



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO DE DOS BANDAS  
BASADO EN UNA SUPERFICIE SELECTIVA DE FRECUENCIA

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
MISAEAL PLATA JIMÉNEZ

TUTOR  
DR. JOSÉ I. MARTÍNEZ LÓPEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, OCTUBRE 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. CEBALLOS HERRERA DANIEL ENRIQUE

Secretario: DR. MARTYNYUK OLEKSANDR

1 er. Vocal: DR. MARTÍNEZ LÓPEZ JOSÉ ISMAEL

2 do. Vocal: DR. MATÍAS MARURI JOSÉ MARÍA

3 er. Vocal: DR. RODRÍGUEZ CUEVAS JORGE

Lugar donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, Ciudad de México.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Martínez López José Ismael

---

**FIRMA**

# Agradecimientos

He querido agradecer a las personas que han sido clave, en mi vida y especialmente en esta etapa de formación académica, personal y profesional.

Al Dr. Ismael la guía, el conocimiento y enseñanza necesaria para la elaboración de este trabajo de investigación, por sus invaluable consejos, amistad y tiempo, mi mayor y profundo agradecimiento.

Al grupo de trabajo que conforma UNAMems por su gran disposición y amistad, por compartir sus experiencias y conocimiento.

Un agradecimiento de forma muy especial a mi familia, mis padres por su apoyo y amor incondicional. A Cédrick, Dassey y Miguel por su ayuda y felicidad constante que me han dado.

A mis amigos por la inspiración y alegría, Arturo por las conversaciones, consejos y tiempo, a Gaby por creer en mí, por impulsarme, por escucharme.

A los miembros del jurado por su valioso tiempo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico durante mi formación.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por la beca y los recursos proporcionados a los proyectos del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IN118719, IN118620 y IN119420.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>3</b>
<b>Resumen</b>	<b>11</b>
<b>Organización del trabajo de investigación</b>	<b>11</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>14</b>
1.1. Estado Del Arte . . . . .	18
1.1.1. Antecedentes . . . . .	18
1.1.2. Superficies Periódicas . . . . .	20
1.1.3. Tipos de superficies selectivas de frecuencia . . . . .	21
1.1.4. Uso de las SSF periódicas . . . . .	28
1.2. Futuro de las SSF . . . . .	32
1.2.1. Futuro . . . . .	32
1.2.2. Aplicaciones . . . . .	32
1.3. Absorbedores electromagnéticos . . . . .	33
1.3.1. Absorbedores electromagnéticos basados en SSF . . . . .	33
1.4. Estado del arte de los absorbedores electromagnéticos basados en SSF	34
1.4.1. Configuraciones . . . . .	34
<b>2. Principio de operación</b>	<b>37</b>
2.1. Introducción . . . . .	37
2.1.1. Acoplamiento de impedancias . . . . .	37
2.1.2. Redes de un solo puerto . . . . .	40

2.1.3.	Flujo de Potencia . . . . .	42
2.2.	Configuraciones de una SSF Absorbadora . . . . .	44
2.3.	Pantalla Salisbury . . . . .	45
2.4.	Pantalla Jaumann . . . . .	46
2.5.	Absorbadores de circuito analógico . . . . .	48
2.6.	Absorbadores basados en SSF . . . . .	49
2.6.1.	Superficies de impedancia artificial (AIS) . . . . .	50
2.6.2.	Segunda resonancia . . . . .	52
2.6.3.	Dieléctrico . . . . .	53
2.7.	Cálculo de Absorción . . . . .	55
2.7.1.	Conclusiones . . . . .	57
<b>3.</b>	<b>Diseño de la Superficie Selectiva de Frecuencia</b>	<b>58</b>
3.1.	Diseño de la celda unitaria absorbente propuesta . . . . .	58
3.2.	Modelado . . . . .	59
3.3.	Simulación . . . . .	61
3.3.1.	Resultados numéricos . . . . .	62
3.3.2.	Absorción . . . . .	64
3.3.3.	Respuesta a variaciones de ángulo . . . . .	70
3.3.4.	Ancho de banda . . . . .	73
3.3.5.	Campo eléctrico, magnético y corriente superficial . . . . .	74
3.3.6.	Presencia de dos resonancias . . . . .	76
3.3.7.	Densidad de pérdida de potencia . . . . .	77
3.3.8.	Conclusiones . . . . .	78
<b>4.</b>	<b>Proceso de Fabricación</b>	<b>80</b>
4.1.	Proceso litográfico . . . . .	80
4.2.	Materiales . . . . .	83
4.3.	Flujo del proceso de fabricación . . . . .	84
4.3.1.	Preparación del sustrato . . . . .	84

