
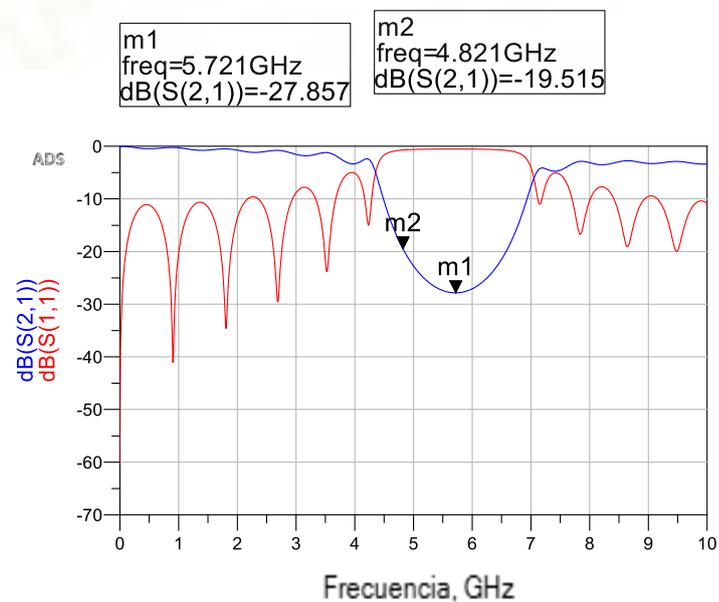
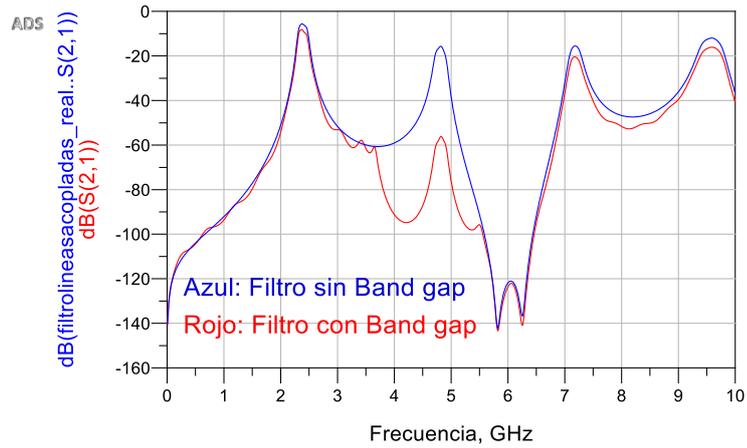


Figura 39: Diseño en ADS de la banda de rechazo a 5GHz.

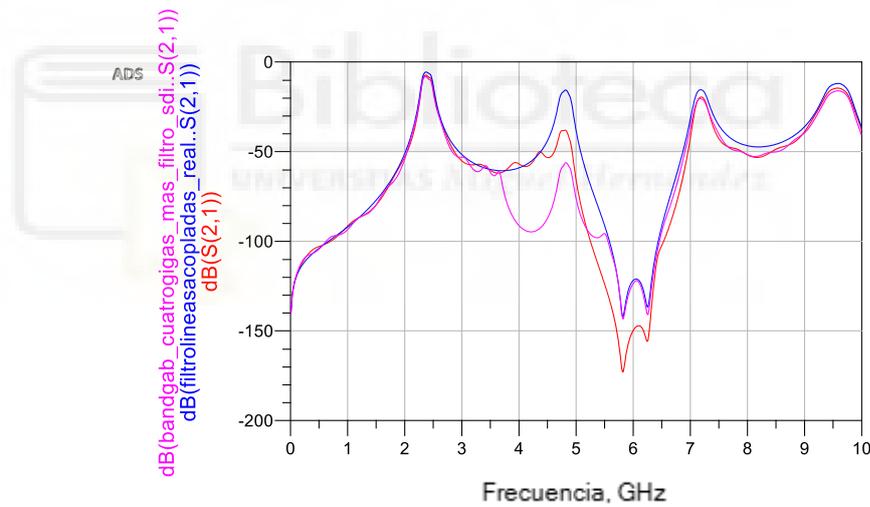


Gráfica 25: Parámetros S del diseño de la banda de rechazo a 5GHz



Gráfica 28: Comparación parámetros S(2,1) del filtro paso banda con el filtro paso banda en serie con la banda de rechazo a 4 GHz.

Como podemos observar con el band gap de 4 GHz conseguimos mejor atenuación. Para que esto quede más claro vamos a realizar una comparación entre los resultados obtenidos.



Gráfica 29: Comparación de los parámetros S(2,1) de los tres diseños paso banda

La gráfica roja nos muestra el filtro paso banda real con el band gap a 5 GHz, la gráfica de color rosa muestra el filtro paso banda real con el band gap a 4 GHz y la azul es la gráfica del filtro paso banda ideal.

5.2.3 Diseño en EMPro

Como hemos podido comprobar en el apartado anterior el band gap que más atenúa el primer armónico es el de 4GHz. La longitud de cada periodo del band gap es de 22.24 mm y la longitud total del filtro es de 83.82 mm, por lo tanto, el número de periodos que podemos incluir en la estructura son 4.

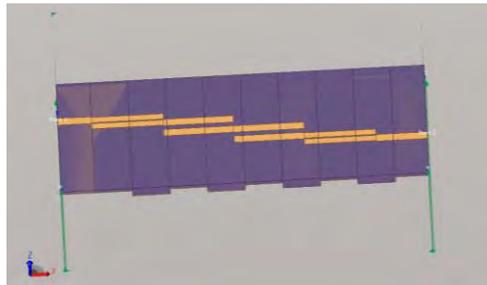
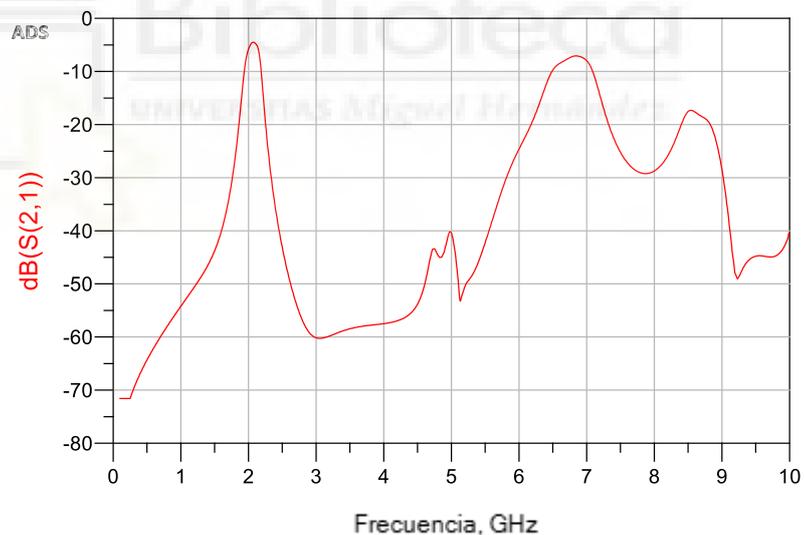


Figura 43: Diseño en EMPro del filtro paso banda con cambio de altura



Gráfica 30: Parámetro S (2,1) del diseño en EMPro del filtro paso banda

Como podemos observar en la gráfica 30 hemos conseguido suprimir el primer armónico hasta una atenuación de 40 dB, sin modificar la longitud total del filtro.

