

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN



"CARACTERIZACIÓN DE
MATERIALES DE IMPRESIÓN 3D
MEDIANTE TECNOLOGÍA
PLANAR PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE
CIRCUITOS DE MICROONDAS"

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre 2024

AUTOR: Cristian Mateo Gómez
DIRECTOR/ES: Héctor García Martínez

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA [6]	21
ILUSTRACIÓN 2. IMPRESIÓN POR SINTETIZADO SELECTIVO POR LÁSER [7]	21
ILUSTRACIÓN 3. CIRCUITO RESONANTE LC EN SERIE [8]	23
ILUSTRACIÓN 4. CIRCUITO RESONANTE LC EN PARALELO [1]	23
ILUSTRACIÓN 5. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA LÍNEA MICROSTRIP DE 3 CAPAS [9]	24
ILUSTRACIÓN 6. RESONADOR MEDIANTE LÍNEA MICROSTRIP DE CUARTO DE LONGITUD DE ONDA [10]	27
ILUSTRACIÓN 7. FABRICACIÓN DEL RESONADOR MICROSTRIP DE 0.8 MM DE ANCHO, 21 MM DE LARGO Y UNAS DIMENSIONES DE 46x60 MM MEDIANTE LA FRESADORA LPKF PROTOMAT 93s	29
ILUSTRACIÓN 8. FABRICACIÓN DEL SUSTRATO A CARACTERIZAR CON IMPRESORA 3D BQ PRUSA I3 HEPHESTOS POR MÉTODO DE FILAMENTO FUNDIDO (FDM)	30
ILUSTRACIÓN 9. VALORES DEL SUSTRATO FR4 PARA EL CÁLCULO DEL ANCHO (W) Y LARGO (L) DE LA SECCIÓN DE COBRE CONDUCTORA DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ, 50 OHM Y 90º DE FASE	34
ILUSTRACIÓN 10. DISEÑO EN ADS DEL ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO Y SU DEFINICIÓN MULTICAPA A TRAVÉS DEL SUSTRATO AÑADIDO MULTICAPA PARA EL RESONADOR A 2 GHZ, AÑADIENDO EL CAMPO DE SIMULACIÓN DE LOS PARÁMETROS S	34
ILUSTRACIÓN 11. RENDERIZADO EN 3D DEL RESONADOR A 2 GHZ EN FREECAD	35
ILUSTRACIÓN 12. RENDERIZADO EN 3D DE LA PIEZA DEL SUSTRATO BAJO ENSAYO MODELADO EN FREECAD PARA SU FABRICACIÓN	35
ILUSTRACIÓN 13. MODELADO EN CURA PARA INDICAR LOS PARÁMETROS DE FABRICACIÓN EN LA IMPRESORA 3D	35
ILUSTRACIÓN 14. MODELADO 3D DEL DISEÑO MULTICAPA DEL RESONADOR A 2 GHZ CON EL MATERIAL DIELECTRICO (PLA) A CARACTERIZAR CON HFSS	36
ILUSTRACIÓN 15. SIMULACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN V/M DEL RESONADOR A 2 GHZ INTERACTUANDO CON EL SUSTRATO BAJO ENSAYO CON NIVELES DE RADIACIÓN MEDIDOS EN DB EN HFSS	37
ILUSTRACIÓN 16. ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES EMPLEADO E8363B KEYSIGHT	38
ILUSTRACIÓN 17. CONECTOR SOUTHWEST PARA LA CONEXIÓN CON LAS SONDAS DEL ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES	39
ILUSTRACIÓN 18. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PRIMER DISEÑO DEL RESONADOR EN LÍNEA MICROSTRIP	41
ILUSTRACIÓN 19. LAYOUT DEL PRIMER DISEÑO DEL RESONADOR A 2 GHZ GENERADO EN ADS	42
ILUSTRACIÓN 20. RESONADOR 2 GHZ CON CAVIDAD DE RESONANCIA DE 1 MM DE ALTURA DE LA CAVIDAD RESONANTE PARA SUBSTRATO BAJO ENSAYO	43
ILUSTRACIÓN 21. SIMULACIÓN EN ADS (ROJO) Y MEDIDA EXPERIMENTAL VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S(2,1) DEL RESONADOR MODELIZADO EN AIRE (SIN MATERIAL)	44
ILUSTRACIÓN 22. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL SEGUNDO PROTOTIPO DEL RESONADOR EN LÍNEA MICROSTRIP	45
ILUSTRACIÓN 23. DISEÑO ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN EN ADS	46
ILUSTRACIÓN 24. LAYOUT DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CON IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DE 50 OHM Y RESONADOR A LA FRECUENCIA CARACTERÍSTICA DE 2 GHZ GENERADO EN ADS	46
ILUSTRACIÓN 25. RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ Y LÍNEA DE TRANSMISIÓN CON IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA A 50 OHM	47
ILUSTRACIÓN 26. MEDIDA DEL RESONADOR CON EL MATERIAL PLA BAJO ENSAYO EN EL VNA	48
ILUSTRACIÓN 27. SIMULACIÓN EN ADS (ROJO) Y MEDIDA EXPERIMENTAL VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S(2,1) DEL RESONADOR MODELIZADO EN AIRE (SIN MATERIAL)	48
ILUSTRACIÓN 28. SIMULACIÓN EN ADS (ROJO) Y MEDIDA EXPERIMENTAL VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S(2,1) DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MODELIZANDO EN AIRE (SIN MATERIAL).	49
ILUSTRACIÓN 29. SIMULACIÓN EN ADS (ROJO) Y MEDIDA EXPERIMENTAL VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S(2,1) DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CARACTERIZANDO EL MATERIAL PLA	49
ILUSTRACIÓN 30. ECUACIONES DEL SOFTWARE DE ADS PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN EN DB	50
ILUSTRACIÓN 31. SIMULACIÓN DE LA FASE DE LAS SEÑALES DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN S(2,1) DE ADS (ROJO) Y LA MEDIDA EXPERIMENTAL (AZUL) PARA LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MODELADO EN AIRE	51
ILUSTRACIÓN 32. RESONADOR 2 GHZ FABRICADO MEDIANTE FOTOLITOGRAFÍA	52
ILUSTRACIÓN 33. CARA SUPERIOR RESONADOR A 2 GHZ CON ORIFICIOS PASANTES Y PARA ATORNILLAR	53
ILUSTRACIÓN 34. CARA INFERIOR CON MATERIAL DIELECTRICO DEL RESONADOR A 2 GHZ	53
ILUSTRACIÓN 35. MEDICIÓN DEL MATERIAL DIELECTRICO PLA MEDIANTE EL ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES	54
ILUSTRACIÓN 36. MEDICIÓN DEL RESONADOR A 2 GHZ EN AIRE CON EL ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES	54
ILUSTRACIÓN 37. SUSTRATOS A) PREPERM3, B) ABS, C) PLA) FABRICADO POR IMPRESIÓN 3D DE UN 1 MM DE ESPESOR	55



ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. SUPERPOSICIÓN DE LAS FRECUENCIAS RESONANTES DE LAS SIMULACIONES EN ADS (ROJO), HFSS (MAGENTA), Y EXPERIMENTALES, VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S ₂₁ CON EL MATERIAL PLA BAJO ENSAYO A DIFERENTES MEDIDAS A) 4MM, B) 8MM, C) 12MM	66
GRÁFICA 2. SUPERPOSICIÓN DE LAS FRECUENCIAS RESONANTES DE LAS SIMULACIONES EN ADS (ROJO), HFSS (MAGENTA), Y EXPERIMENTALES, VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S ₂₁ CON EL MATERIAL ABS BAJO ENSAYO A DIFERENTES MEDIDAS A) 4MM, B) 8MM, C) 12MM	67
GRÁFICA 3. SUPERPOSICIÓN DE LAS FRECUENCIAS RESONANTES DE LAS SIMULACIONES EN ADS (ROJO), HFSS (MAGENTA), Y EXPERIMENTALES, VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S ₂₁ CON EL MATERIAL PREPERM3 BAJO ENSAYO A DIFERENTES MEDIDAS A) 4MM, B) 8MM, C) 12MM	68
GRÁFICA 4. SUPERPOSICIÓN DE LAS FRECUENCIAS RESONANTES DE LAS SIMULACIONES EN ADS (ROJO), HFSS (MAGENTA), Y EXPERIMENTALES, VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S ₂₁ SIN MATERIAL, MODELIZADO EN AIRE.	69
GRÁFICA 5. MEDIDA DEL PARÁMETRO S(2,1) EN VALOR ABSOLUTO DE FR4 PARA REALIZAR LOS CÁLCULOS DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS	71
GRÁFICA 6. MEDIDA DEL PARÁMETRO S(2,1) EN VALOR ABSOLUTO DE PLA PARA REALIZAR LOS CÁLCULOS DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS	71
GRÁFICA 7. MEDIDA DEL PARÁMETRO S(2,1) EN VALOR ABSOLUTO DE ABS PARA REALIZAR LOS CÁLCULOS DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS	72
GRÁFICA 8. MEDIDA DEL PARÁMETRO S(2,1) EN VALOR ABSOLUTO DE PREPERM3 PARA REALIZAR LOS CÁLCULOS DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS	72



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PROPIEDADES DEL MATERIAL PLA [3]	31
TABLA 2. PROPIEDADES DEL MATERIAL ABS [3]	31
TABLA 3. PROPIEDADES DEL MATERIAL PREPERM3 [11]	31
TABLA 4. PROPIEDADES DEL MATERIAL COBRE [1]	32
TABLA 5. PROPIEDADES DEL MATERIAL ALUMINIO [1]	32
TABLA 6. PROPIEDADES DEL MATERIAL FR4 A 1 MHz [12]	32
TABLA 7. VALORES DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN EN FRECUENCIAS COMPRENDIDAS ENTRE 1-6 GHZ	50
TABLA 9. MODELIZACIÓN EN AIRE DEL VALOR DE LA PERMITIVIDAD RELATIVA DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ	58
TABLA 10. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL PLA DEL VALOR DE LA PERMITIVIDAD RELATIVA DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ	58
TABLA 11. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL ABS DEL VALOR DE LA PERMITIVIDAD RELATIVA DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ	58
TABLA 12. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL PREPERM3 DEL VALOR DE LA PERMITIVIDAD RELATIVA DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ	58
TABLA 13. MODELIZACIÓN EN AIRE DE LOS VALORES DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS Y EL FACTOR DE CALIDAD EN ADS, HFSS Y MEDIDA EXPERIMENTAL DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ	59
TABLA 14. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PLA DE LOS VALORES DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS Y EL FACTOR DE CALIDAD EN ADS, HFSS Y MEDIDA EXPERIMENTAL DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ	59
TABLA 15. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ABS DE LOS VALORES DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS Y EL FACTOR DE CALIDAD EN ADS, HFSS Y MEDIDA EXPERIMENTAL DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ	59
TABLA 16. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PREPERM3 DE LOS VALORES DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS Y EL FACTOR DE CALIDAD EN ADS, HFSS Y MEDIDA EXPERIMENTAL DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ	59



ACRÓNIMOS

A

ABS. Acrilonitrilo Butadieno Estireno

ADS. Advanced Design System

E

ϵ_r . Permitividad Relativa

G

GHz. Gigahertz

H

HFSS. High Frequency Surface Simulator

M

[μm]. Micrómetro

P

Parámetros S. Parámetros de Dispersión

PLA. Ácido Poliláctico

Q

Q. Factor de Calidad

R

RF. Radiofrecuencia

V

VNA. Vector Network Analyzer

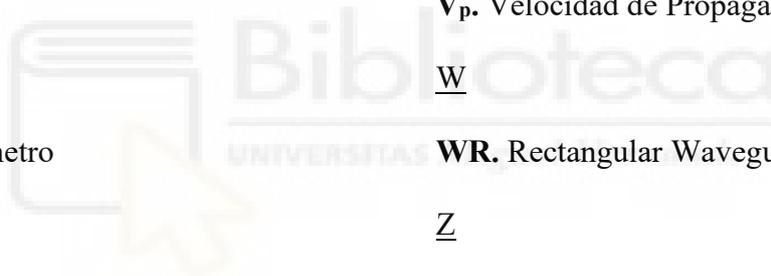
V_p . Velocidad de Propagación

W

WR. Rectangular Waveguide

Z

Z_0 . Impedancia Característica





RESUMEN

Como propósito principal, del mismo proyecto, nos centramos en aplicaciones de impresión 3D. Esta herramienta de fabricación nos permite crear estructuras de circuitos impresos en el rango comprendido de las microondas de tecnología microstrip. Es sabido que en este tipo de líneas de transmisión se debe realizar un cálculo previo para definir características del dispositivo. En este proceso de cálculo, debemos elegir nuestro material aislante a la frecuencia y fase característica deseada, que, dependiendo de las propiedades del sustrato, obtenemos los valores involucrados de muchos factores como la distancia entre planos de la sección transversal [1], anchura o distancia de la pista, etc. Sin embargo, esa elección del material aislante involucra muchas propiedades de las que debemos ser conocedores.

En este proyecto, aplicamos un método resonante para la caracterización del material dieléctrico usado como filamento en impresión 3D. La finalidad de la caracterización es conocer las propiedades dieléctricas de cada material (PLA, ABS, Preperm3), siendo las propiedades más relevantes la permitividad relativa y la tangente de pérdidas. Para realizar este método y ser capaces de modelizar estos materiales exponemos todas las partes involucradas de este desarrollo de investigación, estructurado en 5 capítulos.

En el primer Capítulo, se realiza una clara introducción del Trabajo Final de Grado y explicación de los objetivos planteados.

En el segundo Capítulo, se hace constancia del marco teórico en el que estamos trabajando, explicando que es la impresión 3D y sus diferentes tecnologías, la relación física que hay implicada de los dispositivos resonantes, tecnología microstrip y la resonancia a alta frecuencia, siendo este el método empleado para la caracterización.

En el tercer Capítulo, se expone de manera clasificada los diferentes métodos empleados en los distintos procedimientos del desarrollo, además de las características de los materiales empleados para la impresión 3D y herramientas de trabajo utilizadas de software y medición.

En el cuarto Capítulo, se refleja transparentemente la evolución del desarrollo en distintas fases a nivel de diseño, fabricación, medición, caracterización y resultados.

Por último, en el quinto Capítulo se muestran todas las conclusiones y análisis de todo el desarrollo de este proyecto haciendo mención de mejoras y líneas futuras de investigación.

Palabras clave: impresión 3D, caracterización dieléctrica, microondas.



ABSTRACT

As the main purpose, of the same project, we focus on 3D printing applications. This manufacturing tool allows us to create printed circuit structures within the microwave range of microstrip technology. It is well known that in this type of transmission line, prior calculations must be carried out to define the characteristics of the device. In this calculation process, we need to choose our insulating material according to the desired frequency and phase, and depending on the properties of the substrate, we obtain values involving many factors such as the distance between planes of the cross-section [1], the width or distance of the track, etc. However, the choice of insulating material involves many properties that we must be familiar with.

In this project, we apply a resonant method to characterise the dielectric material used as filament in 3D printing. The aim of the characterisation is to determine the dielectric properties of each material (PLA, ABS, Preperm3), with the most relevant properties being relative permittivity and loss tangent. To carry out this method and be able to model these materials, we present all the parts involved in this research development, structured into 5 chapters.

In the first chapter, a clear introduction to the Final Degree Project is provided, along with an explanation of the objectives set out.

In the second chapter, the theoretical framework in which we are working is outlined, explaining what 3D printing is and its different technologies, the physical relationship involved in resonant devices, microstrip technology, and high-frequency resonance, which is the method used for characterisation.

In the third chapter, the different methods used in the various development procedures are presented in a classified manner, along with the characteristics of the materials used for 3D printing and the software and measurement tools employed.

In the fourth chapter, the evolution of the development is transparently reflected through different phases, including design, manufacturing, measurement, characterisation, and results.

Finally, in the fifth chapter, all the conclusions and analyses from the entire development of this project, with mention of improvements and future research directions.

Keywords: 3D printing, dielectric characterisation, microwaves.



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, Héctor García Martínez, por su apoyo y orientación a lo largo de este trabajo. Su experiencia y dedicación han sido fundamentales para el desarrollo y éxito de este proyecto. Gracias por su compromiso.

Con este trabajo se pone el broche a mi etapa como estudiante en el Grado de Ingeniería en Tecnología de Telecomunicaciones en el que he estado involucrado muy afondo. En este camino, he tenido la suerte de cruzarme y querer estar cerca de personas que me han aportado y sumado su apoyo, por ello, gracias.

A mi querido amigo y profesor Jaime, gracias por tu inspiración y estar en todo momento a disposición de quienes lo necesitan, has sido la pieza clave en esta carrera de fondo.

Agradecer a mi familia, cuyo apoyo incondicional ha sido esencial durante todo este proceso. A mis padres, Cristina Gómez Ruíz y Antonio Mateo Rives, y a mi hermano mayor, Antonio Mateo Gómez, por su amor y ánimo constante.

Por último, dedico este párrafo a mis abuelos. Mi título es para vosotros, os quiero.





ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	3
ÍNDICE DE GRÁFICAS	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ACRÓNIMOS	7
RESUMEN	9
ABSTRACT	11
AGRADECIMIENTOS.....	13
ÍNDICE.....	15
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	17
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	20
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1. MÉTODOS DE FABRICACIÓN. FRESADO Y IMPRESIÓN 3D.....	29
3.2. MATERIALES	31
3.3. MÉTODOS DE DISEÑO Y MODELADO EN 3D MEDIANTE SOFTWARE.....	33
3.3.1. Advanced Design System (ADS)	33
3.3.2. FreeCad.....	35
3.3.3. Cura	35
3.3.4. HFFS.....	36
3.4. INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	38
CAPÍTULO 4. DESARROLLO Y RESULTADOS	41
4.1 PRIMER PROTOTIPO. RESONADOR.....	42
4.1.1. DISEÑO	42
4.1.2. FABRICACIÓN	43
4.1.3. MEDICIÓN Y ANÁLISIS	44
4.2. SEGUNDO PROTOTIPO. RESONADOR + LÍNEA DE TRANSMISIÓN. 45	
4.2.1. DISEÑO	46
4.2.2. FABRICACIÓN	47
4.2.3. MEDICIÓN Y ANÁLISIS	48
4.3. TERCER PROTOTIPO. MÉTODO DE FOTOLITOGRAFÍA	51
4.3.1. MÉTODO DE FABRICACIÓN.....	52
4.3.2. MEDICIÓN Y ANÁLISIS	52
4.4. CUARTO PROTOTIPO.....	53
4.4.1. MEDICIÓN Y ANÁLISIS	54
4.5. SUSTRATOS BAJO ENSAYO	55
4.6. MODELIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	56

4.7. RESULTADOS	58
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	62
ANEXO I. ANÁLISIS EN HFSS Y ADS DE MATERIALES DIELECTRICOS PARA CARACTERIZAR LA PERMITIVAD RELATIVA	65
ANEXO II. APLICACIÓN DE MÉTODO DEL ANCHO DE BANDA A -3DB PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS	71
ANEXO III. DATASHEET CONECTORES SOUTHWEST	74
REFERENCIAS	76



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el fascinante mundo de la tecnología hemos podido comprobar cómo la electrónica se ha ido introducido en nuestra vida cotidiana y profesional con diversas aplicaciones, llegando a decir que existe una dependencia muy directa con estos sistemas que nos facilitan el trabajo.

Las aplicaciones dependen del campo donde nos movamos por lo que pueden ser de menor importancia o, todo lo contrario. En nuestro caso, nos encontramos con una aplicación de lo más interesante que es la medición de parámetros dieléctricos para un uso en la impresión 3D. Esta aplicabilidad puede ser muy variada desde utilizar esta tecnología de impresión 3D para desarrollar materiales conductores o dieléctricos en dispositivos electrónicos como circuitos integrados, sensores, hasta fabricado de metamateriales o impresión de antenas u otros componentes de radiofrecuencia (RF). La importancia de la selección de un material dieléctrico puede ser muy significativa no solamente en la fase de diseño, sino, también en aplicaciones del tipo médico, donde las propiedades dieléctricas influyen directamente en la compatibilidad del material con el cuerpo humano como en implantes o sensores bioelectrónicos [2].