4.3.2. Depósito de resina fotosensible . . . . .	84
4.3.3. Máscara de la SSF . . . . .	84
4.3.4. Revelado . . . . .	85
4.3.5. Ataque . . . . .	85
4.3.6. Superficie terminada . . . . .	86
<b>Conclusiones Generales</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>89</b>

# Índice de figuras

1.1. Detalle de elemento unitario y una superficie periódica. . . . .	20
1.2. Comparación entre los distintos grupos [2]. . . . .	22
1.3. Ejemplo de diferentes geometrías complejas de elementos [2]. . . . .	22
1.4. Ejemplo de diferentes geometrías fractales [2]. . . . .	22
1.5. Superficie de una sola capa sobre dieléctrico. . . . .	23
1.6. Ejemplo de una superficie multicapa. . . . .	24
1.7. Superficie en cascada sin dieléctrico [1]. . . . .	24
1.8. Superficie en cascada con dieléctrico [1]. . . . .	25
1.9. Superficie filtro-antena-filtro [2]. . . . .	25
1.10. Superficie de tres dimensiones [2]. . . . .	26
1.11. Superficie Activa [26]. . . . .	27
1.12. Radomo utilizado en un avión para proteger un radar meteorológico [21]. . . . .	28
1.13. Diseño de una antena cassegrain con dos alimentadores y subreflec- tores dicroicos [1]. . . . .	29
1.14. SSF polarizadora [22]. . . . .	29
1.15. SSF usadas como filtros [16]. . . . .	30
1.16. Tipos de RFID basados en SSF [23]. . . . .	31
1.17. Estructura de un absorbedor electromagnético basado en una SSF. . . . .	31
2.1. Parámetros $S$ de una red de dos puertos. . . . .	38
2.2. Modo de medición directo. . . . .	39
2.3. Modo de medición inverso. . . . .	39



2.4.	Parámetros de una red de un solo puerto. . . . .	40
2.5.	Circuito equivalente de una red de un puerto. . . . .	41
2.6.	Flujo de potencia en una red de un puerto. . . . .	42
2.7.	Flujo de potencia en una red de dos puertos. . . . .	43
2.8.	Pantalla Salisbury. . . . .	45
2.9.	Circuito equivalente de la pantalla Salisbury. . . . .	46
2.10.	Pantalla Jaumann. . . . .	46
2.11.	Circuito equivalente de la pantalla Jaumann. . . . .	47
2.12.	Detalle de elemento unitario y una superficie Jaumann. . . . .	48
2.13.	Absorbedor de CA basado en una superficie periódica. . . . .	48
2.14.	Circuito equivalente de absorbedor de CA. . . . .	49
2.15.	Respuesta del absorbedor de CA. . . . .	50
2.16.	Estructura de una superficie AIS. . . . .	51
2.17.	Circuito equivalente de una superficie de impedancia artificial. . . . .	51
2.18.	Principio de dos resonancias [28]. . . . .	53
2.19.	Configuraciones básicas del dieléctrico en una SSF (Vista lateral). . . . .	54
2.20.	Respuesta de la frecuencia de resonancia con dieléctrico infinito [1]. . . . .	55
2.21.	Respuesta de la frecuencia de resonancia con dieléctrico de grosor $d$ [1]. . . . .	55
3.1.	Dimensiones de la celda unitaria y de los anillos. . . . .	60
3.2.	Dimensiones de la cruz central. . . . .	61
3.3.	Geometría final. . . . .	62
3.4.	Vista frontal y trasera. . . . .	63
3.5.	Vista frontal y trasera de la simulación 3D en <i>CST Studio Suite</i> . . . . .	64
3.6.	$S_{11}$ Polarización horizontal. . . . .	65
3.7.	$S_{11}$ Polarización vertical. . . . .	66
3.8.	Absorción en polarización horizontal. . . . .	68
3.9.	Absorción en polarización vertical. . . . .	69
3.10.	Orientación de los ángulos. . . . .	70
3.11.	Respuesta de $A$ en $0^\circ$ , $10^\circ$ , $20^\circ$ y $30^\circ$ . . . . .	71

3.12. Respuesta de $A$ en $40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ y $80^\circ$ . . . . .	72
3.13. Anchos de banda en ambas resonancias a -3dB. . . . .	73
3.14. Anchos de banda en ambas resonancias a -10dB. . . . .	74
3.15. Distribución de campos y corriente superficial para resonancia No. 1. . . . .	75
3.16. Distribución de campos y corriente superficial para resonancia No. 2. . . . .	75
3.17. Distribución del campo eléctrico para la primera resonancia a $32.32GHz$ . . . . .	76
3.18. Distribución del campo eléctrico para la segunda resonancia a $37.92GHz$ . . . . .	77
3.19. Densidad de pérdida de potencia para la primera y segunda frecuencia de absorción para la polarización TM. . . . .	78
3.20. Densidad de pérdida de potencia para la primera y segunda frecuencia de absorción para la polarización TE. . . . .	78
4.1. Proceso de fotolitografía. . . . .	82