5.2.4 Proceso de fabricación del filtro paso banda

Una vez realizado el proceso de fabricación de la estructura periódica (Anexo D), este es el resultado:

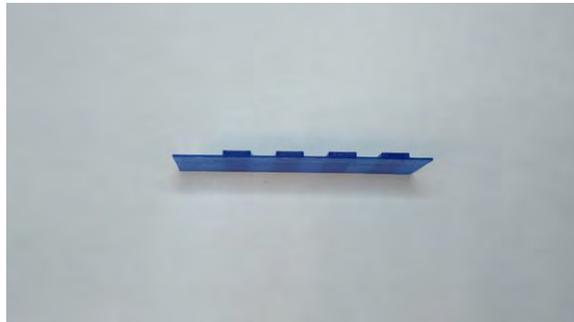


Figura 44: Filtro paso banda impreso por la impresora 3D

En el filtro paso bajo realizado en el apartado 5.1 hemos pegado la lámina de cobre a la superficie irregular mediante un adhesivo epoxy, el mayor inconveniente de este método es que pueden quedar zonas de aire entre la lámina de cobre y el PLA generando unas pérdidas adicionales en las medidas del filtro paso banda fabricado. Teniendo esto en cuenta vamos a realizar la metalización de la capa bottom con el spray 843AR-340G de MG Chemicals.



Figura 45: Spray 843AR-340G de MG Chemicals



Figura 46: Metalización filtro paso banda

Una vez que hemos dejado secar el spray de pintura de cobre tenemos que aumentar la conductividad del conductor ya que la pintura en spray añade una fina capa de cobre con una conductividad baja. Para depositar cobre a la superficie pintada con el spray se utiliza un proceso de galvanoplastia. Es decir, el cobre pasará del ánodo al cátodo depositándose en nuestra pieza. Colocamos la pieza en la pinza (cátodo) y la sumergimos casi por completo, sin introducir la pinza en el sulfato de cobre. Para que el proceso de galvanoplastia se realice de manera óptima necesitamos una fuente de corriente, el agitador consumirá 0.6mA.

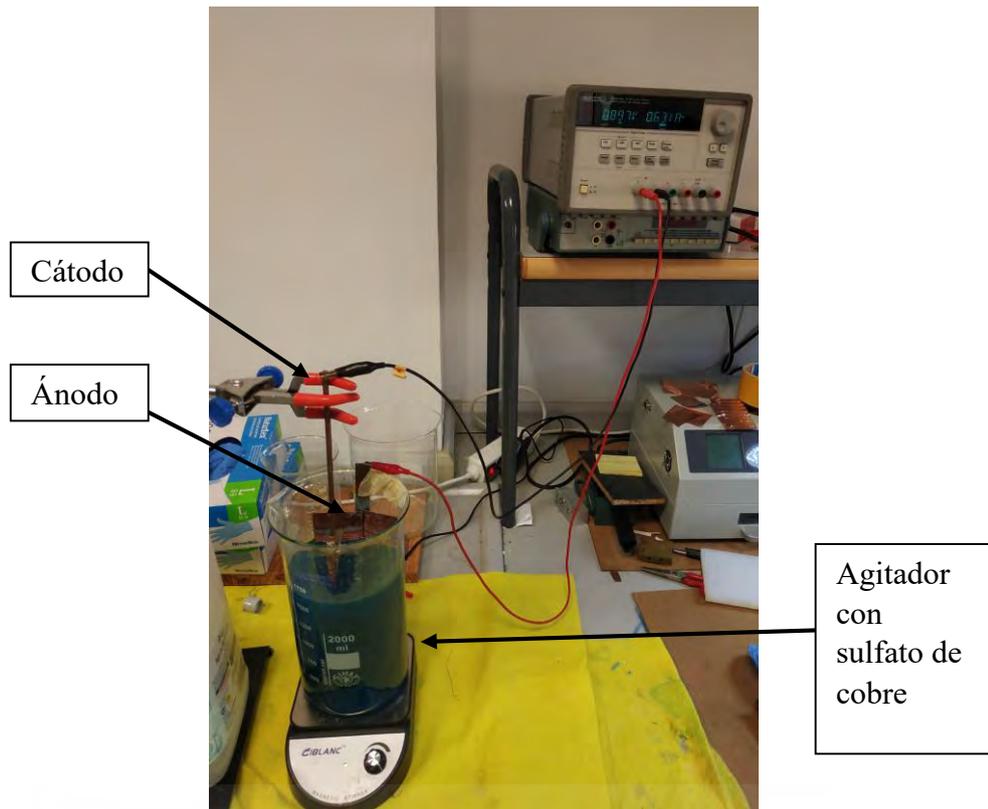


Figura 47: Metalización filtro paso banda utilizando el proceso de galvanoplastia.

Dejamos unos 10 min aproximadamente la pieza en el agitador. Con el paso del tiempo vemos que se está depositando una capa uniforme en la estructura. Cuando tengamos metalizada toda la pieza, la lavamos con agua destilada ya que si lo lavamos con agua normal al llevar minerales oxidaríamos el cobre. Una vez que esté limpio secamos y comprobamos que tenemos la misma conductividad que el cobre con un multímetro.



Figura 48: Metalización filtro paso banda tras su paso por el agitador

Una vez que tengamos la pieza metalizada por la cara bottom realizaremos la mezcla homogénea del adhesivo epoxi Scotch-Weld EC-2216 gray de 3M podemos empezar a aplicarla en nuestra pieza. Aplicamos una fina capa del adhesivo en la parte superior de la pieza con la ayuda del guante de látex. Una vez transcurridas las 12 horas, retiramos las maderas y el sargento. Tendremos que observar que nuestro substrato ya está totalmente metalizado. El cobre sobrante ya puede ser quitado.

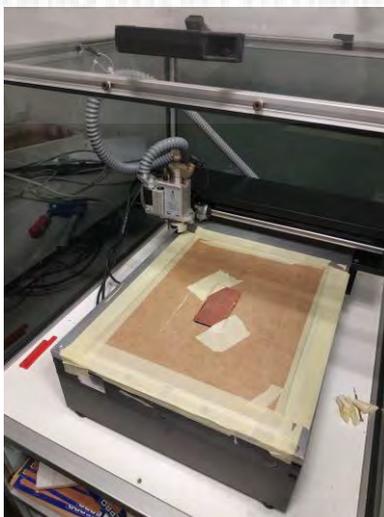


Figura 49: Fresado del filtro paso banda

Una vez que tenemos el circuito fresado, solo nos queda retirar la capa de cobre sobrante. Si el fresado se ha realizado correctamente no debería tener

problemas, aunque debemos realizar este paso con cuidado. Con unas tijeras o un cúter podemos realizar los últimos retoques para dejar la pieza lo más perfecta posible.