En nuestro caso, vamos a intentar mejorar el método de caracterización de materiales dieléctricos para la impresión 3D utilizado en el laboratorio de microondas de la universidad de Miguel Hernández de Elche hasta la fecha a través de un resonador de microondas. Con el campo electromagnético generado una vez excitado el resonador, daremos pie a tomar las mediciones de los parámetros dieléctricos conocidos como la permitividad relativa y tangente de pérdidas. Estas propiedades se pueden definir como; constante dieléctrica de un material, que es la capacidad de almacenamiento de energía en forma de polarización bajo la influencia de un campo eléctrico, y, la tangente de pérdidas, también conocida como factor de disipación, siendo la eficiencia del almacenamiento y disipación de la energía eléctrica en un campo electromagnético.

Existe una problemática en el grupo de investigación a la hora de caracterizar materiales dieléctricos para su uso en estructuras de circuitos de microondas, por lo que, este método es una propuesta que puede llegar a una relación de compromiso entre mejorar el método existente [3], donde necesitaban someter el material entre dos capas de material conductor (generalmente cobre) y estos ser adheridos con la ayuda de un pegamento, el cual distorsionaba las lecturas, es decir, influía en el material bajo ensayo, y, una guía de onda, el cual, es un buen método de caracterización porque no introduce pérdidas en el material pero tienen el problema de ser muy costosas y estar limitados a trabajar en el rango de frecuencias para la guía WR 137 de (5.85 – 8.29) GHz y, para la guía WR 90 de (8.2 – 12.4) GHz [4].

En este proyecto se plantea un método de caracterización que proporcione mediciones fidedignas en comparación a una guía de onda, pero, con un manejo y montaje más simple y sin olvidarnos del coste. Así pues, como objetivo principal, planteamos obtener los mencionados parámetros dieléctricos a través de un sistema resonante caracterizado a 2 GHz. Para hacer posible la lectura de los valores de los parámetros del material de impresión 3D (permitividad relativa y tangente de pérdidas) que mediremos, necesitamos trabajar con sistemas de gran sensibilidad, como son los sistemas de tecnología planar.

Gracias a esta tecnología seremos capaces de obtener un dispositivo sencillo, totalmente manejable, de bajo coste y capaz de caracterizar materiales dieléctricos para la impresión en 3D.

Por último, a lo largo de la memoria iremos viendo las distintas fases del proyecto para conseguir nuestro objetivo principal. Sin embargo, todo el desarrollo se puede clasificar en objetivos secundarios en los que quedan implicados:

- 1) Fase de diseño.
- 2) Fabricación del sistema.
- 3) Mediciones.
- 4) Modelación del sistema en distintos softwares utilizados comparando los distintos métodos de modelización para llegar al valor esperado.





CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

El objetivo de este estado del arte es realizar un análisis en la caracterización de materiales dieléctricos mediante tecnología planar, con aplicaciones específicas en el campo de la impresión en 3D. Este análisis permitirá establecer el contexto y la relevancia de la investigación propuesta, así como identificar las áreas de oportunidad y los desafíos existentes.

IMPRESIÓN 3D

La impresión en 3D ha revolucionado la fabricación de componentes, permitiendo la creación de estructuras complejas con materiales diversos. Sin embargo, la caracterización precisa de las propiedades dieléctricas de estos materiales es crucial para garantizar un aislamiento eléctrico adecuado, especialmente cuando se utilizan en aplicaciones de alta frecuencia.

La correcta caracterización de materiales dieléctricos es muy importante para aplicaciones que requieren aislamiento eléctrico fiable. Los campos de frecuencia de microondas permiten una evaluación más precisa de las propiedades dieléctricas, lo cual es vital para el diseño y la fabricación de componentes eléctricos y electrónicos mediante impresión en 3D.

Con el avance de la tecnología de alta frecuencia, las metodologías de caracterización han evolucionado, permitiendo mediciones más precisas y detalladas. Los principios fundamentales de la interacción entre campos eléctricos y materiales dieléctricos se basan en las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \text{ [C/m}^3\text{]} \quad \text{Ley de Gauss campo eléctrico (1)}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \text{ [T/m]} \quad \text{Ley de Gauss campo magnético (2)}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \text{ [V/m}^2\text{]} \quad \text{Ley de Faraday (3)}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \text{ [A/m}^2\text{]} \quad \text{Ley de Ampère (4)}$$

\vec{E} es el campo eléctrico en [V/m], \vec{H} el campo magnético [A/m], \vec{B} inducción magnética [T], \vec{D} el vector de desplazamiento eléctrico [C/m²] y, \vec{J} la densidad de corriente [A/m²] [5].

TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN 3D

FDM (Modelado por Deposición Fundida):

- **Descripción:** Utiliza un filamento de plástico que se funde y deposita capa por capa para crear una pieza.
- **Materiales:** Plásticos como ABS, PLA, PETG, y algunos compuestos.

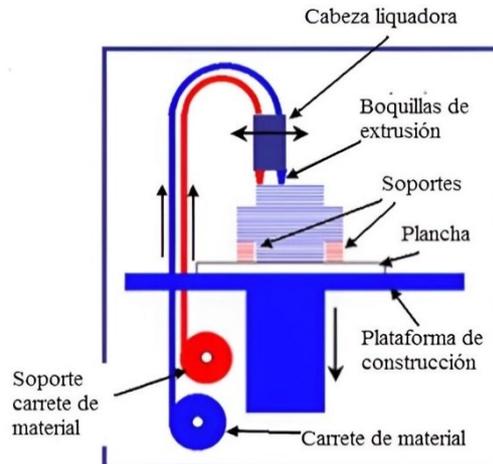


ILUSTRACIÓN 1. MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA [6]

SLA (Esterolitografía):

- **Descripción:** Utiliza un láser UV para curar una resina líquida capa por capa, solidificando el material para formar el objeto.
- **Materiales:** Resinas fotopoliméricas.

SLS (Sinterizado Selectivo por Láser):

- **Descripción:** Usa un láser para sinterizar polvo de material (plástico, metal, cerámica) capa por capa, fusionando las partículas para formar la pieza.
- **Materiales:** Polvos de nylon, metales, cerámicas, y otros.

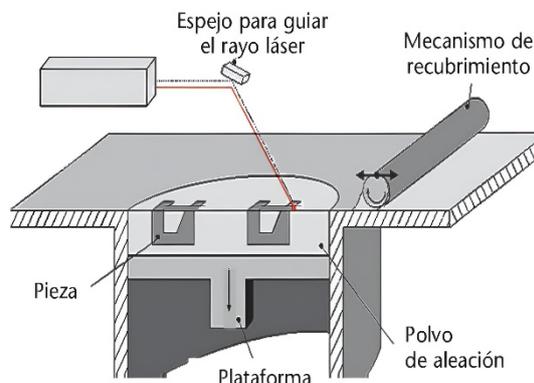


ILUSTRACIÓN 2. IMPRESIÓN POR SINTERIZADO SELECTIVO POR LÁSER [7]

DLP (Procesamiento Digital de Luz):

- **Descripción:** Similar a la SLA, pero utiliza una pantalla de proyector digital para curar toda una capa de resina de una vez, en lugar de hacerlo punto por punto con un láser.
- **Materiales:** Resinas fotopoliméricas.

MJF (Multi Jet Fusión):

- **Descripción:** Este método utiliza agentes de fusión y detalle aplicados sobre un lecho de polvo, que luego se fusiona capa por capa usando calor.
- **Materiales:** Principalmente polímeros como nylon.

Binder Jetting (Inyección de Agente Aglutinante):

- **Descripción:** Deposita un aglutinante sobre un lecho de polvo, capa por capa, que luego se sinteriza o infiltra para formar la pieza.
- **Materiales:** Polvos de metales, cerámica, arena, entre otros.

Estos métodos ofrecen una gama amplia de posibilidades tanto para la fabricación en fresadoras como en impresoras 3D, cada uno adecuado para diferentes aplicaciones dependiendo de los requisitos de material, precisión, y costo.



CIRCUITOS RESONANTES

Un circuito resonante es un tipo de circuito eléctrico que se utiliza para seleccionar una frecuencia particular de señal o para obtener una respuesta resonante a una frecuencia específica. Los circuitos resonantes son fundamentales en numerosas aplicaciones electrónicas, como filtros, osciladores y sintonizadores

Los circuitos resonantes generalmente se componen de dos elementos fundamentales:

- **Inductor (L):** Un componente que almacena energía en forma de campo magnético cuando la corriente eléctrica circula a través de él.
- **Capacitor (C):** Un componente que almacena energía en forma de campo eléctrico cuando hay una diferencia de potencial entre sus placas.

Existen dos tipos básicos de circuitos resonantes, según cómo se conecten el inductor y el capacitor:

1. **Circuito LC en Serie:** En la resonancia, la impedancia total del circuito es mínima, y la corriente es máxima para una fuente de tensión dada.

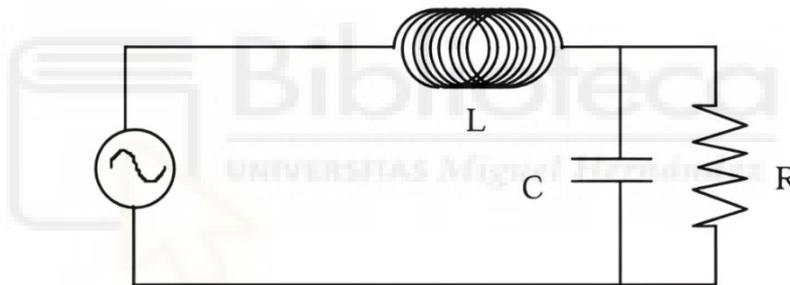


ILUSTRACIÓN 3. CIRCUITO RESONANTE LC EN SERIE [8]

En este circuito resonante, el generador de corriente alterna representa la excitación del circuito, el condensador C representa la capacidad que existe entre los dos conductores del cable, la bobina L representa la autoinducción existente en el cable, y la resistencia R representa las pérdidas óhmicas del dieléctrico con pérdidas que rellena el cable.

2. **Circuito LC en Paralelo:** En la resonancia, la impedancia del circuito es máxima, lo que significa que la corriente que pasa por la fuente es mínima.

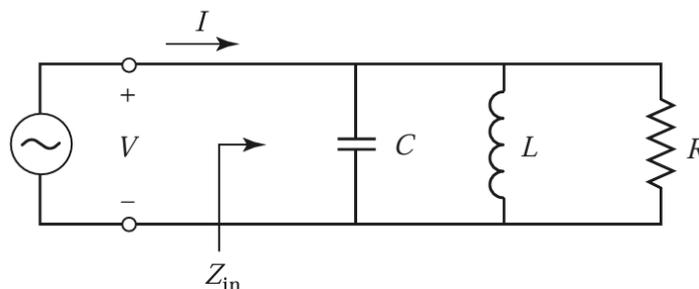


ILUSTRACIÓN 4. CIRCUITO RESONANTE LC EN PARALELO [1]

LÍNEAS MICROSTRIP

Las líneas microstrip son un tipo de línea de transmisión ampliamente utilizada en circuitos de radiofrecuencia (RF) y microondas debido a su simplicidad de fabricación, bajo costo y eficacia en guiar señales de alta frecuencia. Su estructura de transmisión consiste en una franja conductora delgada depositada sobre la superficie de un sustrato dieléctrico, con un plano de tierra ubicado en la parte inferior del sustrato. La configuración básica se puede describir como:

- **Conductor:** Una tira de metal (generalmente cobre) que actúa como la línea de transmisión.
- **Sustrato dieléctrico:** Un material no conductor que soporta la franja conductora y separa el conductor del plano de tierra. Su permitividad relativa (ϵ_r) es un parámetro clave que afecta el comportamiento electromagnético de la línea.
- **Plano de tierra:** Una capa conductora continua en la parte inferior del sustrato que actúa como referencia de potencial.

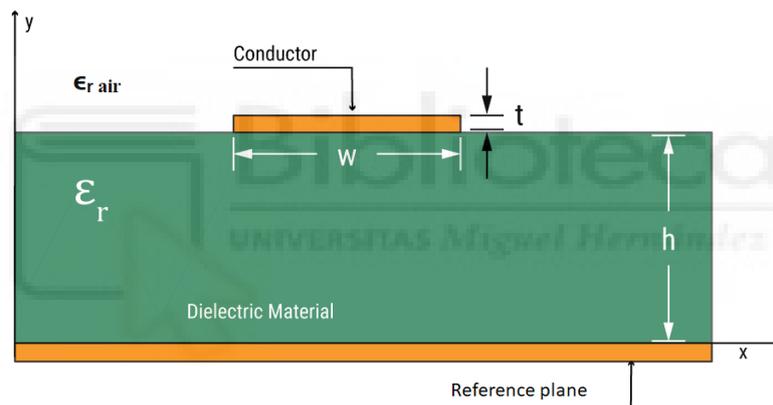


ILUSTRACIÓN 5. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA LÍNEA MICROSTRIP DE 3 CAPAS [9]

Las líneas microstrip en el eje Y , ver ILUSTRACIÓN 5, genera un campo electromagnético en el espacio entre el conductor y el plano de tierra. El campo se propaga a través del sustrato dieléctrico y parcialmente en el aire por encima del conductor, lo que define las características de la línea.

Existe un parámetro fundamental conocido como la impedancia característica (Z_0) de una línea microstrip depende de las dimensiones del conductor, la constante dieléctrica del sustrato, y la altura del sustrato. La impedancia característica, es una propiedad crítica que determina como la línea transmite señales sin reflexiones o pérdidas de energía.

La impedancia característica depende de unos factores:

- **W** es el ancho de la franja conductora.
- **h** es el grosor del sustrato.
- **T** es el espesor del conductor.
- **Er** es la constante dieléctrica del sustrato.

Otro parámetro transcendental es la velocidad de propagación (V_p) de la señal en una línea microstrip que está influenciada por la constante dieléctrica efectiva (ϵ_{eff}), que es una combinación de la constante dieléctrica del sustrato y del mismo aire que influye. Puesto a que a nivel teórico hay muchas veces que se asume un valor unitario para la constante dieléctrica del aire, pero la realidad no es así [1].

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \text{ [m/s]} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{V_p}{f} \text{ [m/s]} \quad (6)$$

Donde (c) es la velocidad de la luz en el vacío y la longitud de onda (λ) en la línea microstrip.

Por último, otro parámetro significativo y con una profundidad muy grande son las pérdidas en una línea microstrip. Estas se pueden dividir en varias categorías:

- **Pérdidas conductivas:** Debidas a la resistencia del conductor, que aumenta con la frecuencia debido al efecto pelicular.
- **Pérdidas dieléctricas:** Asociadas a la disipación de energía en el sustrato.
- **Pérdidas por radiación:** A frecuencias muy altas, la línea microstrip puede actuar como una antena, radiando parte de la energía.

La atenuación (α) total en la línea es la suma de estas pérdidas y se expresa en dB/m.

RESONANCIA EN ALTA FRECUENCIA

La resonancia en alta frecuencia es un fenómeno fundamental en el diseño de circuitos de microondas y radiofrecuencia, y se observa comúnmente en estructuras como las líneas microstrip.

En un sistema de alta frecuencia, como una línea microstrip, la resonancia ocurre cuando la longitud eléctrica de la línea o de una sección de la línea es un múltiplo impar de la mitad de la longitud de onda ($\lambda/2$) de la señal que viaja a lo largo de ella. En términos más sencillos, la resonancia se produce cuando la longitud física de la línea está relacionada con la longitud de onda de la señal de tal manera que se produce una condición de resonancia.

La longitud eléctrica de una línea microstrip está dada por:

$$\theta = \beta \cdot l = \frac{2\pi l}{\lambda} \quad (7)$$

donde:

- θ (theta) es la longitud eléctrica en radianes,
- β (beta) es la constante de propagación ($\beta=2\pi/\lambda$).
- l es la longitud física de la línea,
- λ (lambda) es la longitud de onda en el medio.

La condición de resonancia ocurre cuando:

$$\theta = n \cdot \pi \quad (8)$$

Para una línea abierta o cortocircuitada, implica que:

$$l = \frac{\lambda}{2} (m) \quad (9)$$

Como decía, esto significa que la longitud física de la línea debe ser igual a un múltiplo impar de $\lambda/2$ para que ocurra la resonancia [1].

En líneas microstrip existen varios tipos de resonadores, los cuales son:

- **Resonador de Microstrip de Medio Longitud de Onda ($\lambda/2$):** Es una sección de microstrip abierta en ambos extremos que tiene una longitud igual a $\lambda/2$. En la frecuencia de resonancia, la señal forma un patrón de ondas estacionarias, con voltajes máximos en los extremos abiertos y corriente mínima en el centro.
- **Resonador de Microstrip de Cuarto de Longitud de Onda ($\lambda/4$):** Esta estructura tiene un extremo cortocircuitado y el otro extremo abierto. La resonancia ocurre cuando la longitud de la línea es igual a $\lambda/4$. En este caso, hay un máximo de corriente en el extremo cortocircuitado y un máximo de voltaje en el extremo abierto.

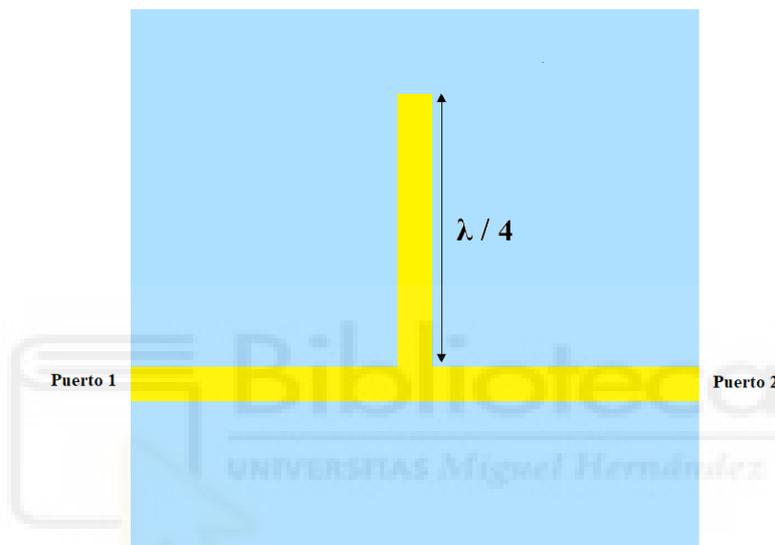


ILUSTRACIÓN 6. RESONADOR MEDIANTE LÍNEA MICROSTRIP DE CUARTO DE LONGITUD DE ONDA [10]

En frecuencias muy altas, los efectos del sustrato dieléctrico y las pérdidas en el conductor y el sustrato pueden alterar ligeramente la condición de resonancia. Las pérdidas dieléctricas y conductivas introducen un factor de calidad (Q) que define la agudeza de la resonancia. Un Q más alto indica una resonancia más selectiva, mientras que un Q más bajo sugiere un mayor ancho de banda resonante.

Las líneas microstrip resonantes se utilizan en una amplia gama de aplicaciones de microondas, incluyendo:

- **Filtros de banda:** Para seleccionar o rechazar frecuencias específicas.
- **Osciladores:** Para generar señales de alta frecuencia estables.
- **Antenas:** Las antenas microstrip o "patch" a menudo utilizan resonancia para operar a unas frecuencias específicas.



CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo describe los procedimientos y los diferentes métodos utilizados en los procesos de fabricación, los materiales empleados, y las herramientas de software que fueron esenciales para la implementación y realización de este trabajo final de Grado.

3.1. MÉTODOS DE FABRICACIÓN. FRESADO Y IMPRESIÓN 3D

FRESADO

Para la fabricación de las estructuras y circuitos de alta frecuencia, se utilizó una fresadora CNC (Control Numérico Computarizado).