# Índice de cuadros

1.1. Principales aplicaciones en donde se emplean SSF. . . . .	33
1.2. Cuadro comparativo entre técnicas utilizadas. . . . .	36
1.3. Cuadro comparativo entre diferentes absorbedores basados en SSF. . .	36
3.1. Tabla comparativa entre ángulos de incidencia y absorción. . . . .	73
4.1. Características eléctricas y mecánicas del sustrato Rogers RO3210. . .	83
4.2. Características eléctricas del cobre. . . . .	84

# Resumen

En este trabajo de investigación se presenta el diseño de un absorbedor electromagnético de dos bandas de absorción comprendidas entre  $30GHz$  y  $40GHz$  basados en una superficie selectiva de frecuencia, comprende las etapas de análisis, diseño y simulación.

La superficie selectiva de frecuencia presentada en este trabajo está diseñada con base en anillos ranurados junto con una cruz ranurada sobre un dieléctrico en el que por ambos lados está cubierto por una capa metálica. El punto más importante que debe presentar este diseño es la presencia de dos bandas de absorción con la característica de que ambas presenten un porcentaje alto de absorción respecto a los trabajos presentados actualmente y que están documentados en el estado del arte en este trabajo.

Se presenta el diseño de una superficie tipo ranura utilizando un sustrato Rogers, el cual cuenta con un dieléctrico de  $640\mu m$  de grosor junto con dos capas de cobre con un grosor de  $17\mu m$  por ambos lados. Se realizaron simulaciones numéricas en un rango de frecuencias comprendido entre  $30GHz$  y  $40GHz$ , de estas simulaciones se obtuvo como resultado dos picos de absorción, ambos con un valor de absorción de la onda incidente superior al 90%.

# Organización del trabajo de investigación

El presente trabajo se encuentra dividido en cuatro capítulos principales organizados de la siguiente manera:

## Capítulo 1

Introducción, en este capítulo se pretende sentar las bases necesarias para entender a grandes rasgos el funcionamiento y el contexto de las superficies selectivas de frecuencia absorbentes, así como un punto de partida para realizar el trabajo de investigación. Se presenta el estado del arte que a su vez podemos dividirlo en: los antecedentes de las superficies selectivas de frecuencia, qué son las SSF, los tipos de SSF, aplicaciones y el presente y futuro que tienen las SSF. En este capítulo se fija un punto de partida y una meta por alcanzar con base en los reportes del estado del arte.

## Capítulo 2

Principio de operación, este capítulo contiene principalmente el principio de operación teórico de las superficies selectivas de frecuencia, las configuraciones de estructuras que presentan absorción y los materiales que son utilizados en su fabricación, así como sus propiedades, este capítulo sienta las bases teóricas necesarias para poder realizar el diseño de una superficie selectiva de frecuencia que presente características absorbentes, de lo cual se echará mano en capítulos posteriores,

este capítulo pretende dar el conocimiento necesario para entender los resultados, fenómenos y problemas que se presentan al momento de diseñar una estructura con las características que se pretenden obtener de ella.

### **Capítulo 3**

Diseño de la superficie selectiva de frecuencia, este capítulo está centrado en dos partes muy importantes, por un lado se tiene el diseño de la estructura que comprende el uso de los materiales, el diseño de la geometría de los elementos que serán parte de la estructura, el modelado de la celda unitaria en software especializado y por otro lado la simulación numérica, y la obtención de resultados de simulación los cuales son de suma importancia ya que con ellos podemos observar la eficacia del diseño, las características que presenta y poder compararlas con trabajos reportados en el estado del arte. Este capítulo es decisivo para el paso siguiente que es la fabricación y caracterización del dispositivo.

### **Capítulo 4**

Fabricación. Este capítulo está dividido en dos partes muy importantes, la fabricación del dispositivo con un pequeño resumen teórico del proceso de fabricación empleado y para finalizar el capítulo se presenta una conclusión en la que se recapitula de manera breve los procesos y comparación con otros trabajos realizados, para finalmente dar una opinión que resuma el trabajo elaborado.

# Capítulo 1

## Introducción

### Justificación

Las superficies selectivas de frecuencia tienen un potencial muy grande en distintas aplicaciones, entre las que se encuentran militares, de la salud, seguridad, comunicaciones, entre muchas otras. Un ejemplo de aplicaciones de superficies selectivas de frecuencia con características absorbentes es en radares militares, supresores de señal de telefonía celular y redes inalámbricas en centros de alta seguridad, escudos de interferencia en antenas y cámaras anecoicas en centros de investigación.

La investigación y desarrollo de estas tecnologías contribuyen al mejoramiento de las técnicas empleadas en el diseño y la reducción de costos en su fabricación.