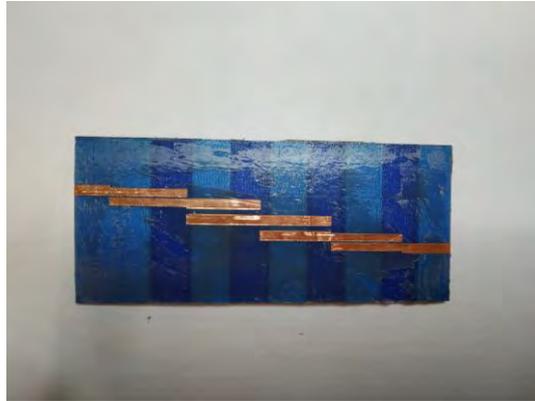
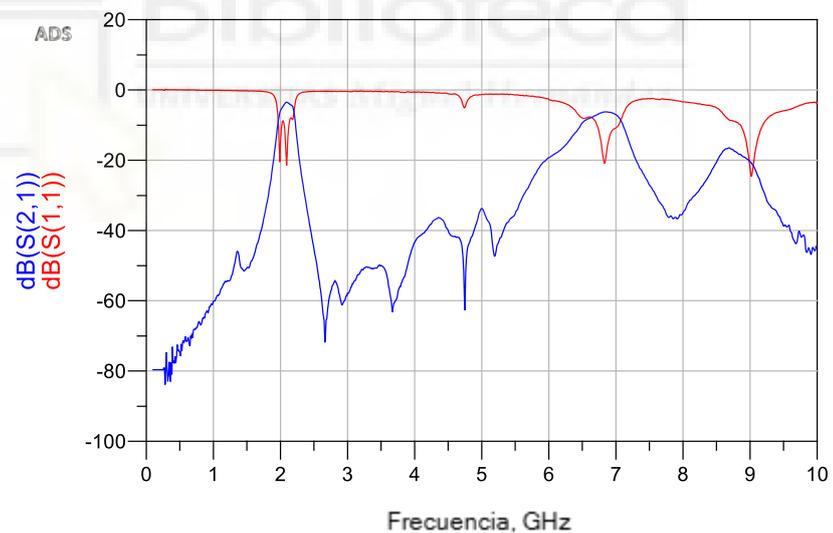


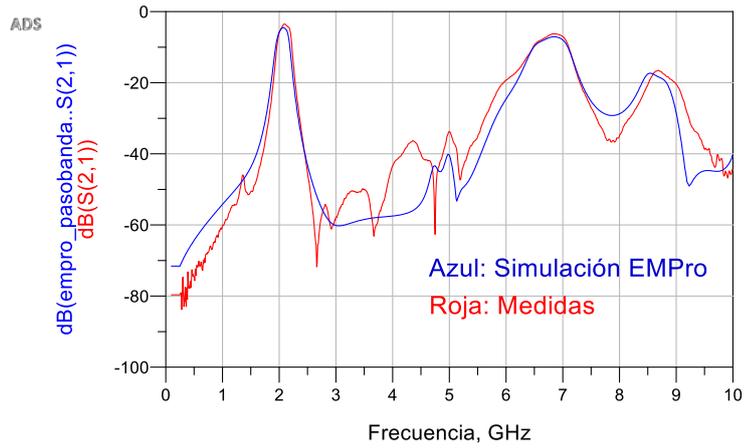
Figura 50: Filtro final fabricado

Ahora que tenemos la pieza diseñada vamos a pasar a realizar las medidas de las misma en el analizador vectorial de redes.



Gráfica 31: Parámetros S finales del diseño y fabricación filtro paso banda

Como podemos observar en la gráfica 31 hemos atenuado la primera réplica del filtro paso banda. Vamos a realizar una comparación con la simulación de EMPro.



Gráfica 32: Comparación de los parámetros S (2,1) de las medidas finales del filtro paso banda y la simulación de EMPro

Podemos observar en la gráfica 32 que la comparación entre la simulación de EMPro y las medidas finales es muy satisfactoria ya que ambas son muy parecidas, aunque es cierto que la gráfica de las medidas finales oscila más debido a las pérdidas generadas por la fabricación de la pieza y la toma de medidas, estas pérdidas pueden ser debidas a los cables utilizados, conectores, etc.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El objetivo de este capítulo va a ser comentar las conclusiones obtenidas del proyecto una vez finalizado y las líneas futuras de investigación teniendo en cuenta las conclusiones que hemos obtenido.

6.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado era implementar mediante una impresora 3D de bajo coste circuitos pasivos de microondas con geometría compleja mediante estructuras periódicas para generar una banda de rechazo a una frecuencia concreta y así, poder mejorar las características de los circuitos diseñados.

En primer lugar, Hemos conseguido realizar un buen calibrado de la impresora 3D que nos ha permitido generar diseños con unas dimensiones muy parecidas a las de los diseños creados por ordenador.

En segundo lugar, hemos realizado el diseño mediante software de unos circuitos de test con geometría periódicas que una vez impresos, metalizados y fresados generaban una banda de rechazo con un ancho de banda y una atenuación óptimas.

Además, hemos sido capaces de metalizar una pieza de impresión 3D con geometría compleja utilizando dos tipos de técnicas; la primera mediante láminas de cobre de 35 micras y, la segunda, mediante la utilización de un spray y un proceso de galvanoplastia. Hemos utilizado una metalización con spray en el diseño del filtro paso banda porque la metalización con las láminas de cobre generaba unas pérdidas adicionales muy grandes, debido a que no se realizó el pegado del epoxy de manera correcta y esto generó unas zonas de aire entre la lámina de cobre y el PLA.

Para concluir, hemos diseñado y fabricado dos filtros pasivos de microondas, uno paso bajo y otro paso banda, que con la modificación del substrato e incluyendo

estructuras periódicas hemos sido capaces de mejorar las características de los mismos consiguiendo atenuar el primer armónico de los filtros implementados. Aunque tenemos pérdidas debidas al material utilizado, a la metalización de la pieza, los conectores utilizados, etc., podemos concluir que los resultados han sido bastante satisfactorios.

Como conclusión general del proyecto, el uso de las impresoras 3D nos abre un abanico de posibilidades enorme a la hora de fabricar y diseñar circuitos de alta frecuencia ya que hasta hace poco solo podíamos realizar los diseños con geometría plana utilizando substratos comerciales.

6.2 LÍNEAS FUTURAS

Una vez finalizado el proyecto y analizando los resultados del mismo, se presenta la posibilidad de extraer unas líneas futuras de investigación que pueden dar una continuidad a este Trabajo Final de Grado.

En primer lugar, una primera línea futura de investigación sería utilizar filamentos 3D con menos pérdidas como por ejemplo los filamentos de RF de la empresa Preperm.