ILUSTRACIÓN 7. FABRICACIÓN DEL RESONADOR MICROSTRIP DE 0.8 MM DE ANCHO, 21 MM DE LARGO Y UNAS DIMENSIONES DE 46X60 MM MEDIANTE LA FRESADORA LPKF PROTOMAT 93S

Esta máquina permitió la fabricación precisa de patrones sobre los materiales conductores y dieléctricos. El proceso de fresado consistió en los siguientes pasos:

- **Preparación del material:** Se fijó el material en la plataforma de trabajo de la fresadora, asegurando que estuviera nivelado y bien sujeto para evitar desplazamientos durante el proceso.
- **Programación del diseño:** Utilizando un software, se diseñaron las trayectorias de fresado, que luego se tradujeron en instrucciones G-code, el lenguaje que la fresadora interpreta para realizar cortes y grabados.
- **Fresado:** La máquina ejecutó el fresado sobre el cobre, siguiendo las trayectorias programadas. Para este proceso, se utilizaron fresas de diferentes diámetros dependiendo de la precisión y los detalles requeridos en cada área del diseño.
- **Post-procesado:** Una vez completado el fresado, se retiraron las rebabas y se limpiaron las superficies para asegurar que los circuitos estuvieran libres de residuos que pudieran afectar su rendimiento.

IMPRESIÓN 3D

Por otro lado, la impresora 3D fue crucial para la fabricación de las partes dieléctricas y soportes del circuito. Se empleó una impresora 3D, modelo Prusa i3 hephestos de BQ, de filamento fundido (FDM) utilizando los materiales PLA, ABS y Preperm3. El proceso de impresión 3D se llevó a cabo de la siguiente manera:

- **Modelado en 3D:** Los diseños de las estructuras dieléctricas se realizaron en software llamado Cura, generando archivos en formato STL (Surface Tessellation Language), que es compatible con la mayoría de las impresoras 3D.
- **Configuración de la impresora:** Se configuró la impresora con los parámetros adecuados según el material utilizado. Se ajustaron las temperaturas del extrusor y de la cama de impresión, así como la velocidad de impresión y el porcentaje de relleno.
- **Impresión:** El proceso de impresión se llevó a cabo capa por capa, depositando el material fundido según el diseño previamente cargado en la impresora. La precisión de la impresión fue clave para asegurar la integridad y funcionalidad del material dieléctrico.
- **Acabado:** Al finalizar la impresión, las piezas se sometieron a un proceso de curado y limpieza para eliminar posibles irregularidades y mejorar la adhesión en los puntos de contacto con el material conductor.

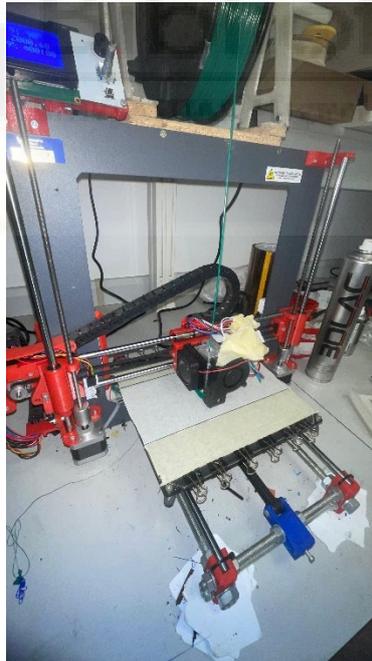


ILUSTRACIÓN 8. FABRICACIÓN DEL SUSTRATO A CARACTERIZAR CON IMPRESORA 3D BQ PRUSA I3 HEPHESTOS POR MÉTODO DE FILAMENTO FUNDIDO (FDM)

3.2. MATERIALES

Para el uso del método de fabricación en 3D trabajamos con 3 filamentos dieléctricos diferentes, en concreto:

PLA (Polylactic Acid)

El PLA es un tipo de material que proviene del almidón de maíz, que tiene como ventaja su facilidad de utilización, lo que lo convierte en el sustrato más empleado. Sin embargo, se trata de un material poco resistente, y que no es recomendable emplear en piezas que vayan a ser sometidas a mucha carga.

Permitividad Relativa (ϵ_r)	Tangente de Pérdidas ($\tan\delta$)	Características de impresión		
		Temperatura de extrusión	Temperatura cama caliente	Velocidad de extrusión
2.8	0.02	217 °C	48 °C	40 mm/s

TABLA 1. PROPIEDADES DEL MATERIAL PLA [3]

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

Es un polímero termoplástico muy empleado en aplicaciones industriales, y es especialmente conocido por la creación de piezas ligeras y con mucha resistencia al impacto. Este material proviene del petróleo, y está formado por un 20% de acrilonitrilo, un 25% de butadieno y un 55% de estireno.

Permitividad Relativa (ϵ_r)	Tangente de Pérdidas ($\tan\delta$)	Características de impresión		
		Temperatura del extrusión	Temperatura cama caliente	Velocidad de extrusión
2.7	0.018	242 °C	95 °C	15 mm/s

TABLA 2. PROPIEDADES DEL MATERIAL ABS [3]

PREPERM

El Preperm3 ofrece una constante dieléctrica estable en un rango de frecuencias y temperaturas amplias con unas pérdidas bajas. Es un sustrato que ofrece una gran variedad de opciones con distintas permitividades relativas. De todas ellas, se van a estudiar las que presentan $\epsilon_r = 3$, rellenando para ello una tabla con las principales características que presentan:

Permitividad Relativa (ϵ_r)	Tangente de Pérdidas ($\tan\delta$)	Características de impresión		
		Temperatura del material	Temperatura cama caliente	Velocidad de extrusión
3	0.046	230 °C	100 °C	40 mm/s

TABLA 3. PROPIEDADES DEL MATERIAL PREPERM3 [11]

Continuando con los materiales utilizados en el proceso de fabricación mediante fresado para el resonador multicapa se utilizaron los siguientes:

En nuestro caso utilizamos laminado de cobre, dado que las capas de cobre se pueden laminar directamente sobre el sustrato dieléctrico. Este proceso suele realizarse mediante prensado en caliente, donde una lámina de cobre se une al sustrato bajo presión y temperatura.

Partiendo del laminado de cobre con el sustrato, las diferentes áreas donde se utilizan son;

1. Capa de tierra (ground), en la cara inferior (Bottom).
2. Capa de señal (Traza conductora), en la cara superior (Top).

COBRE

Conductividad Eléctrica (σ) (20°C)	Conductividad Térmica (κ)	Resistividad Eléctrica (ρ)	Espesor [um]
5.813×10^7	401	1.68×10^{-8}	35

TABLA 4. PROPIEDADES DEL MATERIAL COBRE [1]

ALUMINIO

Conductividad Eléctrica (σ) (20°C)	Conductividad Térmica (κ)	Resistividad Eléctrica (ρ)	Espesor [um]
3.816×10^7	205	2.65×10^{-8}	0.5

TABLA 5. PROPIEDADES DEL MATERIAL ALUMINIO [1]

FR4

Entremedias de las 2 capas mencionadas arriba, se sitúa el sustrato comúnmente utilizado en el sector, llamado FR4 (fibra de vidrio reforzada con resina epoxi). Como ya sabemos, este material se utiliza como material dieléctrico llegando a ser fundamental en la electrónica por sus propiedades.

Permitividad Relativa (ϵ_r)	Tangente de Pérdidas ($\tan\delta$)	Espesor [um]
4.7	0.014	400

TABLA 6. PROPIEDADES DEL MATERIAL FR4 A 1 MHz [12]

3.3. MÉTODOS DE DISEÑO Y MODELADO EN 3D MEDIANTE SOFTWARE

En este apartado incluiremos las herramientas de software que nos han permitido integrar a nivel de diseño y de modelización para realizar el proyecto de una manera más profesional y sofisticada para no cometer errores en sus diferentes procesos.

3.3.1. Advanced Design System (ADS)

Advanced Design System (ADS) es un software de simulación y diseño ampliamente utilizado en la industria de la ingeniería de radiofrecuencia (RF) y microondas. Desarrollado por Keysight Technologies, ADS ofrece un conjunto completo de herramientas para el diseño, análisis y optimización de circuitos RF y microondas, incluyendo amplificadores, osciladores, mezcladores y filtros.

Una de las características más destacadas de ADS es su capacidad para modelar y simular de manera precisa circuitos complejos, permitiendo a los ingenieros predecir el comportamiento del circuito antes de la fabricación. Esto incluye diseño circuito del esquema, la simulación de parámetros S, simulación EM, etc.

Enfocándonos hacia nuestro diseño, comenzaremos hablando de los pasos previos que hemos ido realizando para concluir nuestros diversos diseños, empezando por los cálculos.

Dentro de ADS, existe una herramienta específica que permite calcular las dimensiones de las líneas de transmisión para lograr una adaptación de impedancia y una resonancia deseada. Este proceso es crucial para asegurar que el sistema opere correctamente a la frecuencia de interés, en este caso, 2 GHz.

En la calculadora de ADS, llamada LineCalc definimos los parámetros de diseño, contando con características propias de él que también deben ser definidas, y son las siguientes;

- **Impedancia Característica (Z_0):** 50 Ohm
- **Frecuencia de Operación:** 2 GHz
- **Fase Deseada:** 90°
- **Material del Substrato:** FR4

Con estos parámetros la calculadora proporciona valores como el ancho (W) y la longitud (L) de la línea de transmisión para cumplir con la impedancia y la fase deseada. Valores que son cruciales para la fabricación precisa del resonador

```

LineCalc (*) 570.shp Jul 19 2022

Sat Sep 7 17:49:43 2024

Element type: MLIN
Element ID: MLIN_DEFAULT

Units
  Freq = GHz
  Length = mm
  Res = Ohm
  Angle = deg

Frequency = 2.000

Shared Parameters:
  Substrate: MSUB = MSUB_DEFAULT
    Er = 4.400
    Mur = 1.000
    H = 400.000 um
    Hu = 1e+33 mm
    T = 35.000 um
    Cond = 5.8e+7
    TanD = 0.020
    Rough = 0.000 mil
    DielectricLossModel = 1.000
    FreqForEpsrTanD = 1.0e9
    LowFreqForTanD = 1.0e3
    HighFreqForTanD = 1.0e12

Physical Parameters
  W = 0.735 mm
  L = 20.866 mm
  Wall1 = n/a mil
  Wall2 = n/a mil

Electrical Parameters
  Z0 = 50.000 Ohm
  E_Eff = 90.000 deg

Result Parameters
  K_Eff = 3.225
  A_DB = 0.149
  SkinDepth = 1.477 um
  
```

ILUSTRACIÓN 9. VALORES DEL SUSTRATO FR4 PARA EL CÁLCULO DEL ANCHO (W) Y LARGO (L) DE LA SECCIÓN DE COBRE CONDUCTORA DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ, 50 OHM Y 90° DE FASE

Una vez calculados estos parámetros longitudinales para nuestra procedemos a diseñar nuestro esquemático que será, el precedente para generar un layout del mismo diseño para posteriormente modelarlo en 3D para su fabricación.

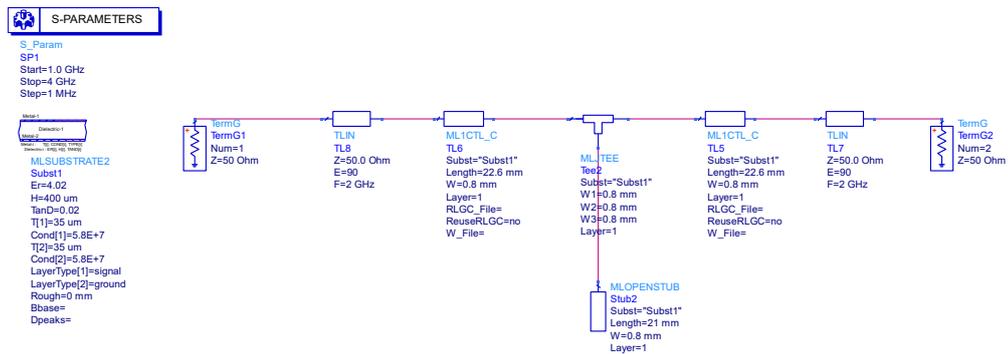


ILUSTRACIÓN 10. DISEÑO EN ADS DEL ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO Y SU DEFINICIÓN MULTICAPA A TRAVÉS DEL SUSTRATO AÑADIDO MULTICAPA PARA EL RESONADOR A 2 GHZ, AÑADIENDO EL CAMPO DE SIMULACIÓN DE LOS PARÁMETROS S

3.3.2. FreeCad

FreeCad fue la herramienta de diseño para generar los layout del modelado 3D por su versatilidad y, sobre todo, por ser de código abierto. Fue muy útil para crear los formatos STL que posteriormente aplicaríamos mediante el software Cura transformando ese archivo a instrucciones de lenguaje máquina de impresión 3D y fabricar los sustratos a caracterizar que colocaríamos en el resonador.

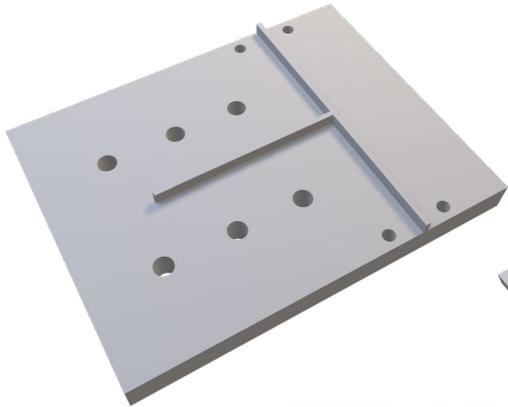


ILUSTRACIÓN 11. RENDERIZADO EN 3D DEL RESONADOR A 2 GHZ EN FREECAD



ILUSTRACIÓN 12. RENDERIZADO EN 3D DE LA PIEZA DEL SUSTRATO BAJO ENSAYO MODELADO EN FREECAD PARA SU FABRICACIÓN

3.3.3. Cura

Cura es un software de corte (slicer) muy popular utilizado en la impresión 3D, desarrollado por Ultimaker. Su principal función es convertir modelos 3D en archivos de instrucciones específicas para impresoras 3D, generalmente en formato G-code. Este archivo guía a la impresora en cómo debe construir el objeto capa por capa. Esta herramienta ofrece muchas ventajas como por ejemplo antes de enviar el modelo a la impresora, Cura ofrece una vista previa en la que se puede ver cómo se generarán las capas y se colocará el material. Esto ayuda a identificar problemas potenciales y ajustar la configuración antes de la impresión.

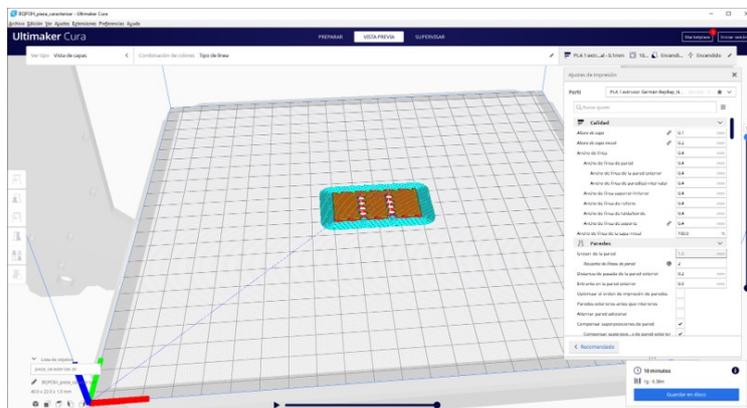


ILUSTRACIÓN 13. MODELADO EN CURA PARA INDICAR LOS PARÁMETROS DE FABRICACIÓN EN LA IMPRESORA 3D

3.3.4. HFSS

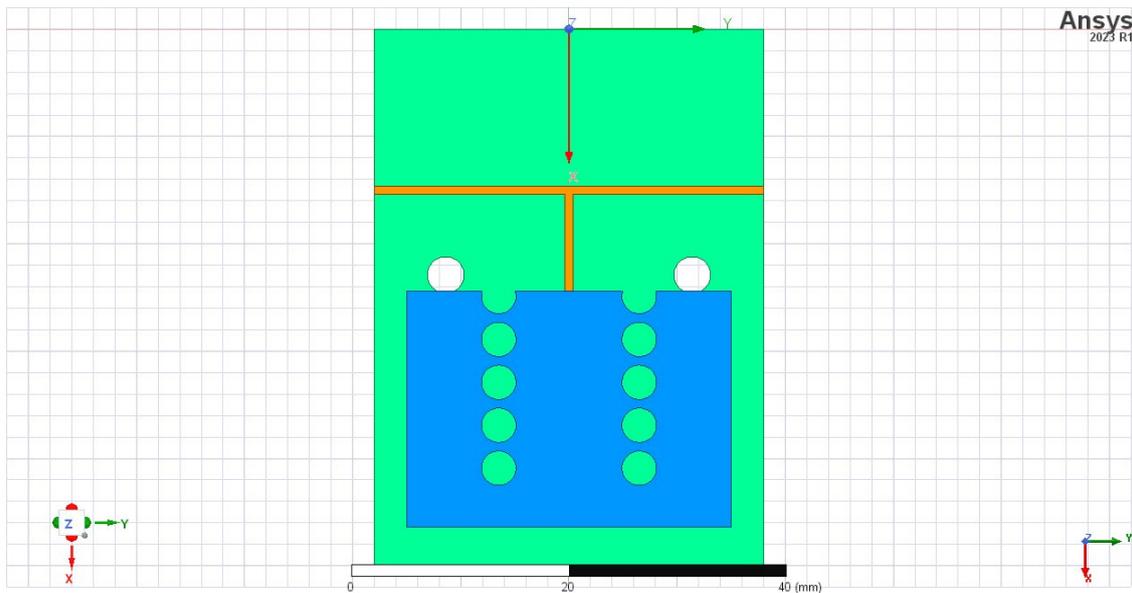


ILUSTRACIÓN 14. MODELADO 3D DEL DISEÑO MULTICAPA DEL RESONADOR A 2 GHZ CON EL MATERIAL DIELECTRICO (PLA) A CARACTERIZAR CON HFSS

HFSS es un software de simulación electromagnética de alta frecuencia desarrollado por Ansys. Está especializado en la simulación de campos electromagnéticos 3D y es especialmente útil para modelar estructuras complejas, como antenas, guías de onda, filtros, y en nuestro caso, un resonador para caracterizar materiales dieléctricos como muestra la ILUSTRACIÓN 8.

Este software tan sofisticado ofrece una gran variedad de ventajas las cuales nos han llevado a introducirlo como herramienta esencial de trabajo y de apoyo en nuestro proyecto.

HFSS utiliza métodos numéricos avanzados como el Método de Elementos Finitos (FEM) para resolver las ecuaciones de Maxwell en 3D, lo que permite una simulación muy precisa de la distribución de campos electromagnéticos en la estructura.

Este, además, ofrece un manejo de geometrías complejas con alta precisión consiguiendo modelizar el dispositivo de una forma muy fidedigna. Esta modelización, es tan realista porque permite definir directamente cada material de cada una de las capas generadas, pudiendo añadir todo tipo de parámetros según el material ya sea dieléctrico (permitividad relativa, permeabilidad, etc.) o conductor.

Este tipo de ventajas han sido de gran ayuda de cara a las simulaciones, pudiendo generar las gráficas de modos resonantes e identificando la frecuencia de resonancia para la caracterización del material.

También podemos efectuar otro tipo de análisis, el cual no le hemos dado el protagonismo por simplicidad en el proyecto. Sin embargo, esta herramienta de diseño continúa dejando muestras de su alta capacidad y competitividad en el mercado, puesto que, nos permite observar cómo afecta la distribución de campos en el material, identificando áreas de alta concentración de campos (hot spots), y poder realizar un estudio bastante profundo de la uniformidad de los campos del material como la opción de calcular patrones de radiación, ganancia, eficiencia y otros parámetros clave de radiación a las frecuencias resonantes.