En la actualidad una de sus aplicaciones más conocidas son los dispositivos RFID (radio frequency identification), que están presentes en diversos dispositivos móviles y artículos de identificación personal. Los materiales protectores contra las interferencias electromagnéticas que se pueden diseñar a partir de superficies selectivas de frecuencia con características absorbentes tienen la posibilidad de ser implementadas en cámaras anecoicas a un precio menor que las superficies usadas actualmente. Las SSF absorbentes se encuentran en aplicaciones en el uso de radares, la reducción de señales espurias no deseadas generadas por objetos cercanos, de igual manera los absorbedores pueden ser usados en sistemas antirradar al evitar gracias a sus propiedades la detección de objetos específicos.

Tienen una utilidad muy grande en escenarios en donde se desea reducir al máximo las interferencias electromagnéticas, se utilizan para minimizar el acoplamiento entre antenas co-localizadas, en circuitos integrados de microondas (MMIC), reducen la resonancia generada por las cavidades, son indispensables en aplicaciones RFID, para lograr una adecuada lectura de las superficies. Estas superficies pueden ser usadas también en escenarios en donde no se desea que ingresen señales de radiofrecuencia o microondas, como es el caso de centros de reclusión en donde se desea aislar de señales celulares, WiFi, o de radiocomunicación que podrían ser usadas de forma inadecuada.

Este trabajo de investigación tiene como propósito el diseño y propuesta de una geometría para una superficie selectiva de frecuencia pasiva que presente características absorbentes en dos frecuencias de resonancia distintas dentro del rango de las microondas.

Se propondrá una superficie selectiva de frecuencia con una geometría que sea capaz de presentar características absorbentes con un porcentaje de absorción mayor al 95 %, esto dentro el rango de las microondas en un ancho de banda comprendido entre  $30GHz$  y  $40GHz$ . Se realizará el análisis, la propuesta y la simulación con software especializado de la superficie selectiva de frecuencia. Posteriormente se analizará con los datos arrojados en la simulación que los resultados sean favorables de acuerdo con el porcentaje de absorción esperado en el diseño.

## **Objetivo**

- Diseñar y proponer un absorbedor electromagnético basado en una superficie selectiva de frecuencia que presente niveles de absorción mayores al 90 % dentro de un rango de frecuencias comprendido entre  $30GHz$  y  $40GHz$ .



## Metas

- Análisis de los absorbedores basados en SSF.
- Diseño y propuestas de diferentes geometrías que presenten características absorbentes.
- Realizar la simulación numérica con software especializado y analizar los datos obtenidos.
- Fabricación y caracterización de la SSF.

Los sistemas de comunicaciones han sufrido un avance muy significativo en los últimos años debido a las necesidades de movilidad.

El desarrollo de receptores cada vez más pequeños y eficientes, que solucionen la necesidad de ser implementados en dispositivos móviles es cada vez más demandante. Aunado a esto, la tendencia de los sistemas inalámbricos, es hacer uso de frecuencias cada vez más altas. Debido a que, éstas proporcionan un mayor ancho de banda y una capacidad de transmisión de datos mucho mayor.

Puesto que, las ondas electromagnéticas en frecuencias altas sufren mayores afectaciones por parte del entorno, los retos a superar son mayores. Por ende, esto ha generado que dentro de los desarrollos de estos sistemas se busque optimizar lo más posible la eficiencia de los dispositivos transmisores y receptores.

Debido a que las interferencias externas no son capaces de ser controladas, se tiene que trabajar en dispositivos de recepción/transmisión que cuenten con características de mayor inmunidad, en este aspecto las superficies selectivas de frecuencia (SSF) son una de las mejores opciones que se tienen para el desarrollo de estos dispositivos. El uso de superficies selectivas de frecuencia posibilita filtrar frecuencias específicas de las señales electromagnéticas, como también respecto a su polarización y ángulo de incidencia. Este tipo de solución aparte de ser muy buenos candidatos por sus características mostradas, tienen la característica de que su fabricación no representa un costo alto, y la simpleza de su estructura con la que se pueden diseñar resulta en una complejidad de fabricación menor.

Los absorbedores electromagnéticos son estructuras diseñadas especialmente para ser capaces de absorber las ondas electromagnéticas que inciden sobre ella, de esta manera se asegura en cierta medida que una onda electromagnética no sea capaz de ser reflejada y transmitida en la estructura, esto puede ser muy útil para ciertas aplicaciones en las que se requiera no tener presentes ondas electromagnéticas a frecuencias específicas.

Los absorbedores basados en SSF son generalmente estructuras de baja complejidad, fáciles de fabricar y con perfiles muy delgados que resultan convenientemente fáciles de implementar en sistemas de comunicaciones.