En segundo lugar, otra posible línea futura sería poder diseñar y fabricar unas estructuras vacías que reducirían las perdidas ya que las ondas irían por el aire, otra opción sería modificar la ϵ_r del material jugando con dos materiales distintos, donde el contraste de ϵ_r sea mayor.

Estas son algunas de las opciones que deberían de estudiarse para poder conseguir unos mejores resultados.

ANEXOS.

ANEXO A: CÓDIGO DE MATLAB UTILIZADO PARA LAS SIMULACIONES.

```
close all, clear all,
epsr=2.8; %épsilon r va a cambiar dependiendo de que
material utilicemos en PLA = 2.8
c=3e8; %Velocidad de la luz en el vacío
f_dis=2e9; %frecuencia a la que vamos a trabajar en este
caso 2GHz
lambda_dis=c/(f_dis*sqrt(epsr)) %Esta fórmula sale de la
TEORIA. Es la formula (2.84)
%lambda_dis1=lambda_dis/4

Z0=50;
ZL=50; %La baja impedancia
Z_amp=20.8265; % Variamos la impedancia . (La amplitud va
desde ZL+Z_amp a ZL-Z_amp)
paso=lambda_dis/1000;
l=0:paso:2*lambda_dis;
l(end)
%Zc=ZL+Z_amp*sin(2*pi*l/lambda_dis*4.2);
%Zc=ZL+Z_amp*cos(2*pi*l/lambda_dis*4.2);
Zc=ZL+(-Z_amp*sqrt(2*pi*(1/lambda_dis*5)))+Z_amp;
%Zc=ZL+3*Z_amp*sin(2*pi*l/lambda_dis*2)+2*Z_amp*sin(2*pi*l/
lambda_dis*3)+1.15*Z_amp*sin(2*pi*l/lambda_dis*5.2);
%Zc=ZL+3.15*Z_amp*sin(2*pi*l/lambda_dis*5.2);
f=0:f_dis/1000:5*f_dis;
Z_in=Z0*ones(size(f));
for con=1:length(Zc)

Z_in=Zc(con)*(Z_in+1i*Zc(con)*tan(2*pi*f*sqrt(epsr)/c*paso)
)./(Zc(con)+1i*Z_in.*tan(2*pi*f*sqrt(epsr)/c*paso));
    %Calcula los parámetros S
end
s11=abs(((Z_in-Z0)./(Z_in+Z0)));
s21=sqrt(1-s11.^2); %Relación entre parámetro s21 y s11
s22=s11; %%%%%Como es pasivo y simétrico se cumple estas
dos igualdades
s12=s21;
for con=1:length(f) %Formar la matriz de parámetros S
```

```

    B(:, :, con)=[s11(con) s12(con); s21(con) s22(con)];
end
%txdata = rfdata.data;
%txdata.S_Parameters = B;
%txdata.Freq=f;
%write(txdata, 'Ejemplo3.s2p');
s11=20*log10(s11); %Para pasarlo a DB
s22=20*log10(s22);
s21=20*log10(s21);
s12=20*log10(s12);
figure,plot(f/1e9,s11,'k','linewidth',2);hold on;
plot(f/1e9,s21,'r','linewidth',2);
axis([0 max(f)/1e9 -110 0]);
h=gca;
set(h, 'FontSize',14);
xlabel('Frequency (GHz)', 'FontSize',14);
ylabel('S_{11} S_{21} (dB)', 'FontSize',14);
figure,plot(l,Zc,'k','linewidth',2);
h=gca;
set(h, 'FontSize',14);
xlabel('Distance (m)', 'FontSize',14);
ylabel('Line characteristic impedance
(\Omega)', 'FontSize',14);
warning off

```



ANEXO B: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DEL ADHESIVO EPOXI

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

1. 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.
2. 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 30 days 90 days	2950 psi 1985 psi 1505 psi	— 1390 psi —
*Salt Spray @ 75°F (24°C)	14 days 30 days 60 days	2300 psi 500 psi 300 psi	— 1260 psi —
Tap Water @ 75°F (24°C)	14 days 30 days 90 days	3120 psi 2942 psi 2075 psi	— 1950 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

ANEXO C: HOJA DE CARACTERÍSTICAS DEL SPRAY



Super Shield™ Silver Coated Copper Conductive Coating 843AR Technical Data Sheet

ISO 9001:2008 Registered Quality System, Burlington, Ontario, CANADA SAI Global File: 004008

834AR-Aerosol

Description

The 843AR *Super Shield™ Silver Coated Copper Conductive Coating* is a one-part durable acrylic lacquer pigmented with a highly conductive silver coated copper flake, packaged in convenient aerosol format. It utilizes a ready to spray, solvent based system, with no heat cure necessary. The cured coating is smooth, hard, and abrasion resistant. It provides good adhesion to plastics, excellent conductivity, and high frequency shielding.

Applications & Usages

The 843AR is designed to provide a conductive coating to the interior of plastic electronic enclosures to suppress EMI/RFI emissions. It excels when superior levels of shielding are required.

The 843AR is commonly used by manufacturers of these devices:

- Sensors
- Controllers
- Receivers
- Test Equipment
- Scientific equipment
- Medical Equipment
- Communication devices
- Satellite dishes and radar systems
- Antennas
- Aerospace applications
- Electric vehicles
- Networking gear, firewalls
- Military equipment
- Cellphones, laptops, PDA's
- GPS's, navigation systems
- TV's, monitor's, and displays
- Consumer electronics
- Electronic sporting equipment
- Audio equipment
- Electric guitars and other amplified instruments
- Drones and other RC vehicles

Other applications for 843AR include:

- Repairing damage to existing shielding
- Conductive undercoat for electroplating
- Providing electric continuity for circuits

Benefits and Features

- **UL Recognized** (File # [E202609](#))
- **Provides strong EMI/RFI shielding over a broad frequency range**
- **Volume resistivity of 0.00047 Ω·cm**
- **Smooth, durable, and abrasion resistant**
- **Available in liquid format**
- **Quick dry time, no heat cure required**
- **Mild solvent system**
- **Strong adhesion to ABS, acrylic, polycarbonate, and other injection molded plastics**
- **Excellent adhesion to wood and ceramics**
- **Low VOC; HAP Free; Does not contain toluene, xylene, or MEK**



ENVIRONMENT
RoHS Compliant
Low-VOC



Super Shield™ Silver Coated Copper Conductive Coating 843AR Technical Data Sheet

ISO 9001:2008 Registered Quality System, Burlington, Ontario, CANADA SAI Global File: 004008

834AR-Aerosol

Usage Parameters

Properties	Value
Recoat Time (Liquid)	3 min
Drying Time @22 °C [72 °F]	24 h
Drying Time @65 °C [149 °F]	30 min
Shelf Life	2 y
Theoretical 340G Spray	≤3 170 cm ²
Can Coverage ^{a)}	≤490 in ²

a) Idealized estimate based on a coat thickness of 50 μm [2.0 mil] and 50% transfer efficiency

Temperature Ranges

Properties	Value
Constant Service Temperature	-40 to 120 °C [-40 to 248 °F]
Intermittent Temperature Limits	-50 to 125 °C [-58 to 257 °F]
Storage Temperature Limits ^{b)}	-5 to 40 °C [23 to 104°F]

b) The product must stay within the storage temperature limits stated. **ATTENTION!** Aerosol container will be crushed at ≤-26.5 °C [≤15.7 °F].