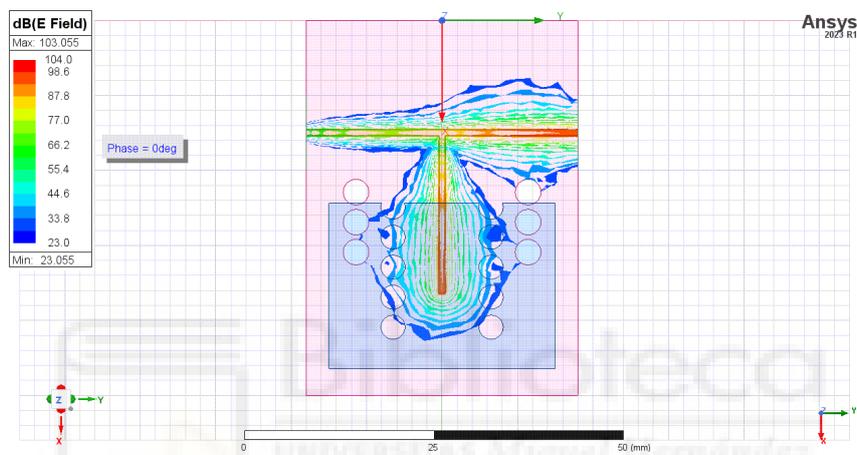


ILUSTRACIÓN 15. SIMULACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN V/M DEL RESONADOR A 2 GHZ INTERACTUANDO CON EL SUSTRATO BAJO ENSAYO CON NIVELES DE RADIACIÓN MEDIDOS EN DB EN HFSS

3.4. INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES (VNA)

Un Analizador Vectorial de Redes (VNA) es un instrumento de medición especializado en la caracterización de dispositivos y sistemas en el dominio de las frecuencias. Este equipo es ampliamente utilizado en ingeniería de RF (Radiofrecuencia), microondas, telecomunicaciones, diseño de antenas, y otros campos que requieren análisis detallado de componentes de alta frecuencia. Esta herramienta tiene una relevancia muy importante por la capacidad de medición tanto de la magnitud como de la fase de las señales.

Utilizamos este instrumento de medición para la realización de medidas del dispositivo resonador fabricado. En concreto el VNA disponible es el modelo E8363B de Keysight, el cual puede hacer barridos en rangos de frecuencia comprendidos desde los 10 MHz hasta los 40 GHz.



ILUSTRACIÓN 16. ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES EMPLEADO E8363B KEYSIGHT

Este, a través de sus sondas mide las propiedades de las ondas de radiofrecuencia, en concreto, las señales reflejadas y transmitidas que son bien conocidas como parámetros S (Scattering) o parámetros de dispersión. Cada uno de ellos toma distintas lecturas de la señal, como, por ejemplo;

- **Parámetro S11:** Mide la cantidad de señal reflejada de nuevo en el puerto de entrada.
- **Parámetro S21:** Mide la cantidad de señal que pasa a través del dispositivo del puerto de entrada al puerto de salida.
- **Parámetros S12 y S22:** Miden la señal en la dirección inversa, es decir, reflejada y transmitida hacia atrás.

Sin embargo, antes de su uso, debe ser debidamente calibrado ya que de esto depende la presión de sus lecturas. Existen 4 tipos de calibración;

- **Short (Corto):** Se conecta un cortocircuito al puerto de prueba. Esto define un punto de referencia con impedancia cero.
- **Open (Abierto):** Se deja el puerto de prueba abierto, definiendo un punto de referencia con impedancia infinita.
- **Load (Carga):** Se conecta una carga de referencia, normalmente 50 ohmios, para proporcionar una referencia de impedancia nominal.
- **Thru:** Se conecta directamente un puerto de prueba al otro para calibrar la transmisión.

CONECTORES SOUTHWEST

Para una buena conexión entre la sonda del VNA y el dispositivo resonador, hicimos una sustitución de los conectores comunes SMA por los conectores Southwest, los cuales transmiten la señal del instrumento de medición a través del resonador para leer los parámetros de Scattering y obtener una lectura más definida de la frecuencia de resonancia. También se llegaron a usar dado a que los primeros eran muy endebletes requiriendo un punto de soldadura entre el cobre y la conexión, siendo una conexión muy frágil, donde experimentamos roturas del propio conector o problemas a la hora de realizar un contacto consistente.



ILUSTRACIÓN 17. CONECTOR SOUTHWEST PARA LA CONEXIÓN CON LAS SONDAS DEL ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES



CAPÍTULO 4. DESARROLLO Y RESULTADOS

En el siguiente apartado explicaremos que conlleva todo el desarrollo y la evolución de nuestro dispositivo para la caracterización de materiales dieléctricos. El desarrollo se centra en fabricar un dispositivo resonante que opere a una frecuencia de microondas, diseñado específicamente para medir las propiedades dieléctricas de diferentes materiales. Estos materiales son analizados utilizando el VNA y posteriormente modelizados en distintos softwares especializados (ADS y HFSS).

El dispositivo con el cual pretendemos caracterizar diversos materiales dieléctricos (PLA, ABS y PREPERM3) utilizados como filamentos en la impresión 3D, se concibió con unas especificaciones de apilado multicapa, es decir, en tecnología microstrip. Estas especificaciones del resonador multicapa, contaban con una distribución de un total de 4 capas, divididas como mostramos a continuación:

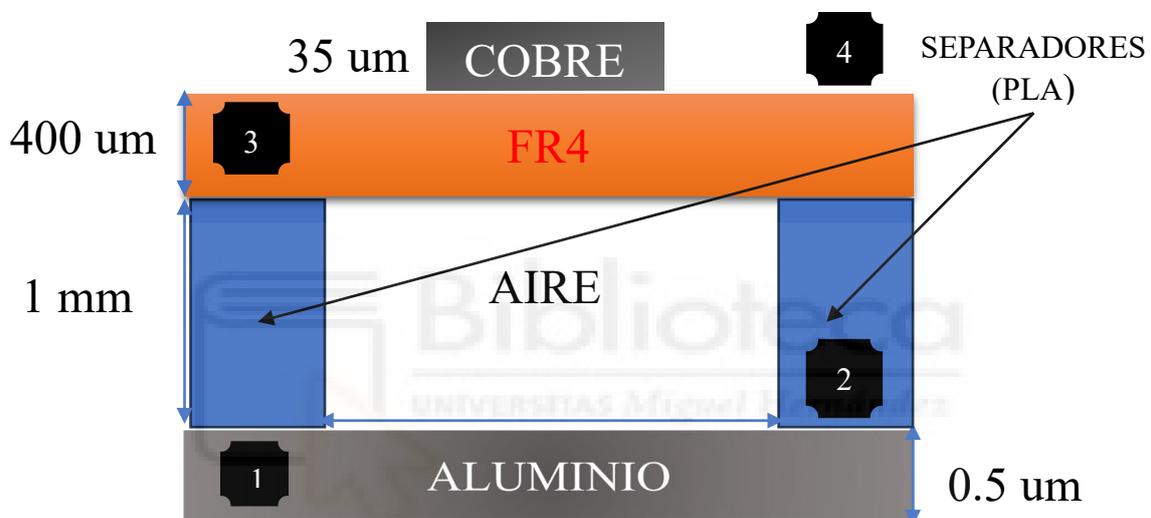


ILUSTRACIÓN 18. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PRIMER DISEÑO DEL RESONADOR EN LÍNEA MICROSTRIP

En esta distribución, ILUSTRACIÓN 18, se puede ver de manera visual todas las capas que en conjunto forman la estructura de nuestro dispositivo resonante caracterizador de materiales en tecnología planar.

- 1) En la primera capa, cabe resaltar que el material conductor elegido como plano de masa no es el material comúnmente utilizado, cobre, esto se debe a que se disponía con más rapidez de este material, aluminio, en el laboratorio y decidimos avanzar con él, siendo un material igualmente válido.
- 2) Seguidamente, en la que asignaremos la segunda capa, nos encontramos con 2 materiales distintos en la misma altura de apilado. Por un lado, los mencionados separadores, estos simplemente dan un soporte a la estructura del conjunto del resonador, consiguiendo además generar un hueco al que llamaremos cavidad resonante, que como podemos apreciar en esa cavidad (hueco) tenemos el otro material, aire. Este otro material podemos decir que es variable, ya que, será el espacio reservado para introducir los materiales que deseamos caracterizar, por lo que consecuentemente si no se introduce ninguno siempre tendremos aire.

- 3) En tercer lugar, podemos ver el sustrato que por definición es muy utilizado, FR4, siendo el material aislante con el cual trabajaremos a lo largo del desarrollo por sus grandes prestaciones como material dieléctrico en relación con su coste.
- 4) Por último, la parte superior del dispositivo, en el cuarto lugar, contamos con el material conductor de cobre que se ajustará en la parte de diseño para operar a la frecuencia característica de 2 GHz. En esta última capa de la estructura, en rigor, no solamente tenemos cobre, sino que también contamos con el aire, cosa, que en la modelización deberemos tener en cuenta dado que idealmente es sabido que el valor de la permitividad relativa de este medio es unitario, simulando al vacío y como digo, idealmente.

4.1 PRIMER PROTOTIPO. RESONADOR

4.1.1. DISEÑO

La primera fase del desarrollo consistió en el diseño del resonador multicapa. Se emplearon herramientas avanzadas, específicamente el software ADS (Advanced Design System), ver ILUSTRACIÓN 10. Esta fase es crucial, pues cualquier error que se produzca se arrastraría a lo largo de todo el desarrollo, así pues, la implicación en este proceso debe ser minuciosa y precisa.

Las especificaciones iniciales del diseño se optimizaron para operar a 2 GHz mediante la calculadora propia de ADS, ver ILUSTRACIÓN 9, y con la distribución de capas definida en la ILUSTRACIÓN 18.

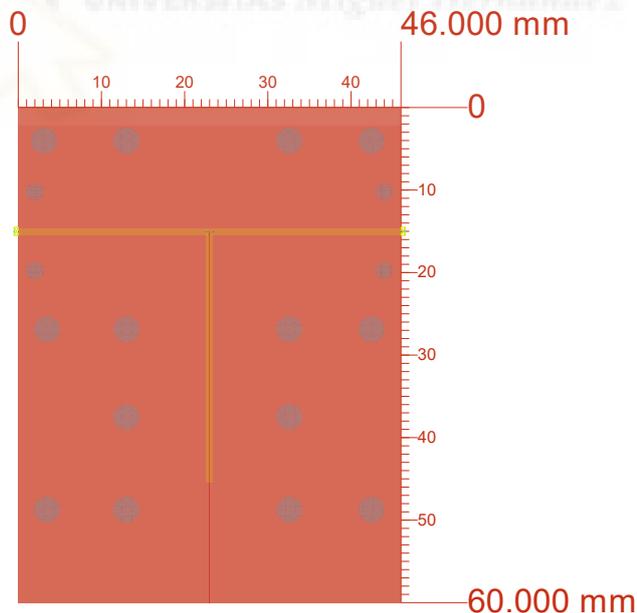


ILUSTRACIÓN 19. LAYOUT DEL PRIMER DISEÑO DEL RESONADOR A 2 GHZ GENERADO EN ADS

En la ILUSTRACIÓN 19 vemos el layout generado por ADS, donde la distribución de capas se distingue por colores y los orificios destinados para atornillar y ejercer presión a la vez, en toda la estructura, y otros más pequeños para los conectores por los que excitemos el resonador.

4.1.2. FABRICACIÓN

Durante el proceso de fabricación del primer prototipo, se realizaron varios ajustes para optimizar el rendimiento y precisión del dispositivo.

Comenzando con el resonador de cavidad resonante de dimensiones 40x60 mm fabricamos cada una de las partes que en conjunto forman el dispositivo descrito en el apartado 4.1.1.

- 1) Aluminio, 0.5 um
- 2) Aire (Hueco), 1 mm
- 3) FR4, 400um
- 4) Cobre, 35 um

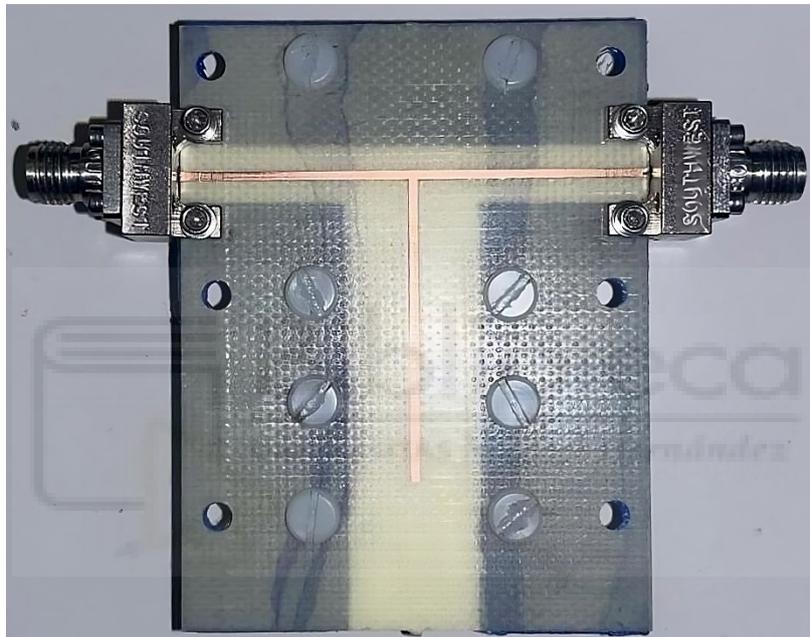


ILUSTRACIÓN 20. RESONADOR 2 GHZ CON CAVIDAD DE RESONANCIA DE 1 MM DE ALTURA DE LA CAVIDAD RESONANTE PARA SUBSTRATO BAJO ENSAYO

Se puede observar en la ILUSTRACIÓN 20, como hay una zona más clara o amarillenta, la cual está exclusivamente reservada para introducir la pieza del material a caracterizar. Sus dimensiones estaban pensadas para que cupiese un simple y pequeño trozo del sustrato con lo que sería suficiente para ver como influía en él la excitación del resonador.

4.1.3. MEDICIÓN Y ANÁLISIS

Al realizar las medidas experimentales y comprobar los resultados obtenidos con el diseño inicial, se identificaron varios problemas que contribuyeron a la falta de precisión en las mediciones:

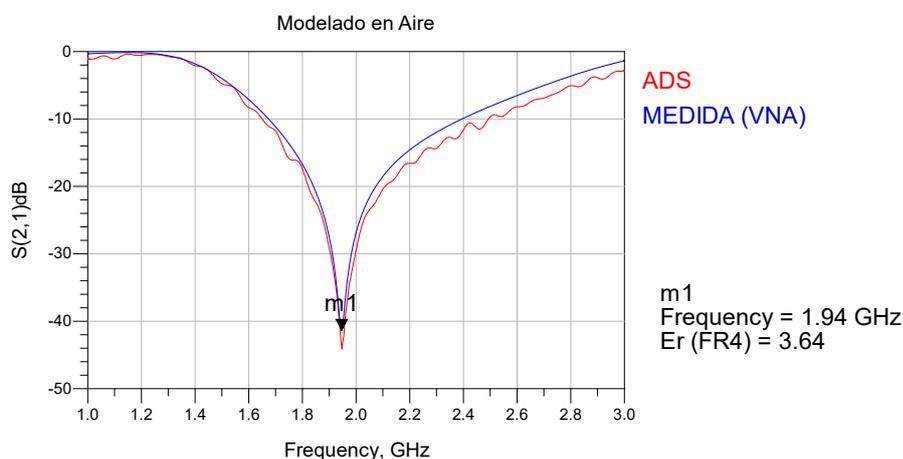


ILUSTRACIÓN 21. SIMULACIÓN EN ADS (ROJO) Y MEDIDA EXPERIMENTAL VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO $S(2,1)$ DEL RESONADOR MODELIZADO EN AIRE (SIN MATERIAL)

- **Dificultades en la Fabricación y Ensamblaje:** El diseño multicapa original requería un espacio específico de 1 mm para el sustrato bajo ensayo, lo que introdujo dificultades en el ensamblaje y colocación precisa del material. Cualquier variación en la distancia o alineación podría alterar los resultados de la medición, haciendo que el proceso fuera menos robusto y repetible.
- **Acoplamiento Inadecuado del Campo Electromagnético:** Uno de los problemas principales fue la ubicación del sustrato bajo ensayo entre el plano de masa y la capa de FR4. Esta disposición no permitía una interacción adecuada entre el campo electromagnético generado por el resonador y el material bajo ensayo, ya que no podíamos ejercer la misma presión sobre todo el área del material de manera homogénea. Esto, es debido a la fabricación del material de impresión 3D por filamento fundido, que como hemos explicado, en el apartado 3.1, la fabricación del material es capa a capa generando una rebaba de aire en la superficie del material provocando que el contacto sea menos directo. Como resultado, el desplazamiento de la frecuencia de resonancia fue menor de lo esperado en la modelización, afectando la sensibilidad del dispositivo.
- **Desigualdad en la Distribución del Campo:** El campo electromagnético en el resonador no estaba distribuido de manera uniforme en la región donde se colocaba el sustrato bajo ensayo, puesto que la manipulación de este sufría malformaciones y se apreciaba significativamente. Se podía observar, de manera visual, que el apilado de capas al ser muy delgado y maleable cuando se ejercía la presión para sujetar el material a caracterizar provocaba que diferentes partes del material experimentaran diferentes intensidades de campo. En consecuencia, obteníamos lecturas inconsistentes y menos fiables.

4.2. SEGUNDO PROTOTIPO. RESONADOR + LÍNEA DE TRANSMISIÓN

RESONADOR

Debido a las discrepancias observadas en las lecturas de los parámetros dieléctricos, se procedió a revisar y modificar el diseño del resonador. Se identificó que la ubicación del sustrato bajo ensayo, originalmente colocado entre el plano de masa y el sustrato FR4, no permitía una interacción óptima con el campo electromagnético del resonador. Para solucionar este problema, el diseño se modificó de la siguiente manera:

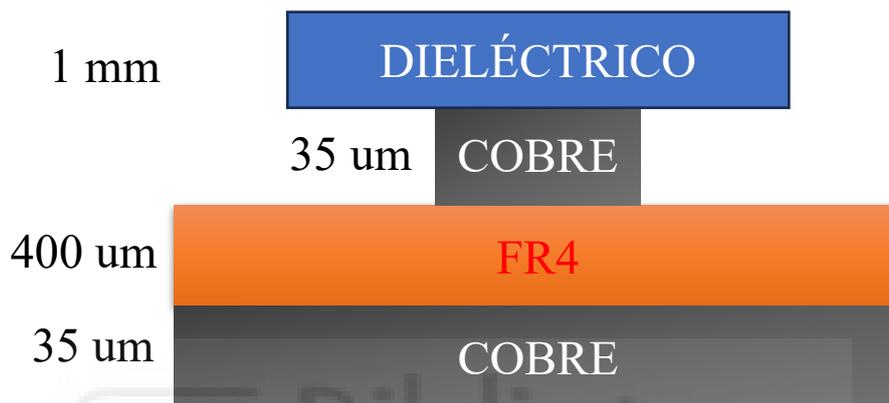


ILUSTRACIÓN 22. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL SEGUNDO PROTOTIPO DEL RESONADOR EN LÍNEA MICROSTRIP

La estructura multicapa pasó a consistir en una capa inferior de cobre que actúa como plano de masa cambiando el material conductor, seguida por una capa de FR4 y encima de esta una capa de cobre que forma el resonador de 2 GHz, que finalmente, sobre esta, se sitúa y por último el sustrato bajo ensayo, ILUSTRACIÓN 22. Esta reubicación del sustrato bajo ensayo en la parte superior del resonador y permitiendo una manipulación más manejable, en la cual, se podía ejercer una presión uniforme en todo el dispositivo, cosa que en el anterior diseño provocaba malformaciones y concavidades en el delgado apilado. De esta manera, se mejoraron muchos aspectos de diseño y montaje respetando sus dimensiones iniciales con la idea de que el material interactuara directamente con el campo electromagnético generado por el resonador.