## 1.1. Estado Del Arte

Las superficies selectivas de frecuencia (SSF) han sido ampliamente estudiadas desde hace ya varias décadas, nos podemos remontar a los años 1940's en los cuales se hicieron grandes esfuerzos por conseguir nuevos materiales que fueran útiles en aplicaciones militares específicas, el cual fue el caso de las superficies selectivas de frecuencia absorbedoras, las cuales tuvieron su aparición en los primeros intentos por conseguir un método eficiente de reducción de señales e interferencias no deseadas en los radares, rápidamente estas características de las SSF absorbentes fueron utilizadas en sistemas antirradar para vehículos de sigilo utilizados en combate. Recientemente las investigaciones han puesto sus esfuerzos en estas tecnologías ya que presentan una gran alternativa a las necesidades de los dispositivos actuales como son los sistemas de telefonía móvil, sistemas de comunicación inalámbrica y compartición de datos por medios inalámbricos, los absorbedores tienen una gran presencia en este campo ya que con ellos se puede hacer un uso mucho más eficiente del espectro electromagnético, el cual ha sido históricamente un recurso limitado y cada vez más explotado, consecuentemente se ha incrementado la eficiencia de los dispositivos de comunicación. Esta tecnología absorbente puede ser utilizada en sistemas de salud o seguridad al inhibir señales no deseadas o perjudiciales en áreas y espacios específicos. En los siguientes párrafos se dará un resumen de los trabajos más actuales, los métodos utilizados y los resultados obtenidos en diferentes investigaciones, esto nos dará un panorama amplio de hacia dónde dirigir el trabajo de investigación, trazar un camino y definir una meta por lograr.

### 1.1.1. Antecedentes

**Superficies selectivas de frecuencia (SSF).** Durante la década de los 1950's en la posguerra surgió la necesidad de mejorar los sistemas de radar ya que presentaban problemas de eco no deseado. Debido a esto se empezó a trabajar en materiales capaces de absorber las señales de radar. Se emplearon los llamados materiales RAM

(radar absorber materials) [1], un tipo particular de estos materiales fue llamado absorbente analógico, que depende de una o varias capas de matrices geométricas de materiales conductores, la combinación de éstos actuaba como circuitos resonantes RLC.

Las superficies selectivas de frecuencia han sido ampliamente estudiadas debido a su amplio margen de aplicaciones posibles dentro del sector militar, comercial, seguridad y espacial, por mencionar algunos ejemplos de aplicaciones de SSF. Estas superficies modifican las ondas electromagnéticas que inciden en ella modificando así su comportamiento de transmisión o reflexión, por este motivo podemos decir que las superficies selectivas de frecuencia actúan como filtros espaciales, los cuales pueden ser filtros paso-bajo, paso-alto, pasa-banda o supresor de banda. Esto como resultado de los distintos diseños de las geometrías empleadas y el arreglo de ellas en la superficie.

Es importante emplear el mayor esfuerzo en el diseño de la geometría de los elementos que comprenden la superficie, éstos son llamados elementos resonantes los cuales pueden ser de tipo parche o de tipo ranura, y gracias a la característica de periodicidad de las SSF la superficie puede contar con un número muy grande de elementos. Las ondas que interactúan con estos elementos dependen principalmente de la frecuencia y la polarización de las ondas electromagnéticas que inciden en ella y por otro lado la conductividad de los materiales con los cuales está fabricada la superficie.

**Metamateriales.** Los metamateriales son materiales artificiales que se pueden crear mediante diversas herramientas de nanofabricación, cuentan con la característica de que la permeabilidad eléctrica y magnética de los metamateriales pueden ser controladas [24]. Esta tecnología es habitualmente usada en la fabricación de antenas, en sensores y absorbedores entre muchas otras. Gracias a sus propiedades, estos materiales han atraído la atención de muchos investigadores los cuales han propuesto diferentes estructuras absorbentes para un rango de frecuencias dentro de

las microondas. La respuesta a la frecuencia de los metamateriales puede modificarse variando la geometría y la estructura de la celda unitaria, estas celdas unitarias se organizan en un patrón periódico que está dispuesto sobre un sustrato dieléctrico.

### 1.1.2. Superficies Periódicas

Una superficie periódica está formada por un arreglo infinito de elementos idénticos llamados celdas unitarias, pueden ser de una o dos dimensiones. Estas estructuras pueden ser excitadas mediante una onda electromagnética plana que incida sobre ella, si la superficie no cuenta con elementos extras añadidos en ella se considera que es una superficie pasiva Fig. 1.1.