Principal Components

Name	CAS Number
Silvered Copper	7440-22-4 + 7440-50-8
Acrylic Resin	25608-33-7
Acetone	67-64-1
Dimethyl carbonate	616-38-6
Heptan-2-one	110-43-0

Properties of Cured 843AR

Electrical & Magnetic Properties	Method	Value
Volume Resistivity @1.7 mil	Method 5011.5 in MIL-STD-883H	0.00047 Ω·cm 2 174 S/cm
Surface Resistivity @1.7 mil	"	0.11 Ω/sq
Surface Resistance ^{a)}		<i>Resistance</i> <i>Conductance</i>
1 coat @1.5 mil	square probe	0.25 Ω/sq 3.9 S
2 coats @2.5 mil	square probe	0.10 Ω/sq 9.6 S
3 coats @3.0 mil	square probe	0.08 Ω/sq 13 S
Magnetic Class		Diamagnetic (Non-magnetic)
Relative Permeability		<1.0
Shielding Attenuation for 76 μm [3.0 mil] ^{b)}	IEEE STD 299-1997	
10 to 100 kHz	"	84 dB to 89 dB
>100 kHz to 1 MHz	"	73 dB to 89 dB
>1 MHz to 10 MHz	"	47 dB to 70 dB
>10 MHz to 100 MHz	"	41 dB to 60 dB
>100 MHz to 1 GHz	"	59 dB to 71 dB
>1 GHz to 10 GHz	"	58 dB to 67 dB
>10 GHz to 18 GHz	"	48 dB to 68 dB

a) Surface resistance is given in Ω/sq and the corresponding conductance in Siemens (S or Ω⁻¹).

b) Values applies to the liquid formulation



**Super Shield™
Silver Coated Copper Conductive Coating
843AR Technical Data Sheet**

ISO 9001:2008 Registered Quality System, Burlington, Ontario, CANADA SAI Global File: 004008

834AR-Aerosol

<i>Physical Properties</i>	<i>Method</i>	<i>Value</i>
Paint Type	—	Lacquer (thermoplastic)
Color	Visual	Light metallic brown
Abrasion Resistant	—	Yes
Blister Resistant	—	Yes
Peeling Resistant	—	Yes
Water Resistant	—	Yes
<i>Mechanical Properties</i>	<i>Method</i>	<i>Value</i>
Adhesion, Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	ASTM D3359	5B
Polycarbonate (PC)	"	5B
Polyvinyl chloride (PVC)	"	5B
Nylon 66 (Polyamide)	"	5B
Fiber	"	5B
Pencil Hardness, Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	ASTM D3363	H, hard
<i>Environmental & Ageing Study</i> ^{c)}	<i>Method</i>	<i>Value</i>
Salt Fog Test @35 °C [95 °F], 96 h ^{d)}	ASTM B117-2011	
Resistivity before	MG-ELEC-120	0.08 Ω/sq
Resistivity after	"	3 Ω/sq
% Conductivity after	"	2%
Cross-Hatch Adhesion	ASTM D3359-2009	5B
Cracking, unwashed area	ASTM D661-93	None
Visual Color, unwashed area	ASTM D1729-96	Discoloration (green), oxidized

c) Values applies to the liquid formulation

d) Tested using HVLP spray gun application on acrylonitrile butadiene styrene (ABS) coupons

The coating surface resistance and attenuation value is provided in Figures 1 and 2.

Surface Resistance by Coating Thickness

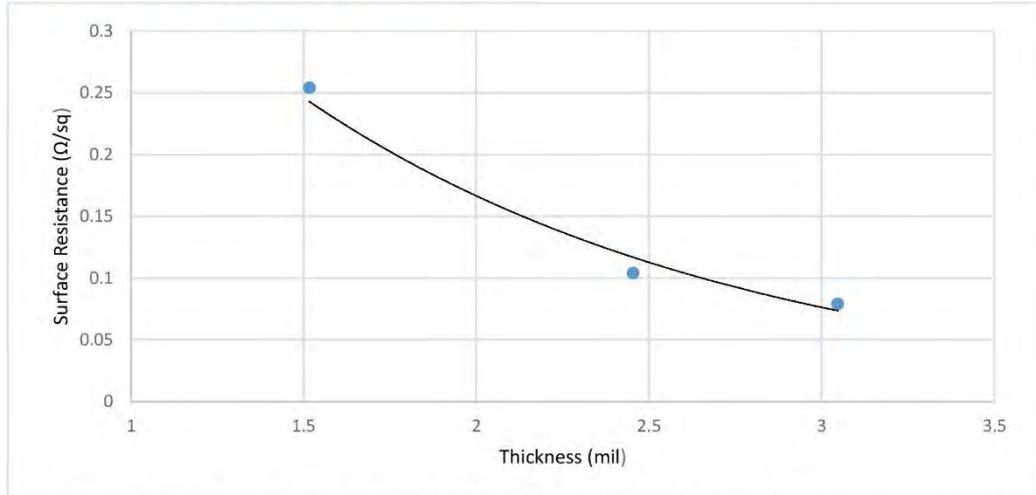


Figure 1. Silvered copper coating surface resistance at different thicknesses (the dots indicate typical successive coat thicknesses)

Shielding Attenuation

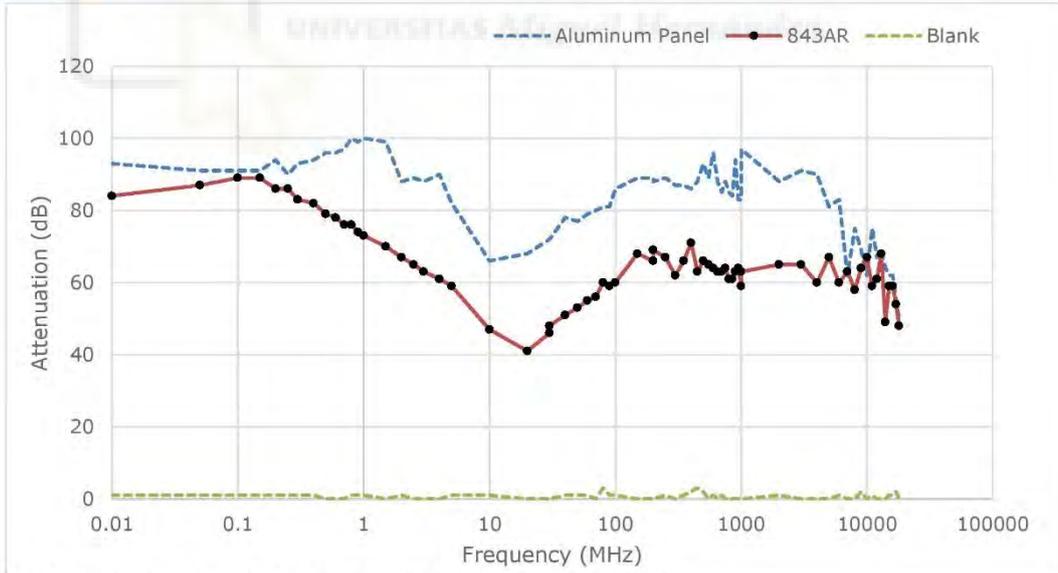


Figure 2. Attenuation of 843AR liquid coating at different frequencies



Super Shield™ Silver Coated Copper Conductive Coating 843AR Technical Data Sheet

ISO 9001:2008 Registered Quality System, Burlington, Ontario, CANADA SAI Global File: 004008