Los cambios más significativos son el intercambio de capas, dejando de tener la mencionada cavidad resonante por un mejor contacto del material fabricado por filamento fundido al no tener que sufrir, como decíamos, malformaciones en su manipulación ayudando además a que sea más replicable a la hora de medir diferentes materiales.

LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Por último, exploramos la vía de diseñar una línea de transmisión en un esfuerzo por caracterizar la tangente de pérdidas del sustrato mediante este sistema. La estructura que se pensó fue seguir con la misma que la del resonador, por lo que decimos realizar estos dos sistemas en un mismo set-up. Este planteamiento, hizo que el dispositivo fuese aún más óptimo ya que con el mismo material y con un único dispositivo con 2 sistemas integrados obtendríamos los 2 parámetros dieléctricos que buscamos.

4.2.1. DISEÑO

Tanto el resonador como la línea de transmisión se diseñaron de nuevo utilizando ADS donde se calcularon los parámetros geométricos necesarios para alcanzar una impedancia característica de 50 Ohm, siendo el ancho de línea de 0.8 mm y se mantuvieron los del resonador caracterizado a 2 GHz.

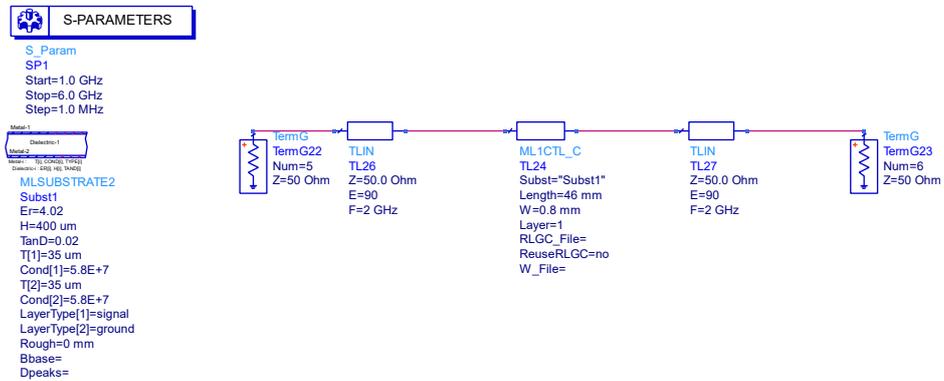


ILUSTRACIÓN 23. DISEÑO ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN EN ADS

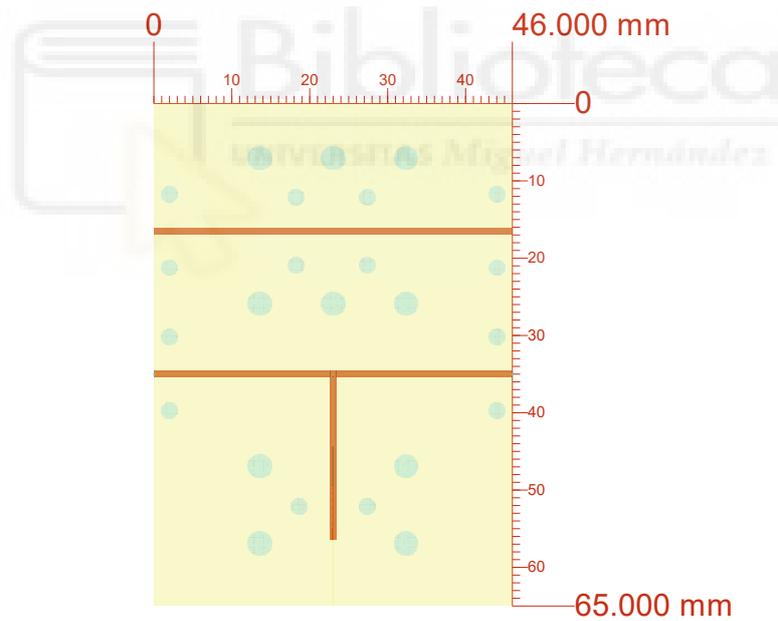


ILUSTRACIÓN 24. LAYOUT DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CON IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DE 50 OHM Y RESONADOR A LA FRECUENCIA CARACTERÍSTICA DE 2 GHZ GENERADO EN ADS

Como se puede ver en la ILUSTRACIÓN 24, tenemos los dos sistemas de caracterización integrados en el mismo set-up añadiendo los correspondientes orificios para atornillar toda la estructura con el material a caracterizar y utilizando los mismos conectores.

4.2.2. FABRICACIÓN

Una vez realizado los diseños de nuestro sistema resonante y de la línea de transmisión, debíamos darle forma. En este apartado comentaremos el proceso de fabricación para ambos.

- **Cambio del orden de capas:** De nuevo, se fabricó otro resonador a 2 GHz con diferente distribución de capas como se ha explicado en el apartado 4.2. Con este diseño, pudimos perfeccionar la problemática del montaje del material bajo ensayo y la manera de ejercer presión sobre toda la estructura de manera uniforme sin provocar malformaciones, además de, mejorar la forma de replicarlo para poder alternar diferentes materiales bajo ensayo con mayor rapidez y ligereza.
- **Resonador con Línea de Transmisión:** También se fabricó un resonador añadiendo una línea de transmisión diseñada específicamente para caracterizar la tangente de pérdidas del material a medir.

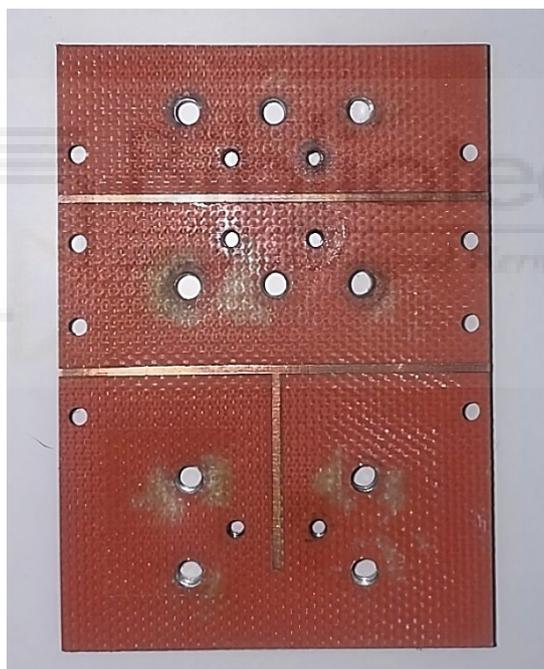


ILUSTRACIÓN 25. RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHz Y LÍNEA DE TRANSMISIÓN CON IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA A 50 OHM

La fabricación del dispositivo se realizó mediante la fresadora indicando las zonas donde debía extraer el cobre y perforando en los distintos orificios marcados, con diferentes medidas de fresas para cada cometido. En la ILUSTRACIÓN 25, se puede apreciar como las zonas cercanas a los orificios manifiestan un color distinto al del sustrato FR4 que es más rojizo, esto es debido a que en la capa inferior de cobre (plano de masa), intenté soldar unas tuercas de metal para que los tornillos pudieran enroscar y hacer presión, con la mala ejecución que esas zonas quedaron sobre calentadas generando imperfecciones en la capa donde colocaríamos la muestra.

4.2.3. MEDICIÓN Y ANÁLISIS

Una vez medidos los dispositivos y en vistas de los problemas de fabricación con los que contábamos, extrajimos las siguientes conclusiones:

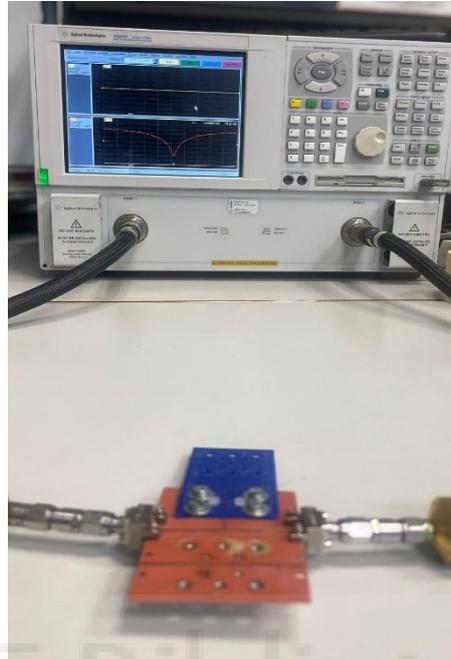


ILUSTRACIÓN 26. MEDIDA DEL RESONADOR CON EL MATERIAL PLA BAJO ENSAYO EN EL VNA

RESONADOR

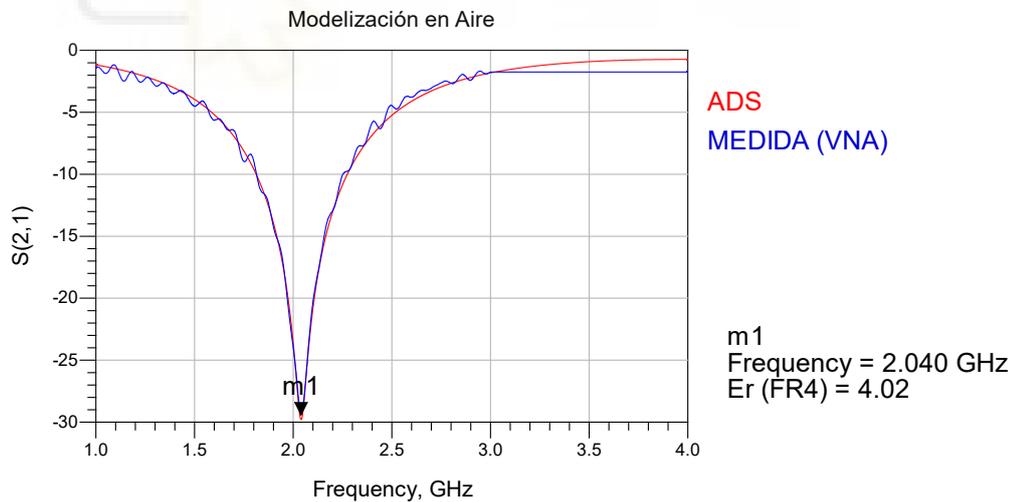


ILUSTRACIÓN 27. SIMULACIÓN EN ADS (ROJO) Y MEDIDA EXPERIMENTAL VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO $S(2,1)$ DEL RESONADOR MODELIZADO EN AIRE (SIN MATERIAL)

Como podemos observar en la ILUSTRACIÓN 27, nuestro modelizado en aire nos da un valor del parámetro de la constante dieléctrica de unos 4.02 [F/m], que como sospechábamos, por los problemas de fabricado no obtendríamos buenas lecturas siendo, este, un valor muy bajo de la permitividad relativa del sustrato FR4 a 2 GHz como para continuar trabajando con él.

LÍNEA DE TRANSMISIÓN

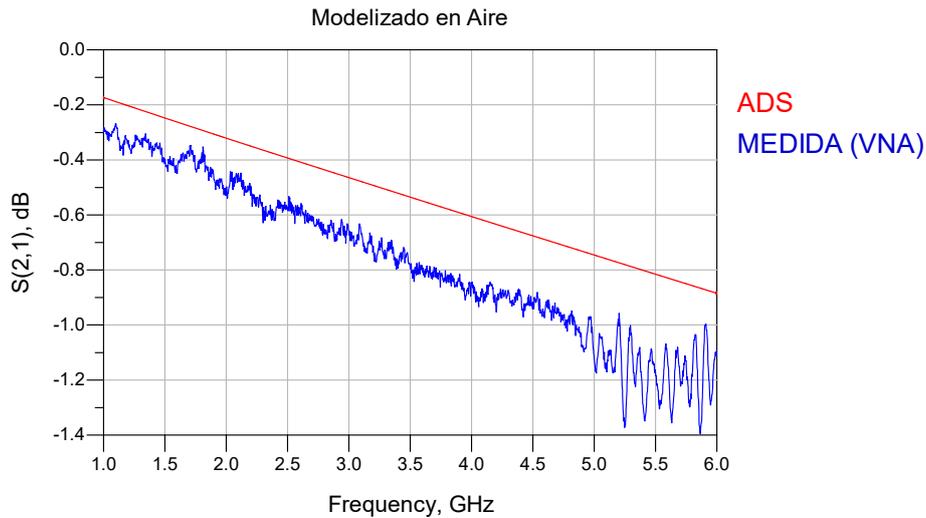


ILUSTRACIÓN 28. SIMULACIÓN EN ADS (ROJO) Y MEDIDA EXPERIMENTAL VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S(2,1) DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MODELIZANDO EN AIRE (SIN MATERIAL).



ILUSTRACIÓN 29. SIMULACIÓN EN ADS (ROJO) Y MEDIDA EXPERIMENTAL VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S(2,1) DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CARACTERIZANDO EL MATERIAL PLA

Para esclarecer este punto podemos realizar un cálculo y cuantificar la potencia que se está perdiendo a través de la línea de transmisión, en el caso de modelado en aire, comparando una señal con otra. Este tipo de cálculo nos da a conocer las pérdidas de inserción del parámetro S(2,1) en dB.

En ADS, nos permite realizar este tipo de cálculos, donde los pasos a seguir son los siguientes [1]:

- 1) Tenemos que ser conocedores del valor absoluto $|S_{21}|$ en dB, como en la
- 2) Aplicar la fórmula de las Pérdidas de Inserción en dB

$$PI(dB) = -20\log_{10} (|S_{21}|) \quad (10)$$

$$\text{Eqn } \text{magnitudo1} = \text{abs}(\text{dB}(\text{S}(2,1)))$$

$$\text{Eqn } y = \log_{10}(\text{magnitudo1})$$

$$\text{Eqn } \text{Insertion_loss_dB} = -20 * y$$

ILUSTRACIÓN 30. ECUACIONES DEL SOFTWARE DE ADS PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN EN DB

Frequency GHz	Pérdidas Inserción en dB ADS	Pérdidas Inserción en dB VNA
1	1.06	-1.4
1.3	1.77	-0.79
2.2	2.22	0.07
2.5	3.22	0.48
3.1	4.35	1.45
3.4	5.66	2.02
4	6.4	3.48
4.6	8.1	4.8
5.2	9.11	5.83
5.5	13.22	9.36
6	15.22	10.54

TABLA 7. VALORES DE LAS PÉRDIDAS DE INSERCIÓN EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN EN FRECUENCIAS COMPRENDIDAS ENTRE 1-6 GHz

Como podemos ver en la TABLA 7, hemos cuantificado los valores que reflejaban las señales en la ILUSTRACIÓN 28 para comparar ambas señales en valores numéricos de algunos puntos en frecuencia y ver cuanta potencia estamos perdiendo por cada señal en el dominio frecuencial.

Tras analizar los resultados del método de caracterización de la tangente de pérdidas mediante la línea de transmisión se pueden observar la imprecisión de este método de caracterización para los materiales dieléctricos. En la ILUSTRACIÓN 28, y en la ILUSTRACIÓN 29 vemos como ambas mediciones presenta una atenuación considerable de la señal del coeficiente de transmisión simulada en ADS con respecto a la señal del coeficiente de transmisión experimental, identificando los problemas como:

- **Atenuación del Campo Electromagnético:** A lo largo de la línea de transmisión, el campo electromagnético puede no ser completamente uniforme, especialmente en presencia de imperfecciones en el set-up. Esto afecta a la distribución de la atenuación y, en consecuencia, la precisión en la estimación de la tangente de pérdidas.
- **Atenuación en los conectores:** Uno de los parámetros más importantes de la línea es la impedancia que si no estuviera bien adaptada podría provocar reflexiones en la señal dejando de transmitirse parte de ella y como tal, perderíamos potencia que nosotros analizamos como atenuación.

También, cabe la posibilidad, de haber generado una modelización imprecisa, ya que puede que no estemos reflejando perfectamente las propiedades físicas de la línea de transmisión. Para descartar este tipo de suposición realizamos el siguiente estudio:

Comprobar la fase de cada señal del parámetro $S(2,1)$ para el caso del modelado en aire (sin material). Este tipo de medida nos da pie a ver cuánto se retrasa la señal durante la transmisión a través de la línea, entrando en juego parámetros muy importantes como la longitud física de la línea o la permitividad del material afectando a la velocidad de propagación.

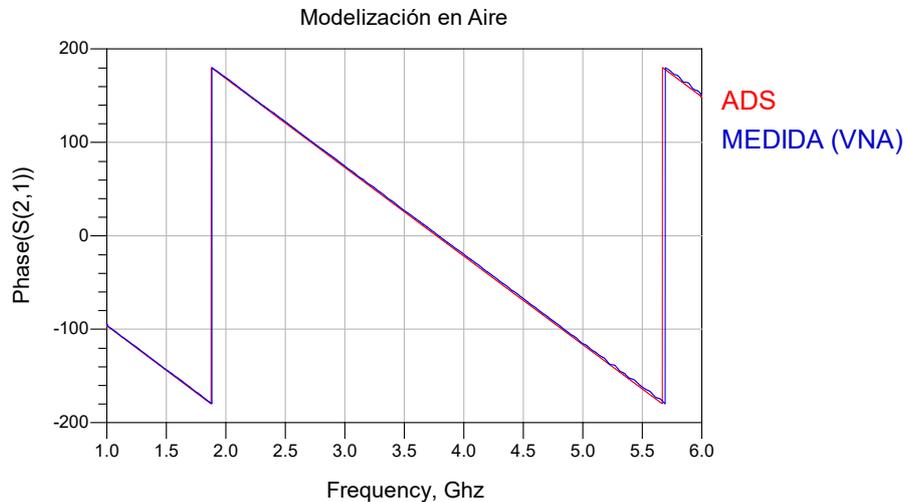


ILUSTRACIÓN 31. SIMULACIÓN DE LA FASE DE LAS SEÑALES DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN $S(2,1)$ DE ADS (ROJO) Y LA MEDIDA EXPERIMENTAL (AZUL) PARA LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN MODELADO EN AIRE

En la ILUSTRACIÓN 31, a simple vista se puede comprobar como ambas señales están en fase en un rango comprendido de frecuencias de 1 a 6 GHz, por lo que en referencia a tal gráfica podemos concluir que el dimensionamiento físico está bien definido y por tanto los modelos matemáticos para tal simulación, también.

Dado que los resultados obtenidos con la línea de transmisión no fueron satisfactorios a través de la línea de transmisión para la caracterización de la tangente de pérdidas del material dieléctrico, optamos por calcular el factor de calidad mediante el ancho de banda a -3 dB de la medida del circuito resonante y, de ahí, extraer la tangente de pérdidas. De esta manera, con una única medida y, por tanto, con un único dispositivo, obtendríamos la caracterización del material con las dos propiedades que vamos buscando.

4.3. TERCER PROTOTIPO. MÉTODO DE FOTOLITOGRAFÍA

En este tercer prototipo, quisimos darle el peso de las problemáticas al proceso de fabricación del sistema resonante, pues la interacción del campo electromagnético generado por el resonador con el material a caracterizar no llegábamos a conseguir que fuese lo más correcto posible por problemas de las imperfecciones generadas o bien por un mal montaje, poca inconsistencia del apilado o quemaduras de soldadura.

De esta manera, y en función de los análisis extraídos hasta el momento, el sistema resonante mantenía el mismo diseño y estructura de la sección transversal de la línea microstrip y, por otro lado, la línea de transmisión quedaba descartada para la caracterización de la propiedad de la tangente de pérdidas, según el análisis reflejado en el punto 4.2.3, en cuanto a diseño se refiere.

4.3.1. MÉTODO DE FABRICACIÓN

Según el enfoque de diseño descrito, pasamos al proceso de su fabricación, utilizando el método de fotolitografía.