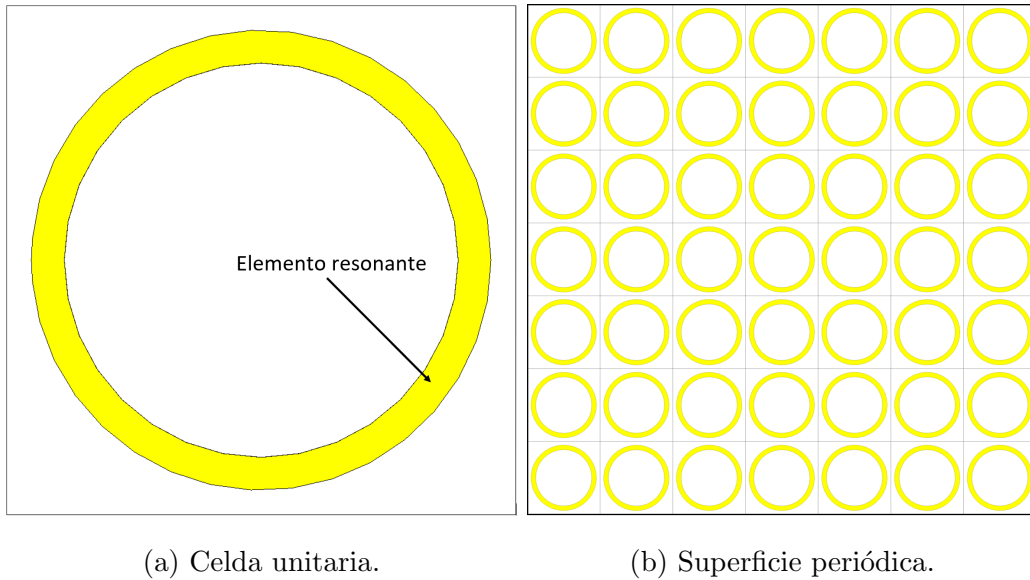


Figura 1.1: Detalle de elemento unitario y una superficie periódica.

Una onda plana incidente  $E_i$  puede ser parcialmente transmitida por la superficie  $E_t$  y/o parcialmente reflejada  $E_r$  justo en las frecuencias de resonancia, con estos datos podemos calcular el coeficiente de reflexión  $\Gamma$  y el coeficiente de transmisión  $T$  los cuales se pueden definir como:

$$\Gamma = E_r/E_i \quad (1.1)$$

$$T = E_t/E_i \quad (1.2)$$

La mayoría de las ocasiones las superficies selectivas de frecuencia son diseñadas con un arreglo de elementos metálicos montados sobre un sustrato dieléctrico, presentando características de reflexión transmisión o absorción en una frecuencia de resonancia específica.

### 1.1.3. Tipos de superficies selectivas de frecuencia

Las superficies selectivas de frecuencia se pueden catalogar de acuerdo con el tipo de arreglo que tienen sus elementos, la estructura que presentan o de acuerdo con la aplicación.

#### Basado en arreglo de sus elementos

Estos arreglos se pueden dividir en tres grupos: básicos, complejos y de tipo fractal.

**Básicos.** Este grupo está dividido en cuatro grupos: elementos de N-polos conectados en su centro, elementos en lazo, de interior sólido y de tipo parche, y un último grupo el cual puede ser la combinación de los anteriores [2] Fig. 1.2.

**Complejos.** Debido a que existen aplicaciones que requieren miniaturización en sus diseños sin perder características surgen geometrías de complejidad mayor, estos generalmente son diseñados para operar en bandas bajas del espectro electromagnético y mejorar la respuesta a la incidencia oblicua Fig. 1.3.

**Fractales.** Actualmente las geometrías basadas en fractales están siendo usadas debido a las características que presentan; tienen una respuesta multibanda con dimensiones compactas lo que las vuelve atractivas para aplicaciones en donde se requiera miniaturización de la superficie, cuentan con un ancho de banda mayor en comparación con la utilización de otros elementos básicos Fig. 1.4.

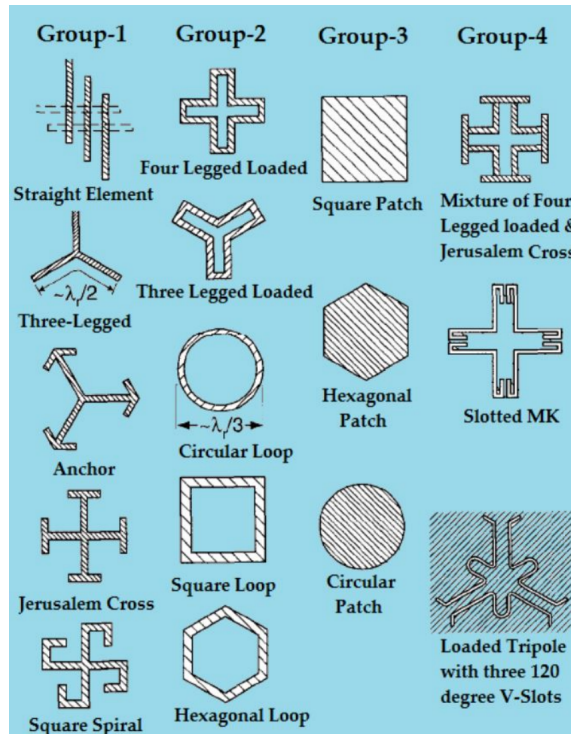


Figura 1.2: Comparación entre los distintos grupos [2].