834AR-Aerosol

Properties of Uncured 843AR

<i>Physical Properties</i>	<i>Mixture</i>
Color	Light metallic brown
Density @25 °C [77 °F]	0.99 g/mL
Solids Percentage (wt/wt)	16%
Viscosity @25 °C [77 °F] ^{a)}	87 cP
Flash Point	-17 °C [1.4 °F]
Odor	Acetone-like

a) Brookfield viscometer at 60 RPM with spindle LV S61

Compatibility

Chemical—The silver coated copper is quite resistant to oxidation, except in environments that contain contaminants like H₂S or ozone which tarnish its surface. As well, the silver coated copper flakes are not compatible with hydrochloric acid.

The thermoplastic resin is dissolved by common paint solvents like toluene, xylene, acetone, and MEK. This allows great coating repair and work characteristics, but it does make the coating unsuitable for solvent rich environments.

Adhesion—The 843AR coating adheres to most plastics used to house printed circuit assemblies; however, it is not compatible with contaminants like water, oil, and greasy flux residues that may affect adhesion. If contamination is present, clean the surface to be coated first.

843AR Adherence Compatibility

<i>Substrate</i>	<i>Note</i>
Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)	Chemically etches ^{a)} and adheres well to this substrate.
Polybutylene Terephthalate (PBT)	"
Polycarbonate	"
Polyvinyl Acetate (PVA)	"
Polyvinyl Chloride (PVC)	"
Polyamide (Nylon 66)	"
Acrylics or Acrylic Paints	Adheres well to clean surface
Epoxy, FR4 substrate	"
Polyurethane	Adheres well to clean surface for most urethane types
Wood	Adheres well with surface preparation

a) Etching is similar to sanding, except that it also softens the surface helping to meld the paint to the plastic for superior adhesion.

ATTENTION! Use with care on thin plastics or on plastics where you want to keep original surface intact. The 843AR spray contains a controlled amount of solvents designed to chemically etch plastic surfaces to help adhesion by melding the acrylic coating into the plastic substrate. This prevents flaking or peeling.



Super Shield™ Silver Coated Copper Conductive Coating 843AR Technical Data Sheet

ISO 9001:2008 Registered Quality System. Burlington, Ontario, CANADA SAI Global File: 004008

834AR-Aerosol

Storage

Store between -5 and 40 °C [23 and 104 °F] in dry area away from sunlight. Temperatures below or above these outer limits will result in the container being crushed and/or ruptured.

Health, Safety, and Environmental Awareness

Please see the 843AR-Aerosol **Safety Data Sheet** (SDS) for greater details on transportation, storage, handling and other security guidelines.

Environmental Impact: The regulated VOC (Volatile Organic Compound) content is 41% (485 g/L) by EPA and WHMIS standards.

This product meets the European Directive 2011/65/EU Annex II (ROHS); recasting 2002/95/EC.

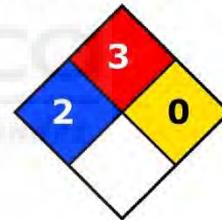
Health and Safety: The solvents in 843AR can ignite if exposed to flames or sparks and can cause respiratory track irritation. If ignited, then flame flash back is possible. Use in well-ventilated area.

Solvents can cause irritation and have some reproductive effects. Wear safety glasses or goggles and disposable gloves to avoid exposures.

HMIS® RATING

HEALTH:	* 2
FLAMMABILITY:	3
PHYSICAL HAZARD:	0
PERSONAL PROTECTION:	

NFPA® 704 CODES



Approximate HMIS and NFPA Risk Ratings Legend:

0 (Low or none); 1 (Slight); 2 (Moderate); 3 (Serious); 4 (Severe)

Aerosol Application Instructions

For best results, apply thin wet coats as opposed to using thick coats. We recommend a final dry film thickness of at least 1.0 mil [25 µm]. Follow the procedure below for ensure optimal conductivity.

Prerequisites

Clean and dry the surface of the substrate to remove

- Oil, dust, water, solvents, and other contaminants

Material & Equipment

- Personal protection equipment (See 843AR-Aerosol SDS)



Super Shield™ Silver Coated Copper Conductive Coating 843AR Technical Data Sheet

ISO 9001:2008 Registered Quality System. Burlington, Ontario, CANADA SAI Global File: 004008

834AR-Aerosol

To apply the coating

1. Shake the can vigorously for 2 minutes, and swirl the bead around the bottom to lift settled material back in solution.
2. Spray a test pattern. This step ensures good flow quality and helps establish appropriate distance to avoid runs.
3. At a distance of 20 to 25 cm (8 to 10 inches), spray a thin and even coat onto a vertical surface. For best results, use spray-and-release strokes with an even motion to avoid excess paint in one spot. Start and end each stroke off the surface.
4. Before the next coat, rotate the surface 90° or change stroke direction (horizontal or vertical) to ensure good coverage.
5. Wait 1 minute, shake can, and spray another coat. The delay avoids trapping solvent between coats.
6. Apply additional coats until desired thickness is achieved (go to Step 3).
7. Let dry for 3 minutes (flash off time) at room temperature.

NOTE: Swirling the aerosol can slightly while waiting prevents settling.

ATTENTION!

- Holding the can at a non-vertical angle during the spray application may result in uneven application.
- Coats that are applied too thick cause runs and hamper solvent evaporation.
- Spraying onto horizontal surfaces is not recommended.

After use, clear the nozzle of the aerosol

1. Immediately invert the aerosol can upside down.
2. Press button until clear propellant comes out. The propellant should become clear in a few seconds.
3. Ensure the face of the button is clean of residues by wiping with a cloth or paper towel.

ATTENTION! Failure to clear nozzle can lead to valve being blocked open or closed in a non-noticeable way.

- If blocked closed, the can will not be usable.
- If blocked slightly open, the contents can spill out overnight creating a mess.

To cure at Room temperature

- Let air dry 24 hours

To accelerate cure by heat

- After flash off, put in oven or under heat lamp at 65 °C for 30 min.