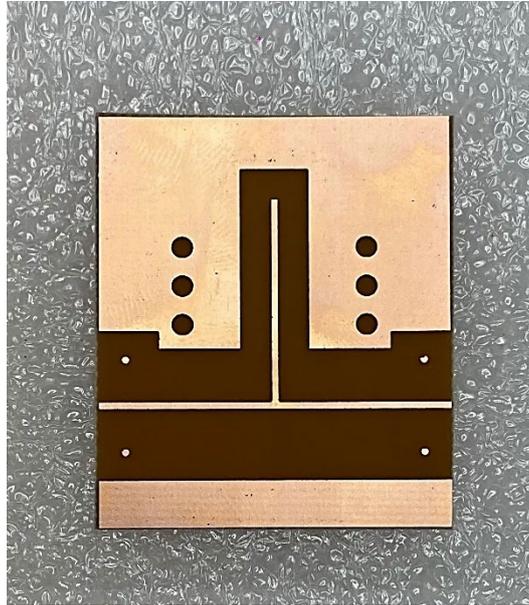


ILUSTRACIÓN 32. RESONADOR 2 GHZ FABRICADO MEDIANTE FOTOLITOGRAFÍA

Este método de fabricación como se puede ver en la ILUSTRACIÓN 32 muestra un set-up muy compacto y sin imperfecciones en su superficie, sin embargo, las marcas de los orificios para el anclaje del material a analizar se debían realizar de manera manual, esto, de nuevo, generó las imperfecciones de las que estábamos huyendo, aun así, realizamos el correspondiente análisis.

4.3.2. MEDICIÓN Y ANÁLISIS

En esta ocasión, necesitábamos averiguar cómo trabaja el mismo sistema resonante del cual veníamos trabajando, pero con un método de fabricación que no generase imperfecciones en el área donde se deposita el material bajo ensayo y que no tuviéramos complicaciones en la interacción del campo electromagnético. Sin embargo, como decíamos, al realizar los orificios para los tornillos de anclaje se introdujeron nuevamente imperfecciones, aunque no tan sustanciales aparentemente.

Las conclusiones y problemas se resumen en la comparación de métodos de fabricación. Este método, la fotolitografía, en comparación con el resto de los prototipos, proporcionó una buena precisión en las dimensiones del resonador y permitió una comparación directa de cómo las variaciones en el proceso de fabricación afectan en las mediciones. Sin embargo, a la hora de realizar los orificios de anclaje manualmente, introdujo una serie de imperfecciones las cuales nos hicieron volver al método de fabricación mediante la fresadora y cubrir esa parte con mayor rigor.

4.4. CUARTO PROTOTIPO

Con el fin de asegurar un contacto uniforme entre el material bajo ensayo y el resonador, se fabricó un set-up con la misma estructura del anterior diseño, pero, añadiendo debajo del plano de masa con material dieléctrico una superficie con más espesor para ganar mucha más consistencia y poder ejercer presión sin problema alguno, además de que esta capa no influye en nada para nuestro sistema resonador. También, cuenta con orificios específicos para aplicar presión sobre el material mediante tornillos, incluyendo unos orificios auxiliares para colocar unos tetones de alineamiento con la función de darle un tope a la muestra que se coloque y, así, saber de manera precisa en mm cuanto material introducimos en el resonador. Esto permitió que la presión se distribuyera de manera más homogénea sobre la superficie del material bajo ensayo, eliminando irregularidades en las mediciones debidas a contactos no uniformes. Además, estos orificios también se utilizaron para sujetar el sustrato y la muestra al dispositivo. Asimismo, pudimos solucionar una distribución incorrecta de los tornillos evitando provocar que tanto el set-up como la muestra bajo ensayo se combasen o se produjeran imperfecciones al ejercer una presión sobre el mismo, afectando negativamente la repetibilidad y precisión de las mediciones.

**Orificios
destinados
a tetones de
alineamiento**

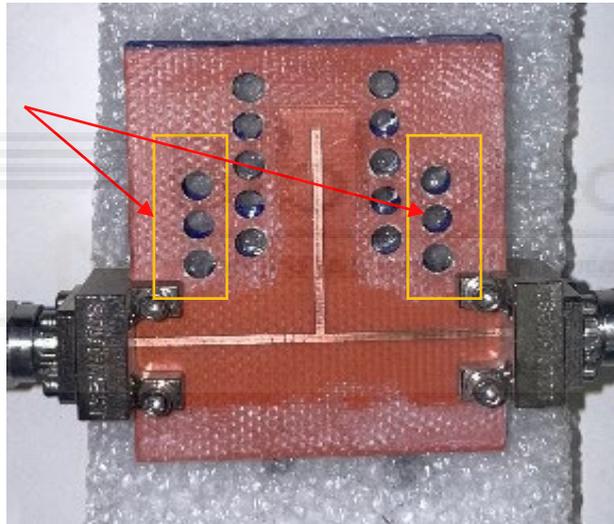


ILUSTRACIÓN 33. CARA SUPERIOR RESONADOR A 2 GHZ CON ORIFICIOS PASANTES Y PARA ATORNILLAR

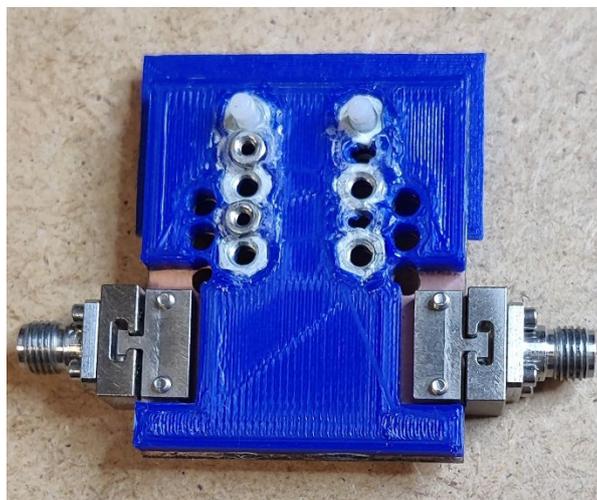


ILUSTRACIÓN 34. CARA INFERIOR CON MATERIAL DIELECTRICO DEL RESONADOR A 2 GHZ

4.4.1. MEDICIÓN Y ANÁLISIS

Con el resonador modificado, se realizaron nuevas pruebas utilizando el VNA para, primeramente, la modelización en aire del sistema resonante como en los anteriores prototipos, obteniendo los parámetros S del sistema.

Una particularidad no mencionada antes es, que la calibración del VNA se realizó con los estándares de corto, abierto y carga, asegurando que los resultados fueran precisos y repetibles. Se llevaron a cabo barridos de frecuencia detallados alrededor de los 2 GHz, y los datos obtenidos se analizaron para determinar la frecuencia de resonancia y extraer de ahí valores como el ancho de banda a -3 dB para calcular el factor de calidad (Q) y con ello la tangente de pérdidas.

En el proceso de medición tratábamos de ir introduciendo el material bajo ensayo cubriendo el área del resonador poco a poco, ver página 65. Estaba diseñado para 3 posiciones distintas a 4 mm, 8mm y 12 mm e íbamos replicando este proceso para las diferentes medidas y diferentes sustratos (PLA, ABS y PREPERM3).

Los resultados mostraron una mejora notable (ANEXO I) en comparación con los prototipos anteriores, validando la modificación de la estructura multicapa. Ahora, el resonador mostraba un desplazamiento de frecuencia proporcional a la constante dieléctrica del material bajo ensayo, lo que confirmaba que el campo electromagnético estaba actuando de manera adecuada con el material.

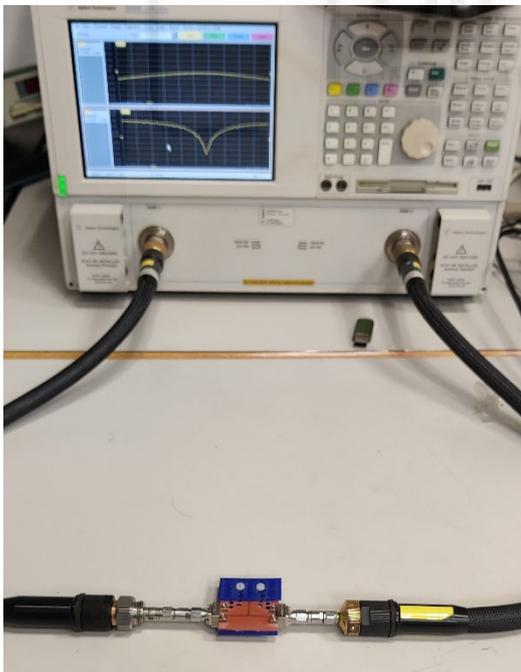


ILUSTRACIÓN 35. MEDICIÓN DEL MATERIAL DIELECTRICO PLA MEDIANTE EL ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES

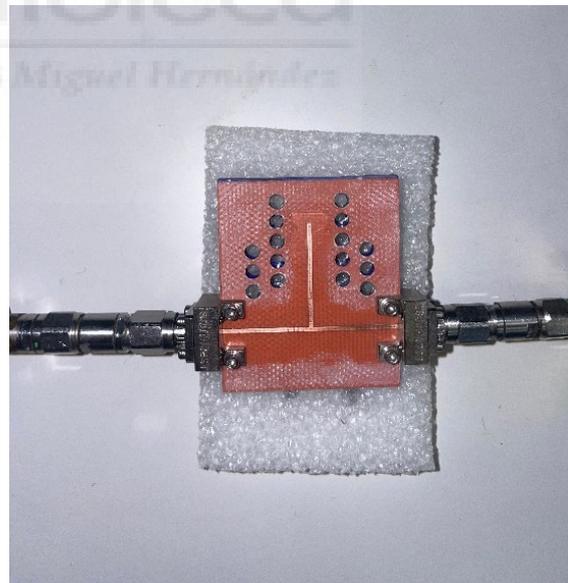


ILUSTRACIÓN 36. MEDICIÓN DEL RESONADOR A 2 GHZ EN AIRE CON EL ANALIZADOR VECTORIAL DE REDES

4.5. SUSTRATOS BAJO ENSAYO

Tras el diseño y fabricado de los distintos sistemas resonantes, nos falta comentar el proceso de fabricación de los sustratos que utilizamos para introducir en el resonador y ser caracterizado. En este punto, veremos el único sistema de fabricado que se ha utilizado para las piezas sometidas bajo ensayo y que además es la principal orientación en aplicaciones de impresión 3D.

El proceso de fabricado, de impresión 3D, requiere de un software que traduzca archivos STL o similares, en nuestro caso generados desde FreeCad, a instrucciones G-code. Este, es conocido como Cura. Este formato va guiando a la impresora indicando por donde debe depositar el sustrato capa por capa. Una vez creado el formato para el método de fabricación para cada material, la impresión 3D es idéntica independientemente del material, con el matiz de que cada material tiene parámetros distintos, como la temperatura que deben ser debidamente configurados antes de proceder a imprimir.



a)

b)



c)

ILUSTRACIÓN 37. SUSTRATOS A) PREPERM3, B) ABS, C) PLA) FABRICADO POR IMPRESIÓN 3D DE UN 1 MM DE ESPESOR

4.6. MODELIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Una vez obtenidos los datos experimentales, se procedió a su modelización utilizando los softwares de simulación **ADS** y **HFSS** para ajustar los resultados teóricos con los datos obtenidos experimentalmente. Esta modelización incluyó el cálculo de la tangente de pérdidas, validando así el dispositivo y los métodos de medición empleados.

Para la caracterización de materiales comparamos ambos métodos de simulación. En el caso de HFSS el método de cálculo FEM, utilizado en estructuras complejas tridimensionales, ya que resuelve las ecuaciones de Maxwell en todo el volumen del resonador, y ADS, mediante su enfoque de circuito, utilizando el campo de simulación de parámetros S proporciona un análisis rápido, pero menos detallado.

Tanto ADS como HFSS han sido claves para lograr nuestro objetivo principal que como ya hemos mencionado es la caracterización de materiales dieléctricos y ser conocedor de 2 propiedades muy significativas (Permitividad Relativa y Tangente de Pérdidas).

PERMITIVIDAD RELATIVA (ϵ_r)

Desde el comienzo de la caracterización el paso donde veíamos si nuestro prototipo tenía una respuesta en frecuencia acorde a lo diseñado y esperado, era, cuando no sometíamos ningún material bajo ensayo y, solamente leíamos la frecuencia de resonancia del propio resonador, es decir, en aire. Este paso era determinante, pues procedíamos a su modelización.

Primero en ADS, donde manipulábamos el diseño multicapa tanto en el valor de la permitividad relativa como en la altura del sustrato. Una vez obtenido ese valor la constante dieléctrica del sustrato FR4 se modelizaba esa estructura con los mismos valores para respetar y mantener sus valores una vez íbamos añadiendo los diferentes materiales a caracterizar.

Terminada esa modelización, se procedía a realizar las medidas en los materiales (PLA, ABS y PREPERM), obteniendo su respuesta a la frecuencia de resonancia, pero esta vez interactuando el campo electromagnético con el material bajo ensayo, influyendo en una variación de la mencionada resonancia. Esta variación, se debe, a los cambios que este material provoca en las propiedades electromagnéticas del sistema resonante, particularmente en la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas y la distribución de los campos eléctricos y magnéticos.

Existen diversos factores que provocan esos tipos de fenómenos electromagnéticamente hablando como [13]:

- Longitud de la onda efectiva
- Cambios en la capacitancia e inductancia
- Dispersión del material
- Pérdidas dieléctricas
- Permitividad Relativa

En este proyecto, como ya hemos mencionado en reiteradas ocasiones, no centramos únicamente en la caracterización de dos parámetros. Empezaremos, pues, caracterizando la permitividad relativa.

El procedimiento de caracterización es similar al de modelar, con la diferencia que los valores de modelización son fijos una vez que se llega a modelar la estructura del sistema resonante. Para el valor de la constante dieléctrica vamos ajustándolo a razón de las medidas experimentales extraídas en el VNA y vamos a ajustando la frecuencia de resonancia simulada tanto en ADS como en HFSS modificando los parámetros de la permitividad, espesor y tangente de pérdidas. De esta manera, vamos ajustando la frecuencia de resonancia hasta llevarla a la medida correspondiente, obteniendo un valor de la permitividad relatividad y de la tangente de pérdidas, caracterizando así cada material bajo ensayo a diferentes medidas.

TANGENTE DE PÉRDIDAS ($\tan\delta$)

En el siguiente parámetro dieléctrico, quisimos caracterizarlos primeramente con el diseño de una línea de transmisión caracterizada a 50 Ohm, sin embargo, analizamos los resultados experimentales del mismo modo que hemos descrito el anterior parámetro.

Primero realizábamos las medidas experimentales en el analizador vectorial de redes para después modelizar el dispositivo únicamente en aire e ir añadiendo los materiales a caracterizar. En este caso, nos sirvió únicamente la herramienta de modelización ADS, ya que este método quedó descartado para caracterizar dicho parámetro dieléctrico.

Mediante este método realizamos un análisis donde, como podemos observar en las siguientes ilustraciones, los resultados fueron los siguientes:

FACTOR DE CALIDAD (Q) y ANCHO DE BANDA DE UN CIRCUITO RESONANTE

Una vez descartado el anterior método de caracterización, avanzamos con el último mencionado. El factor Q, es la medida de la calidad de un circuito resonante que se refleja en un ancho de banda más estrecho. También se puede definir como la relación entre la potencia almacenada y la potencia disipada [14].

Se identifican las frecuencias en las cuales la potencia de la señal cae a la mitad de su valor máximo, es decir, se encuentra el ancho de banda Δf correspondiente a una caída de 3 dB.

$$\Delta f = f_h - f_l \quad (11)$$

Donde f_h es la frecuencia superior de corte (high frequency) y f_l la frecuencia inferior de corte (low frequency).

Cálculo de la tangente de pérdidas: La tangente de pérdidas se calcula utilizando la relación:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (12)$$

f_0 es la frecuencia de resonancia medida y Δf es el ancho de banda medido entre las dos frecuencias donde la potencia cae a -3 dB.

$$\tan \delta = \frac{1}{Q} \quad (13)$$

Por último, obtenemos finalmente, la caracterización de la tangente de pérdidas puesto que este parámetro es inversamente proporcional al factor de calidad.

4.7. RESULTADOS

PERMITIVIDAD RELATIVA (ϵ_r)

MODELIZADO EN AIRE	Permitividad Relativa (ϵ_r)	
	HFSS	ADS
FR4	4.274	4.265

TABLA 8. MODELIZACIÓN EN AIRE DEL VALOR DE LA PERMITIVIDAD RELATIVA DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ

MATERIAL	Permitividad Relativa (ϵ_r)	
	HFSS	ADS
PLA	2.6	2.37

TABLA 9. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL PLA DEL VALOR DE LA PERMITIVIDAD RELATIVA DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ

MATERIAL	Permitividad Relativa (ϵ_r)	
	HFSS	ADS
ABS	2.53	2.31

TABLA 10. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL ABS DEL VALOR DE LA PERMITIVIDAD RELATIVA DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ

MATERIAL	Permitividad Relativa (ϵ_r)	
	HFSS	ADS
PREPERM 3	2.8	2.57

TABLA 11. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL PREPERM3 DEL VALOR DE LA PERMITIVIDAD RELATIVA DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ

TANGENTE DE PÉRDIDAS Y FACTOR DE CALIDAD

MATERIAL	Tangente de Pérdidas ($\tan\delta$)			Factor de Calidad (Q)		
	HFSS	ADS	VNA	HFSS	ADS	VNA
AIRE	0.021	0.0205	0.0208	47.577	48.752	48.062

TABLA 12. MODELIZACIÓN EN AIRE DE LOS VALORES DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS Y EL FACTOR DE CALIDAD EN ADS, HFSS Y MEDIDA EXPERIMENTAL DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ

MATERIAL	Tangente de Pérdidas ($\tan\delta$)			Factor de Calidad (Q)		
	HFSS	ADS	VNA	HFSS	ADS	VNA
PLA	0.0252	0.0248	0.0252	39.666	40.304	39.647

TABLA 13. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PLA DE LOS VALORES DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS Y EL FACTOR DE CALIDAD EN ADS, HFSS Y MEDIDA EXPERIMENTAL DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ

MATERIAL	Tangente de Pérdidas ($\tan\delta$)			Factor de Calidad (Q)		
	HFSS	ADS	VNA	HFSS	ADS	VNA
ABS	0.0204	0.02	0.0253	49.031	49.859	39.476

TABLA 14. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ABS DE LOS VALORES DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS Y EL FACTOR DE CALIDAD EN ADS, HFSS Y MEDIDA EXPERIMENTAL DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ

MATERIAL	Tangente de Pérdidas ($\tan\delta$)			Factor de Calidad (Q)		
	HFSS	ADS	VNA	HFSS	ADS	VNA
PREPERM3	0.0254	0.0248	0.025	39.390	40.304	39.647

TABLA 15. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PREPERM3 DE LOS VALORES DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS Y EL FACTOR DE CALIDAD EN ADS, HFSS Y MEDIDA EXPERIMENTAL DEL RESONADOR CARACTERIZADO A 2 GHZ

Estos resultados son extraídos a través de las mediciones y cálculos reflejados en los ANEXO I. y ANEXO II. Además, se comparan 2 herramientas de modelización que son ADS y HFSS, donde se puede apreciar que los valores se intentan reflejar a las mediciones experimentales. Sin embargo, tenemos valores distintos para los diferentes parámetros debido a que la modelización de cada uno es diferente.

En el caso de HFSS, nos permite realizar una mejor modelización y definición de la estructura física de las capas del sistema resonador multicapa, pudiendo definir mucho mejor cada material que compone todo el apilado.

Para el caso de ADS, nos permite trabajar con un módulo de su librería, MLSUBSTRATE-N, para un orden n de capas en la que defines de manera menos detallada y precisa tu sistema multicapa.

Por otro lado, los modelos matemáticos utilizados por cada herramienta son distintos, que esto da lugar a que la modelización pueda ser de mayor precisión. Como, por ejemplo, en los cambios de medio, los cuales influyen directamente en la adaptación de impedancia, ya que estamos tratando en un sistema multicapa donde el salto de medio es en 4 capas distintas y, sobre todo en la última capa que pasa del material del cobre al aire siendo el aire una 5 capa, cosa que en ADS no se tiene en cuenta con el módulo mencionado.





CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

A lo largo del desarrollo de este proyecto, se ha conseguido mejorar el método de caracterización de materiales dieléctricos para su uso en la impresión 3D mediante el uso de un resonador de microondas. Este avance no solo ha proporcionado una mayor precisión en la medición de los parámetros dieléctricos, como la permitividad relativa y la tangente de pérdidas, sino que también ha permitido reducir costes y simplificar el proceso de montaje en comparación con otros métodos más tradicionales, como el uso de guías de onda o estructuras con capas conductoras utilizadas en el laboratorio.

El objetivo principal de obtener un sistema resonante caracterizado a 2 GHz, capaz de medir de manera precisa los parámetros dieléctricos de los materiales utilizados en la impresión 3D, se ha cumplido satisfactoriamente. Se ha demostrado que el resonador de microondas es una herramienta efectiva y fiable, logrando una caracterización precisa sin la complejidad añadida que implica el uso de métodos convencionales, como la necesidad de adherir el material entre capas conductoras o el uso de costosas guías de onda limitadas en su rango de frecuencias.

Uno de los aspectos más relevantes es que el dispositivo desarrollado no solo ha permitido la caracterización de materiales dieléctricos, sino que también ha abierto la puerta a un uso más amplio de estos materiales en aplicaciones electrónicas y de radiofrecuencia (RF). La capacidad de la impresión 3D de crear estructuras con características específicas, combinada con una correcta caracterización de los materiales utilizados, puede tener un impacto significativo en diversas industrias, desde la creación de antenas hasta el desarrollo de sensores, metamateriales y dispositivos electrónicos avanzados.

La implementación de un método resonante ha superado algunos de los desafíos presentados por los métodos anteriores, como la distorsión en las lecturas causada por el uso de adhesivos, lo que asegura que los resultados obtenidos reflejen de manera más precisa las propiedades intrínsecas del material bajo prueba. Asimismo, la utilización de un resonador sencillo, manejable y de bajo coste, pone en valor la viabilidad de este enfoque no solo en entornos académicos, sino también en laboratorios de investigación y desarrollo con recursos limitados.

En cuanto a las mediciones obtenidas, los valores de permitividad relativa y tangente de pérdidas para materiales como PLA, ABS y Preperm3 podrían estar más alineados con los valores esperados, pues el diseño puede ser mejorado, lo que no cabe duda es que es un método con el cual es posible rozar valores parecidos en comparación con otros métodos más precisos, como la caracterización mediante guías de onda. Esto confirma que el sistema es adecuado para caracterizar una amplia gama de materiales utilizados en impresión 3D, lo que a su vez permite que estos materiales puedan ser evaluados para aplicaciones específicas, como en dispositivos médicos, donde las propiedades dieléctricas pueden influir en la biocompatibilidad del material.

El presente proyecto abre múltiples oportunidades para la mejora y expansión del método de caracterización desarrollado. A continuación, se detallan algunas líneas futuras que pueden ser exploradas para continuar con la investigación y el desarrollo de aplicaciones en este campo:

En primer lugar, aunque el sistema desarrollado se ha centrado en una frecuencia de 2 GHz, futuras investigaciones pueden explorar la adaptación del resonador para operar en un rango más amplio de frecuencias, permitiendo la caracterización de materiales en diferentes bandas. Esto no solo facilitaría la caracterización de materiales para aplicaciones más diversas, sino que también permitiría evaluar el comportamiento de los mismos en diferentes entornos de RF y microondas.

En segundo lugar, el proyecto se ha enfocado en materiales comunes en la impresión 3D, como PLA, ABS y Preperm3. Sin embargo, existe un gran potencial en la exploración de otros materiales, incluyendo polímeros avanzados, materiales compuestos o incluso nuevos materiales conductores desarrollados específicamente para aplicaciones electrónicas y de RF.

En tercer lugar, actualmente, aunque el resonador utilizado en este proyecto ha demostrado ser eficaz, futuros trabajos podrían centrarse en la optimización de la geometría del resonador para mejorar su sensibilidad y precisión. Esto podría incluir el diseño de nuevas configuraciones geométricas que maximicen la interacción entre el campo electromagnético y el material bajo prueba, reduciendo aún más las posibles pérdidas o interferencias que puedan distorsionar las mediciones.

Por último, una de las líneas futuras más prometedoras en el ámbito de la caracterización de materiales es el desarrollo de un sistema para caracterizar materiales líquidos. La caracterización de líquidos en aplicaciones de radiofrecuencia y microondas puede ser fundamental en campos como la química, la biotecnología, la industria alimentaria, un ejemplo podría ser, la caracterización de líquidos biológicos, como soluciones salinas, suero o plasma sanguíneo, siendo muy útil en el campo de la medicina y la biotecnología. En aplicaciones de sensores, los líquidos pueden ser evaluados para la creación de biosensores que utilicen la permitividad dieléctrica del fluido como un indicador de ciertos compuestos o biomarcadores, siendo muy versátil y práctico en diagnósticos médicos.



ANEXO I. ANÁLISIS EN HFSS Y ADS DE MATERIALES DIELECTRICOS PARA CARACTERIZAR LA PERMITIVIDAD RELATIVA

En estas gráficas hacemos referencia a las medidas realizadas con el 4º prototipo, siendo estas con las que nos vamos en los resultados.

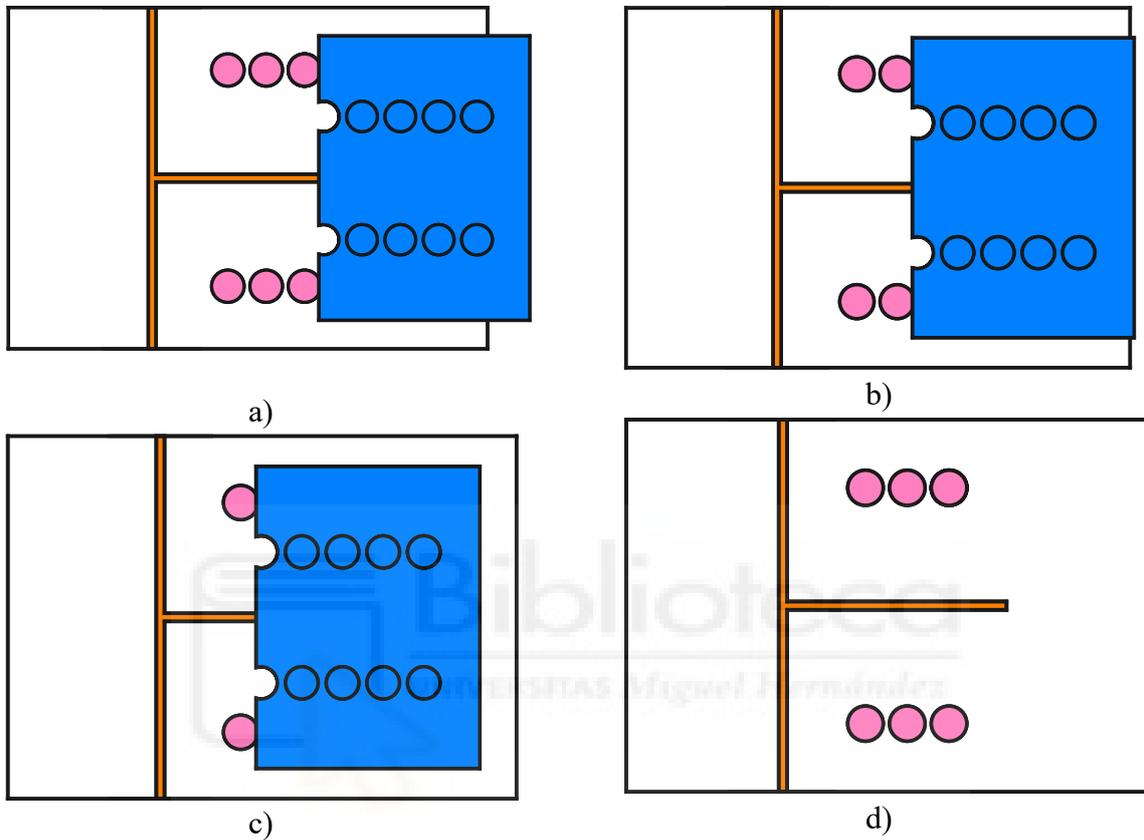
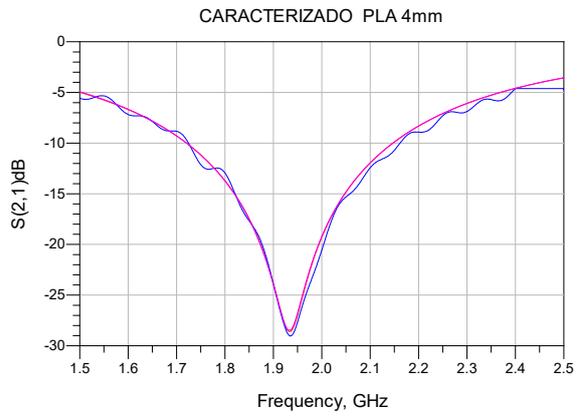


ILUSTRACIÓN 38. DIFERENTES MEDIDAS DEL MATERIAL DIELECTRICO BAJO ENSAYO. A) 4 MM, B) 8MM, C) 12 MM Y D) EN AIRE

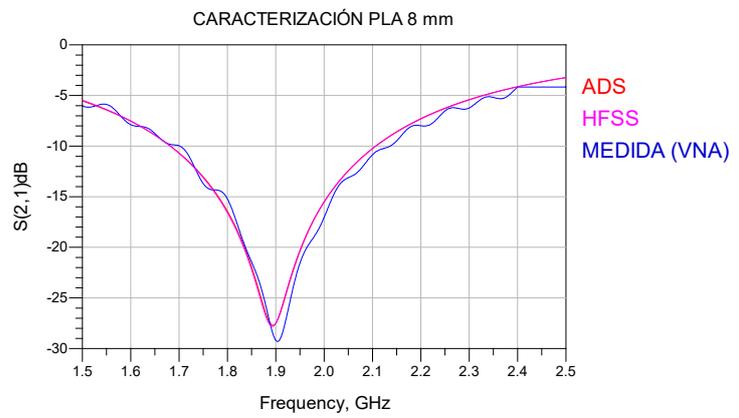
Como podemos ver en la ILUSTRACIÓN 38 de arriba, tenemos las 4 medidas mencionadas anteriormente, pues cada una de ellas se correspondería a una disposición distinta del material a caracterizar:

- El sustrato recubre una superficie de 4 mm del resonador
- El sustrato recubre una superficie de 8 mm del resonador
- El sustrato recubre una superficie de 12 mm del resonador
- El sustrato recubre una superficie de 0 mm del resonador

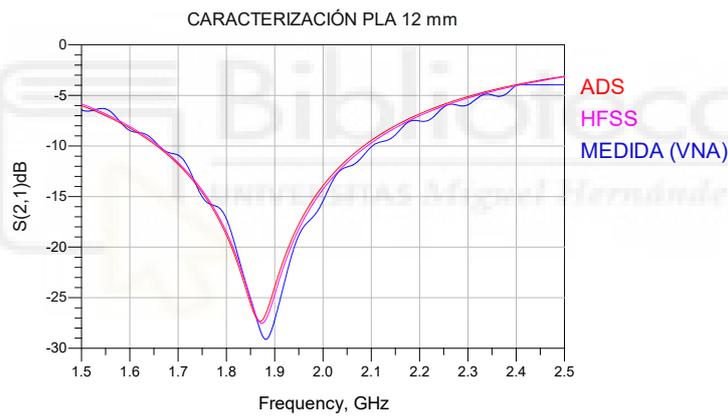
PLA



a)



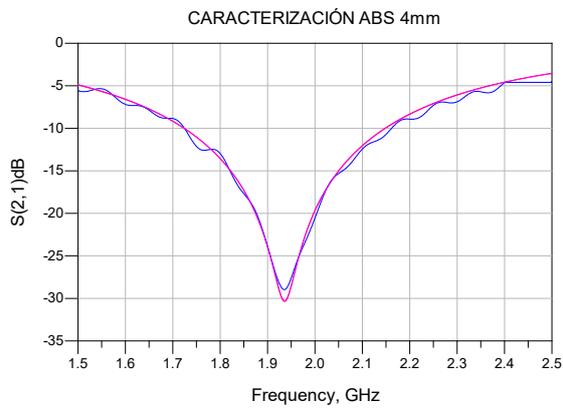
b)



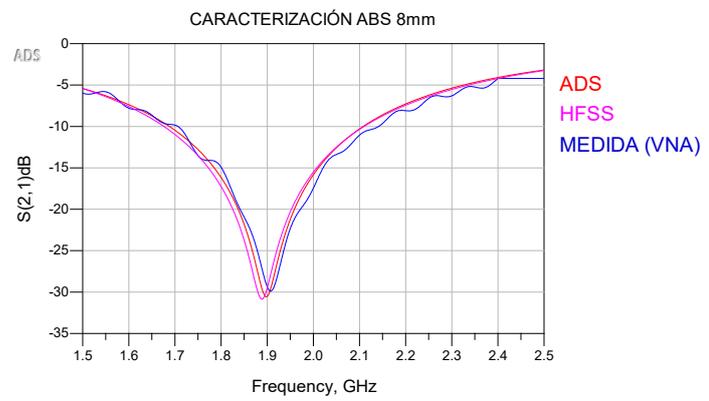
c)

GRÁFICA 1. SUPERPOSICIÓN DE LAS FRECUENCIAS RESONANTES DE LAS SIMULACIONES EN ADS (ROJO), HFSS (MAGENTA), Y EXPERIMENTALES, VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S₂₁ CON EL MATERIAL PLA BAJO ENSAYO A DIFERENTES MEDIDAS A) 4MM, B) 8MM, C) 12MM

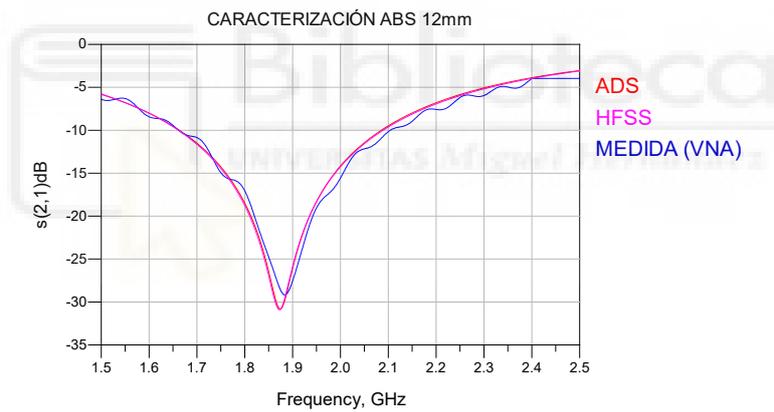
ABS



a)



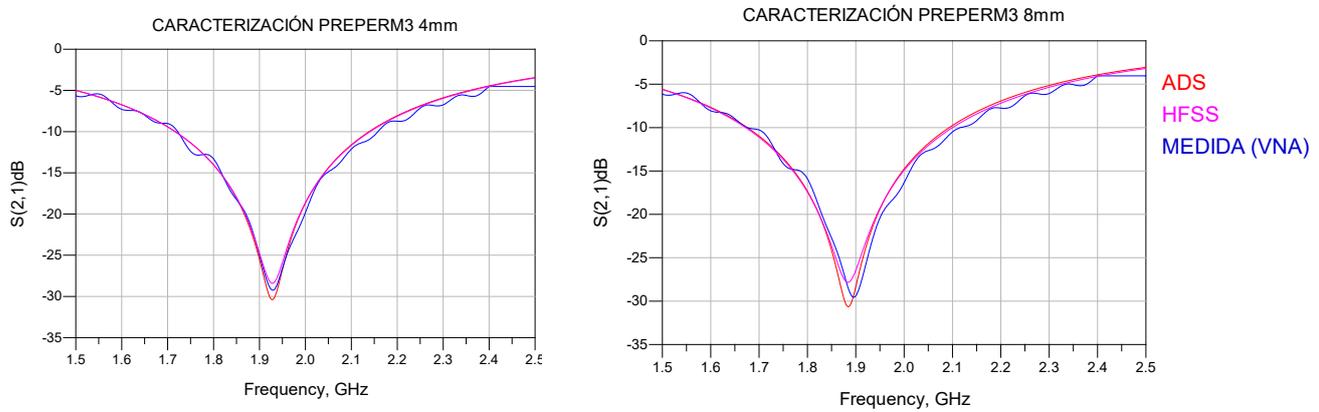
b)



c)

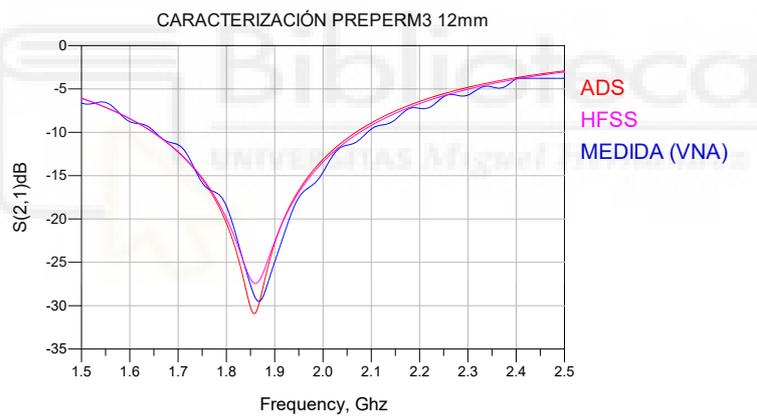
GRÁFICA 2. SUPERPOSICIÓN DE LAS FRECUENCIAS RESONANTES DE LAS SIMULACIONES EN ADS (ROJO), HFSS(MAGENTA), Y EXPERIMENTALES, VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S_{21} CON EL MATERIAL ABS BAJO ENSAYO A DIFERENTES MEDIDAS A) 4MM, B) 8MM, C) 12MM

PREPERM3



a)

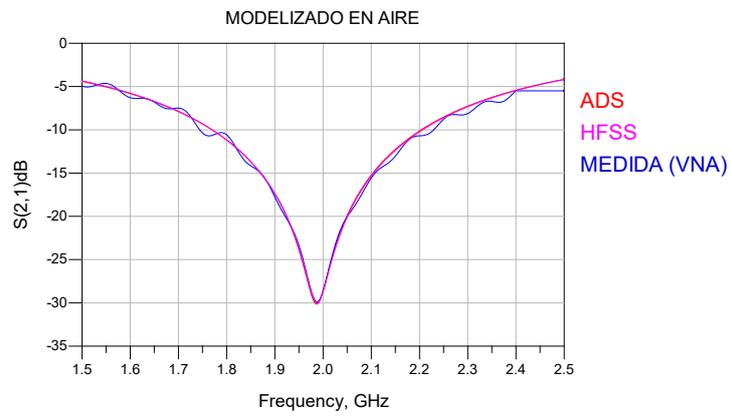
b)



c)

GRÁFICA 3. SUPERPOSICIÓN DE LAS FRECUENCIAS RESONANTES DE LAS SIMULACIONES EN ADS (ROJO), HFSS (MAGENTA), Y EXPERIMENTALES, VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S21 CON EL MATERIAL PREPERM3 BAJO ENSAYO A DIFERENTES MEDIDAS A) 4MM, B) 8MM, C) 12MM

AIRE



GRÁFICA 4. SUPERPOSICIÓN DE LAS FRECUENCIAS RESONANTES DE LAS SIMULACIONES EN ADS (ROJO), HFSS (MAGENTA), Y EXPERIMENTALES, VNA (AZUL) DEL PARÁMETRO S_{21} SIN MATERIAL, MODELIZADO EN AIRE.