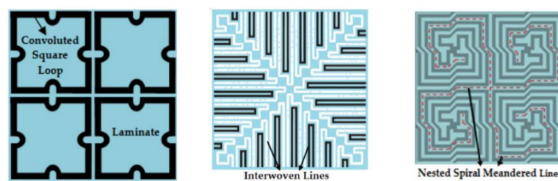


Figura 1.3: Ejemplo de diferentes geometrías complejas de elementos [2].

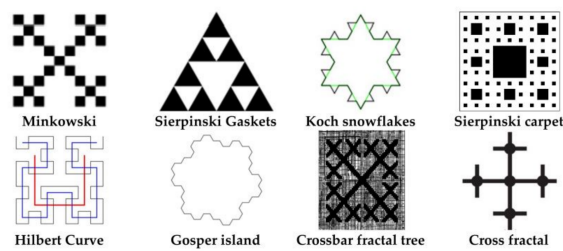


Figura 1.4: Ejemplo de diferentes geometrías fractales [2].

### Basados en su estructura

De acuerdo con la composición de la estructura de la superficie se pueden dividir en cuatro grupos, superficies de una sola capa, superficies multi-capa, antena-filtro-antena y superficies de tres dimensiones.

**Superficies de capa única.** Las superficies selectivas de frecuencia de capa única se componen de un arreglo periódico de elementos resonantes de dos dimensiones sobre un sustrato dieléctrico, su uso como filtros electromagnéticos ha tenido muchas aplicaciones en el área de las comunicaciones dentro de antenas o radares [2] Fig. 1.5.

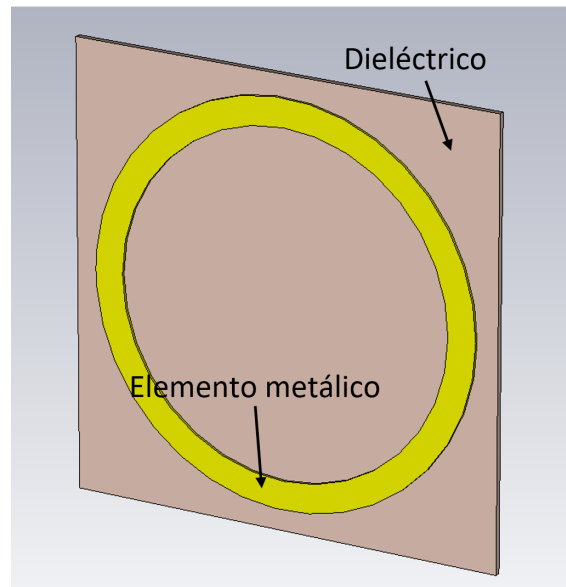
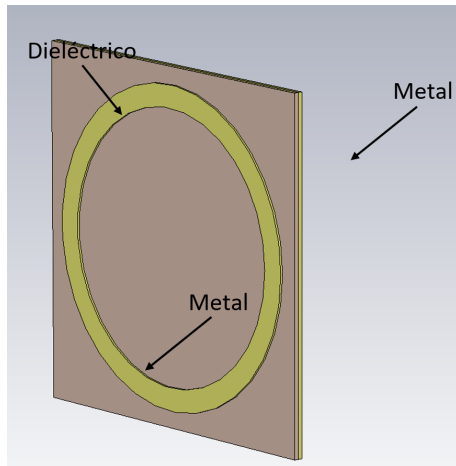


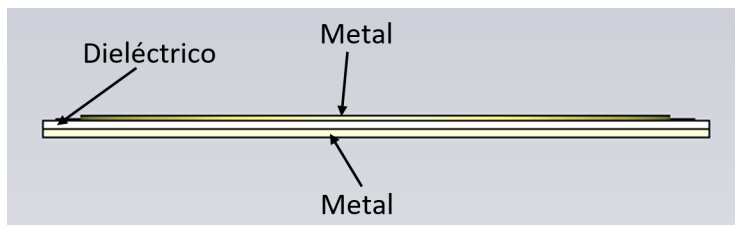
Figura 1.5: Superficie de una sola capa sobre dieléctrico.