NOTE: Coats that are very thick require more time to dry. Heat curing ensures optimal performance.

ATTENTION! If heat curing, do not exceed 65 °C as this may cause surface defects due to solvents evaporating off too quickly.

Date: 02 August 2017 / Ver. 3.00

Page 7 of 8



Super Shield™ Silver Coated Copper Conductive Coating 843AR Technical Data Sheet

ISO 9001:2008 Registered Quality System. Burlington, Ontario, CANADA SAI Global File: 004008

834AR-Aerosol

Packaging and Supporting Products

<i>Cat. No.</i>	<i>Packaging</i>	<i>Net Volume</i>		<i>Net Weight</i>		<i>Packaging Weight</i>	
843AR-140G	Aerosol	117 mL	3.95 fl oz	140 g	4.93 oz	TBD	TBD
843AR-340G	Aerosol	284 mL	9.6 fl oz	340 g	12 oz	"	"
843AR-900ML	Can	850 mL	1.8 pt	927 g	2.05 lb	1.29 kg	2.84 lb
843AR-3.78L	Can	3.6 L	3.8 qt	3.93 kg	8.66 lb	4.73 kg	10.4 lb

TBD = To Be Determined

Thinners & Conductive Coating Removers

- *Thinner*: Cat. No. 435-1L, 435-4L
- *Thinner 1*: Cat. No. 4351-1L, 4351-4L

Technical Support

Contact us regarding any questions, improvement suggestions, or problems with this product. Application notes, instructions, and FAQs are located at www.mgchemicals.com.

Email: support@mgchemicals.com

Phone: +(1) 800-340-0772 (Canada, Mexico & USA)
+(1) 905-331-1396 (International)
+(44) 1663 362888 (UK & Europe)

Fax: +(1) 905-331-2862 or +(1) 800-340-0773

Mailing address: **Manufacturing & Support**
1210 Corporate Drive
Burlington, Ontario, Canada
L7L 5R6

Head Office
9347-193rd Street
Surrey, British Columbia, Canada
V4N 4E7

Warranty

M.G. Chemicals Ltd. warrants this product for 12 months from the date of purchase by the end user. *M.G. Chemicals Ltd.* makes no claims as to shelf life of this product for the warranty. The liability of *M.G. Chemicals Ltd.* whether based on its warranty, contracts, or otherwise shall in no case include incidental or consequential damage.

Disclaimer

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

ANEXO D: PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA PERIÓDICA

Antes de imprimir la pieza tenemos que tener en cuenta que la impresora este bien calibrada y que la cama este limpia de impurezas. Para una correcta adhesión de la pieza vamos a colocar en la cama cinta de carroceros, echaremos laca por encima de la cinta de carroceros para que la adhesión sea aún mejor. Cuando tengamos la impresora calibrada y la cama limpia mandaremos a imprimir el archivo .stl procedente de Cura 3D.

Cuando la impresión haya acabado debemos retirar la pieza de la cama de la impresora. Como estará bastante adherida a esta podemos utilizar una espátula para retirarla.

Para realizar la metalización de la pieza necesitamos un adhesivo especial, este adhesivo es el epoxi Scotch-Weld EC-2216 gray de 3M. Para realizar este adhesivo necesitamos mezclar 3 partes del endurecedor A y 2 partes del adhesivo B. Una vez que tengamos la mezcla homogénea podemos empezar a aplicarla en nuestra pieza. Este tipo de pegamento a temperatura ambiente ofrece una alta resistencia y adhesión entre diversos materiales como metales, plásticos, cauchos, etc.



Figura 51: Adhesivo epoxi Scotch-Weld EC-2216 gray de 3M

Cortamos una lámina de papel de cobre de las dimensiones de nuestra pieza, debe de sobresalir un poco por los bordes. Para que el adhesivo no se nos quede en la piel debemos ponernos un guante de látex. Con el guante puesto colocaremos el adhesivo aplicando una fina capa del mismo. Con el adhesivo en la pieza colocaremos el papel de cobre y ejerceremos presión. Realizaremos el mismo procedimiento para la otra cara del

substrato, lo tenemos que hacer con cuidado ya que el adhesivo aún está fresco y el papel de cobre puede resbalar. Cuando hemos colocado ambas caras debemos dejar secar durante unas 12 horas. Para que el papel de cobre quede adherido de la mejor forma al substrato utilizamos un sargento y láminas de madera lisas. Para la adhesión de la cara bottom de la pieza, como es irregular, hemos diseñado una pieza que encaja perfectamente con la línea de transmisión creada, así podremos ejercer mejor presión en las zonas irregulares de la misma.

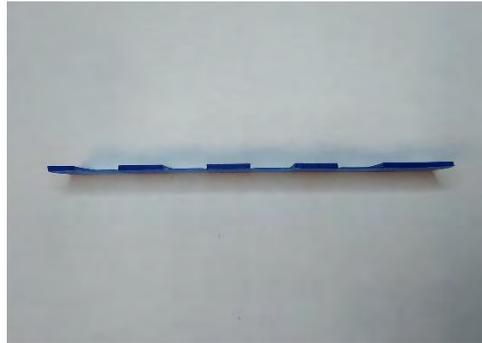


Figura 52: Pieza diseñada por la impresora 3D con cambio de altura

Debemos tener mucho cuidado con la presión que hagamos en el substrato, debe ser la justa para no llegar a partir el papel de cobre en las zonas de cambio de altura. Es recomendable, colocar un folio entre las láminas de madera y el substrato para evitar que el posible desborde de pegamento haga que se no quede pegado a la madera.



Figura 53: Proceso de metalización circuito paso bajo

Una vez transcurridas las 12 horas, retiramos las maderas y el sargento. Tendremos que observar que nuestro substrato ya está totalmente metalizado. El cobre sobrante ya puede ser quitado.

Una vez que tenemos el substrato impreso y metalizado, el siguiente paso es fresar el circuito utilizando la fresadora del laboratorio. Mediante el software de la fresadora seremos capaces de abrir el archivo de EMPro y darle las instrucciones a la fresadora para que realice el circuito en el substrato.

Lo primero que debemos realizar es una referencia en la madera base de la fresadora con la ayuda de una fresa de cortar de 1 mm de diámetro. Una vez que tenemos la referencia en la fresa colocamos el substrato y comenzaremos a fresar el circuito en él. Para comprobar que el circuito está bien colocado y la fresadora bien calibrada realizaremos con la fresa de perfilar una prueba, así nos aseguraremos que la fresa no penetra demasiado y daña el substrato, en las zonas donde posteriormente retiraremos la capa de cobre. La fresa de perfilar tiene un diámetro de 0.1 a 0.15 mm. Cuando la calibración este correcta comenzaremos a fresar todo el circuito. Debemos realizar el fresado poco a poco e ir quitando el PLA, en caso de ser necesario, de la fresa.