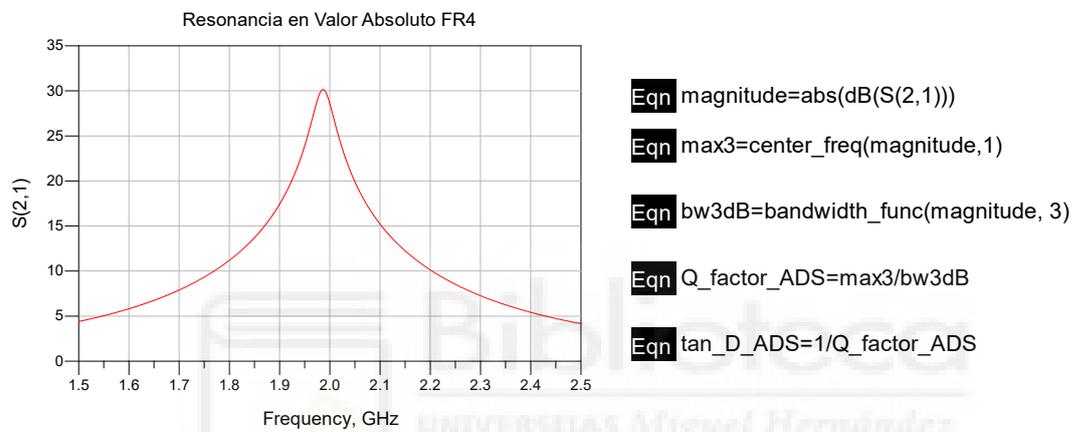




ANEXO II. APLICACIÓN DE MÉTODO DEL ANCHO DE BANDA A -3DB PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS

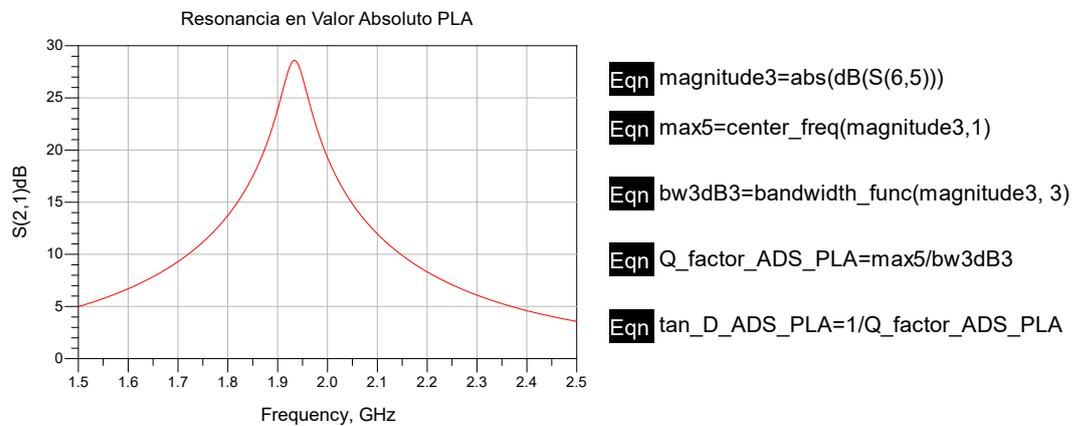
Para la caracterización de la propiedad dieléctrica, conocida como tangente de pérdidas realizamos mediante el software de ADS los cálculos para extraer el valor del factor de calidad a partir de la medida en valor absoluto del resonador, obteniendo el ancho de banda a una caída de -3dB.

FR4



GRÁFICA 5. MEDIDA DEL PARÁMETRO $S(2,1)$ EN VALOR ABSOLUTO DE FR4 PARA REALIZAR LOS CÁLCULOS DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS

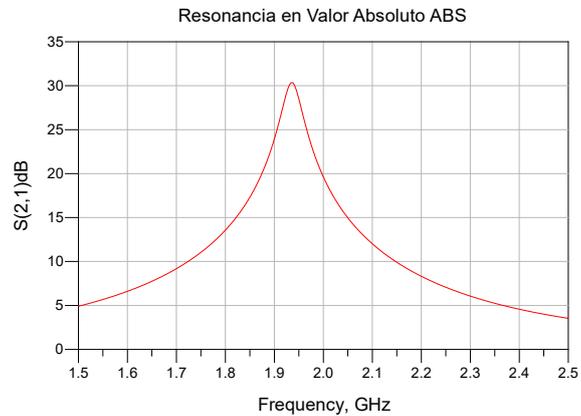
PLA



GRÁFICA 6. MEDIDA DEL PARÁMETRO $S(2,1)$ EN VALOR ABSOLUTO DE PLA PARA REALIZAR LOS CÁLCULOS DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS

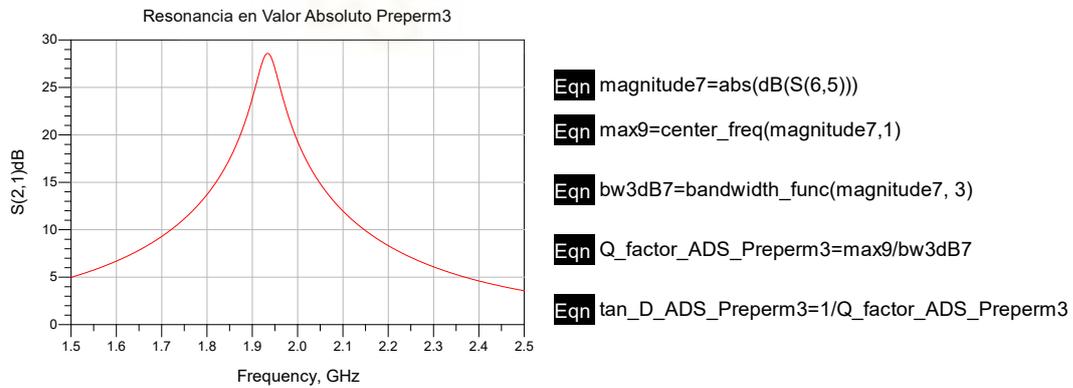
ABS

$$\begin{aligned} \text{Eqn } \text{magnitudo4} &= \text{abs}(\text{dB}(\text{S}(18,17))) \\ \text{Eqn } \text{max6} &= \text{center_freq}(\text{magnitudo4}, 1) \\ \text{Eqn } \text{bw3dB4} &= \text{bandwidth_func}(\text{magnitudo4}, 3) \\ \text{Eqn } \text{Q_factor_ADS_ABS} &= \text{max6}/\text{bw3dB4} \\ \text{Eqn } \text{tan_D_ADS_ABS} &= 1/\text{Q_factor_ADS_ABS} \end{aligned}$$



GRÁFICA 7. MEDIDA DEL PARÁMETRO $S(2,1)$ EN VALOR ABSOLUTO DE ABS PARA REALIZAR LOS CÁLCULOS DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS

PREPERM3



GRÁFICA 8. MEDIDA DEL PARÁMETRO $S(2,1)$ EN VALOR ABSOLUTO DE PREPERM3 PARA REALIZAR LOS CÁLCULOS DE LA TANGENTE DE PÉRDIDAS

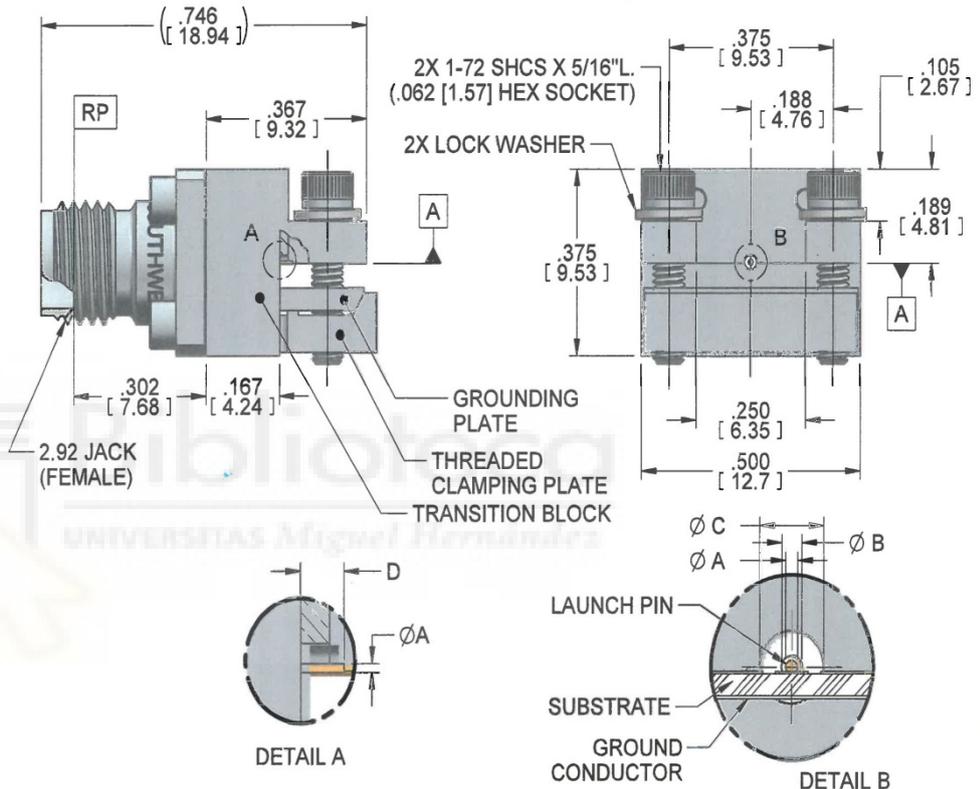
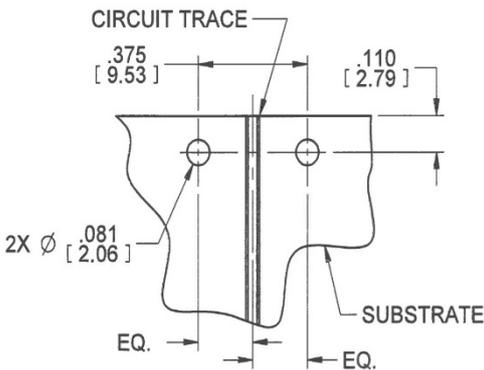


ANEXO III. DATASHEET CONECTORES SOUTHWEST

DWG No.:

91Y60926

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



HOUSING:	STEEL, CRES ALLOY UNS-30300 PER ASTM A582 PASSIVATED PER ASTM A967-99
CONTACT:	BeCu UNS-C17300 PER ASTM B196 GOLD PLATE PER ASTM B488
BEAD:	KEL-F (PCTFE) PER ASTM D1430
CAPTURE BEAD:	ULTEM 1000 PER ASTM D5205
ITEM	MATERIAL & FINISH
2.92 CONNECTOR	

TRANSITION BLOCK, GROUNDING PLATE, THREADED CLAMPING PLATE	C360 BRASS ALLOY UNS-C36000 PER ASTM B16. NICKEL PLATE PER AMS 2404B
LAUNCH PIN:	BeCu UNS-C17300 PER ASTM B196 GOLD PLATE PER MIL-DTL-45204
TRANSITION BLOCK DIELECTRIC:	VIRGIN PTFE FLUOROCARBON PER ASTM D1710, TYPE 1 GRADE 1, CLASS B
ITEM	MATERIAL & FINISH
TRANSITION BLOCK	

Model	Ø A	Ø B	Ø C	D
1092-03A-6	.010	.020	.0635	.050
1092-02A-6	.007	.015	.0480	.030
1092-04A-6	.007	.012	.0390	.030
1092-01A-6	.005	.009	.0290	.030

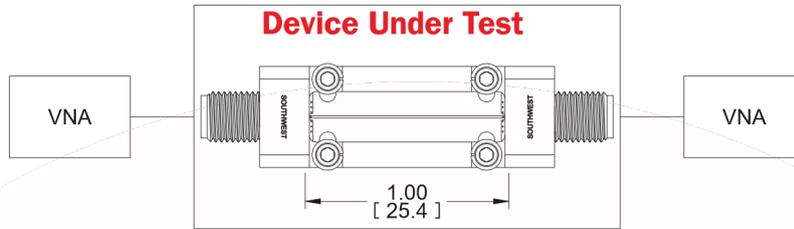
1. ALL DIMENSIONS ARE IN INCHES. ALL ANGLES ARE IN DEGREES. DIMENSIONS SHOWN IN BRACKETS [XXX] ARE IN MILLIMETERS.
NOTES: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED.

REV B	9458	REV BY: AJS	DATE: 1/21/16	APRVD: SW	DATE: 06/06/16
-------	------	-------------	---------------	-----------	----------------

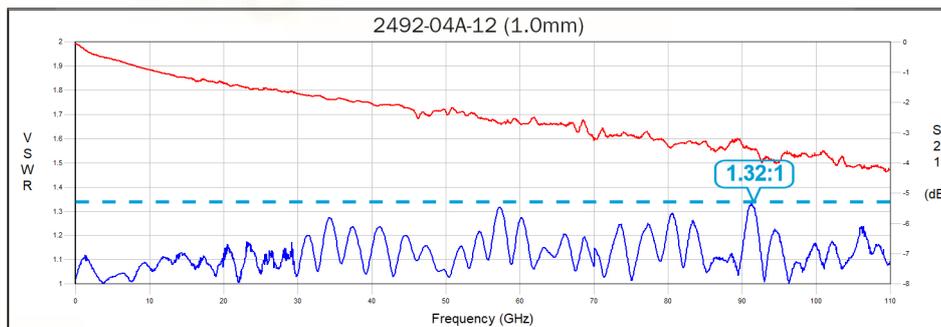
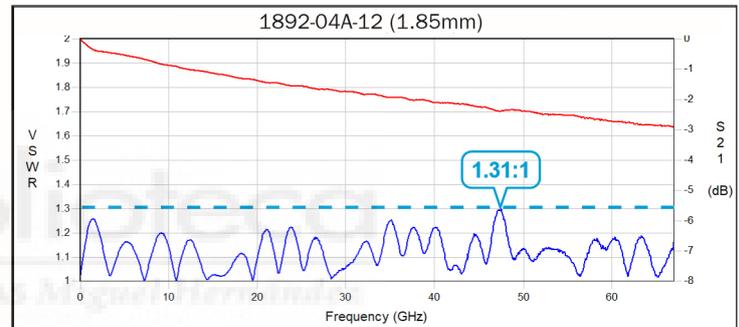
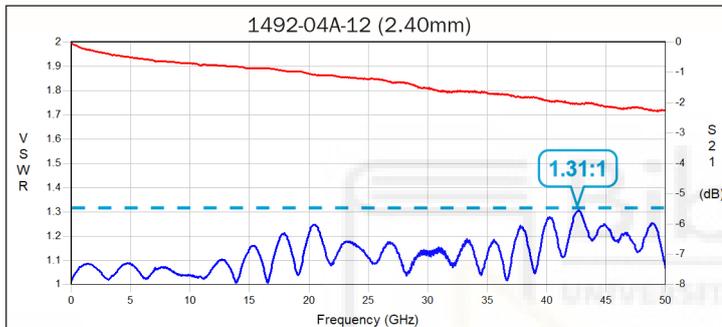
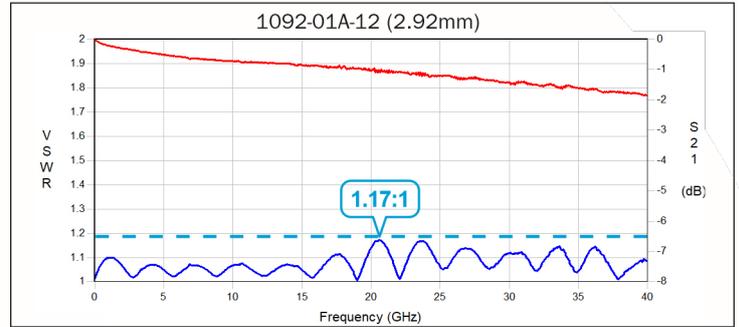
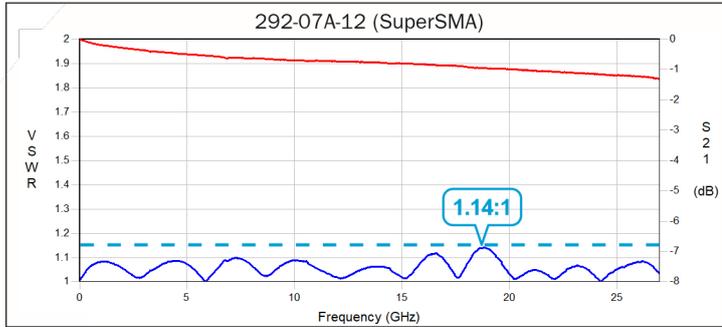


Southwest Microwave, Inc.
9055 South McKerny Street
Tempe, Arizona 85284-2946
Telephone (480) 783-0201
Fax (480) 783-0360

TITLE			
2.92mm JACK (FEMALE) END LAUNCH CONNECTOR LOW PROFILE			
DRN BY: EAG	DATE: 09/26/12	DWG. NO.	REV.
SHEET: 1 OF 1		91Y60926	B



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



2 0 2 1 - 2 0 2 2

THE PERFORMANCE LEADER IN
MICROWAVE CONNECTORS



REFERENCIAS

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [2] C. Europea, “Advanced Biomaterials for Regenerative Medicine,” 2 Agosto 2016.[Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/article/id/183123-novel-biomaterials-for-regenerative-medicine/es>
- [3] H. García Martínez, E. Ávila Navarro, G. Torregrosa Penalva, A. Rodríguez Martínez, C. Blanco Angulo and M. A. de la Casa Lillo, “Low-Cost Additive Manufacturing Techniques Applied to the Design of Planar Microwave Circuits,” p. 18, 2020.
- [4] C. P. A. Hurtado, “CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES MEDIANTE GUÍAS DE ONDA RECTANGULARES PARA,” p. 82, 2023.
- [5] “BYJU'S - Maxwell's Equations,” [Online]. Available: <https://byjus.com/physics/maxwells-equations/>. [Accessed 07 09 2024].
- [6] C. Invitado, “NAUKAS,” 2019 08 2019. [Online]. Available: <https://naukas.com/2019/04/08/impresion-3d-reformulacion-sostenible-de-alimentos/>. [Accessed 07 09 2024].
- [7] R. Strietzel, “Fusión selectiva por láser para el procesamiento de polvo de aleación dental,” vol. 21, no. 5, pp. 291-304, 2010.
- [8] J. M. Villalba, F. J. Manjón and A. Guirao, “RESONANCIA DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.,” 1992. [Online]. Available: <https://www.uv.es/~martined/tecweb/Resonancias.pdf>. [Accessed 07 09 2024].
- [9] U. Waseem, “Stripline vs Microstrip: A Comprehensive Comparison,” p. 16, 2023.
- [10] H. G. Martínez, “Caracterización de Sustratos de Impresión 3D para Aplicaciones de Microondas,” *ResearchGate*, p. 11, 2018.
- [11] P. ABS300/TP20279. [Online]. Available: <https://www.avient.com/resources/technical-data-sheets>. [Accessed 2024 09 01].
- [12] RS, “FR4 DataSheet,” [Online]. Available: <https://docs.rs-online.com/a014/0900766b815c2c39.pdf>.
- [13] D. G. P. Kajfez, *Dielectric Resonators*, Artech House, 1986.
- [14] T. R. Kuphaldt, “LibreText,” [Online]. [Accessed 08 09 2024].

- [15] “Nicolson-Ross-Weir method,” [Online]. Available: [https://econam.metamorphose-vi.org/index.php?option=com_content&view=article&id=134%3Anicolson-ross-weir-method&catid=60%3Atheory&Itemid=6#:~:text=Nicolson-Ross-Weir%20\(NRW\)%20retrieval%20method%20is%20based%20on%20the%20inversion%20of](https://econam.metamorphose-vi.org/index.php?option=com_content&view=article&id=134%3Anicolson-ross-weir-method&catid=60%3Atheory&Itemid=6#:~:text=Nicolson-Ross-Weir%20(NRW)%20retrieval%20method%20is%20based%20on%20the%20inversion%20of).