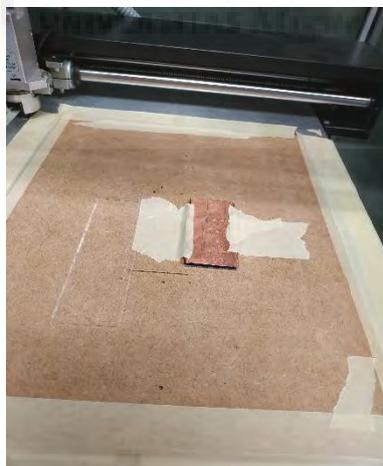


Figura 54: Fresado del circuito paso bajo

Ahora solo nos quedaría retirar la capa de cobre sobrante del circuito. Si la fresa ha realizado bien su trabajo la capa de cobre debe salir de manera correcta y, relativamente, fácil sin llegar a dañar las pistas del circuito. Para la capa bottom debemos retirar con un

cúter o unas tijeras la parte sobrante de la capa de cobre. Cuando todo el cobre este retirado lijamos los bordes para un acabado correcto.



BIBLIOGRAFÍA

[1] Avances de la tecnología 3D

<https://www.aecoc.es/innovation-hub-noticias/cinco-grandes-avances-en-el-mundo-de-la-impresion-3d/>

[2] Implante para diabéticos

<https://www.20minutos.es/tecnologia/actualidad/puede-la-tecnologia-eliminar-la-medicina-tradicional-impresiones-3d-e-inteligencia-artificial-amenzan-su-existencia-4791509/?autoref=true>

[3] Casas impresas 3D Holanda

<https://actualidad.rt.com/actualidad/390900-primera-casa-totalmente-impresa-3d-recibe-inquilinos>

[4] Filete en 3D

https://elpais.com/tecnologia/2018/09/26/actualidad/1537952669_388366.html

[5] Bici eléctrica

<https://www.lavanguardia.com/motor/vehiculos/bicicletas/20210815/7662721/bici-electrica-impresion-3d-urwahn-waldwiesel.html>

[6] Historia de la impresión 3D

<https://www.youtube.com/watch?v=jW6RvL9s248&list=PL6rwxmI-6UORm26DcoBTxuFB8zI9EUr-g>

[7] Tecnologías de la impresión 3D (SLA, DLP, MSLA, MPL y CLIP)

<https://www.youtube.com/watch?v=WffAVGcvePA&list=PL6rwxmI-6UORm26DcoBTxuFB8zI9EUr-g&index=2>

[8] FDM (Modelado por Deposición Fundida)

<https://www.youtube.com/watch?v=-aYFsLcTPMg&list=PL6rwxmI-6UORm26DcoBTxuFB8zI9EUr-g&index=3>

[9] Características impresora bq

<https://www.amazon.es/BQ-Hephestos-Impresora-resoluci%C3%B3n-velocidad/dp/B01N2S1NO0#descriptionAndDetails>

[10] PLA azul

<https://www.conrad.com/p/german-reprap-100518-filament-pla-175-mm-21-kg-blue-silk-1-pcs-1597858>

[11] Matlab

https://es.mathworks.com/help/matlab/getting-started-with-matlab.html?s_tid=CRUX_lftnav

[12] EMPro

<https://www.youtube.com/watch?v=KYJ1zEnC1Ks&t=173s>

[13] CURA 3D

<https://www.youtube.com/watch?v=hz1i9cMVRb8>

[14] Esquema SLA

<https://formizable.com/como-funciona-la-estereolitografia/>

[15] Impresora basada en SLA

<https://formlabs.com/es/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/>

[16] Prusa i3

<http://impresorasymultifuncion.com/impresoras-3d/2327-impresora-3d-prusa-i3-hephestos.html>

[17] Cube system

<https://www.pcmag.com/reviews/3d-systems-cube-3d-printer>

[18] Impresora 3d (xyz printing)

https://www.3dcut.it/es/3d-printers-fdm/31-xyzprinting-impresora-y-tinta-3d-da-vinci-color-3d-4713120936376.html?utm_term=&utm_campaign=Spagna+flashf+wanhao&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=1450233205&hsa_cam=13851164087&hsa_grp=124738222996&hsa_ad=532795768042&hsa_src=g&hsa_tgt=aud-925557408914:pla-1187492755406&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=CjwKCAjw95yJBhAgEiwAmRrutDjR3yUcA8w-0IY6gZTW42FLEF0PUyw5HmGuVYyTJ4qkIp8moPjQWBoCZMoQAvD_BwE

[19] Impresora tipo delta

<https://www.google.com/search?q=impresoras+3d+tipo+delta&og=impresoras+3d+tipo+delta&aqs=chrome..69i57.5736j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

[20] Impresora polar 3d

<https://makezine.com/products/3dprinters/polar-3d/>

[21] Impresora de cinta transportadora

<https://www.3dnatives.com/es/creality-3dprintmill-cinta-transportadora-151220202/>

[22] Nivelado y calibración de la impresora 3d

<https://www.programoergosum.com/cursos-online/impresion-3d/903-prusa-i3-bq-hephestos/nivelado-y-calibracion>

[23] EBG

https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/40266/1/Diseno_de_filtros_a_partir_de_estructuras_periodicas_ANIORTE_LOPEZ_CAYETANO.pdf

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15098/memoria.pdf?sequence=1>

<https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/7548/578085.pdf;jsessionid=B6926C1F19649C924D11801348E11DE4?sequence=1>

https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/37572/Disen%26%23771%3Bo_de_antena_en_tecnologi%26%23769%3Ba_EBG_de_alta_directividad_sobre_substrato_de_silicio_para_frecuencias_milimetricas_Marcos_La%26%23769%3Bzaro_Rada.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[24] Modelo corazón 9 años

<https://soloesciencia.com/2019/10/06/sabias-esto-de-los-organos-por-impresion-3d/>

[25] Prótesis de mano

<https://bitfab.io/es/blog/protesis-impresion-3d/>

[26] Modelo dental

<https://www.stratasys.com/es/dental>

[27] Modelo de guía de onda

<https://mito3d.com/es/3dmodels/search/guia+de+onda/all/all/latest/1>

[28] Material soluble en agua

<https://hacedores.com/imprimiendo-en-3d-con-multiples-filamentos-solubles/>

[29] Filtro con ley senoidal

https://www.researchgate.net/publication/3121701_New_microstrip_Wiggly-Line_filters_with_spurious_passband_suppression

[30] Héctor Gracia Martínez, Ernesto Ávila Navarro, Germán Torregrosa Penalva, Alberto Rodríguez Martínez, Carolina Blanco Angulo and Miguel A. de la Casa
120

Lillo, «Low-Cost Additive Manufacturing Techniques Applied to the Design of Planar Microwave Circuits by Fused Deposition Modeling,» MDPI, 2020

[31] F. Martín, Artificial Transmission Lines for RF and Microwave Applications, Wiley, 2015.

[32] T. Lopetegi et al., "New microstrip "Wiggly-Line" filters with spurious passband suppression," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 49, no. 9, pp. 1593-1598, Sept. 2001, doi: 10.1109/22.942571.