**Superficies multicapa.** Una superficie de capa única presenta una buena transmisión y reflexión solo en las frecuencias de resonancia, pero no en todos los casos se requiere que sea de esta manera, existen aplicaciones en las que se requiere que la curva de resonancia sea más ancha, para lograr este efecto se tienen dos opciones, usar dos o más superficies periódicas en cascada una detrás de otra, o implementar un dieléctrico entre ambas capas en cascada [2]. Las superficies multicapa son como su nombre lo indica, superficies que poseen más de un elemento metálico en su construcción. Generalmente estos elementos están separados entre sí por un espaciador que suele ser un sustrato dieléctrico o el espacio libre, el uso de superficies multicapa tiene como principal fin mejorar el ancho de banda, ya que en el caso de estructuras de una sola capa suele ser un ancho de banda limitado [2] Fig. 1.6.





(a) Vista de perspectiva.



(b) Vista de perfil.

Figura 1.6: Ejemplo de una superficie multicapa.

**Superficie en cascada sin dieléctrico.** Las superficies en cascada sin dieléctrico presentan un aumento en el ancho de banda en comparación con una superficie de una sola capa, a pesar de ello este arreglo presenta mucha susceptibilidad a los ángulos de incidencia de la onda electromagnética incidente Fig. 1.7.

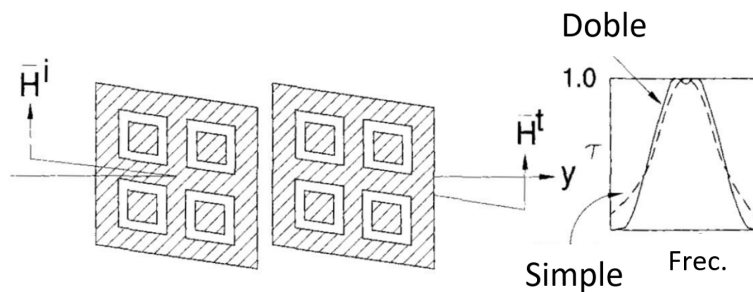


Figura 1.7: Superficie en cascada sin dieléctrico [1].

**Superficie en cascada con dieléctrico.** Este tipo de superficies presentan un mayor ancho de banda en comparación con una superficie simple, sin embargo la resonancia no suele ser constante en los valores más altos del ancho de banda.

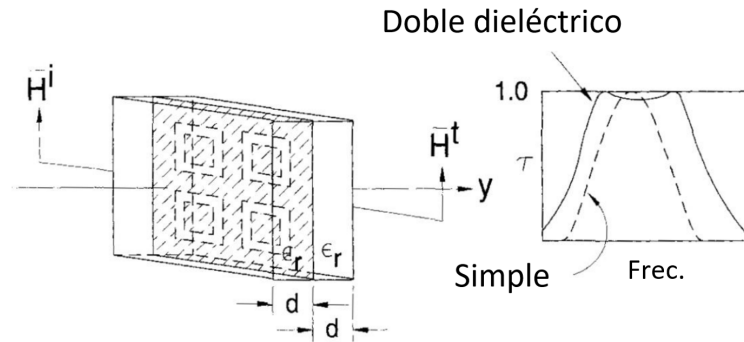


Figura 1.8: Superficie en cascada con dieléctrico [1].

**Superficies filtro-antena-filtro.** Estos diseños son similares a las superficies multicapa, pero para este caso los elementos tienen diferente función de acuerdo con la posición que tengan dentro de la estructura. Estas superficies son empleadas generalmente en el diseño de filtros de guía de onda ya que poseen una alta selectividad y un buen ancho de banda manteniendo un diseño compacto de la superficie [2] Fig. 1.9.

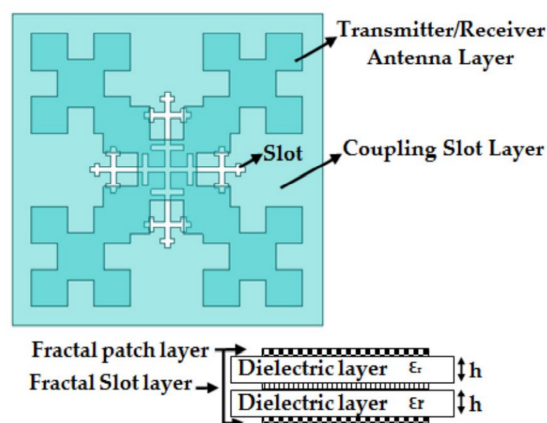


Figura 1.9: Superficie filtro-antena-filtro [2].

**Superficies de tres dimensiones.** En estas superficies se hace uso de estructuras y cavidades adicionales a la estructura de dos dimensiones obteniendo de esta manera estructuras en tres dimensiones, las ventajas que tienen estas superficies con respecto a los anteriores diseños es que poseen un mayor ancho de banda, insensibilidad a los ángulos de incidencia y permiten diferentes polarizaciones de las ondas incidentes, pero la construcción de estas superficies además de ser mucho más compleja es generalmente más voluminosa en comparación con las anteriores Fig. 1.10.

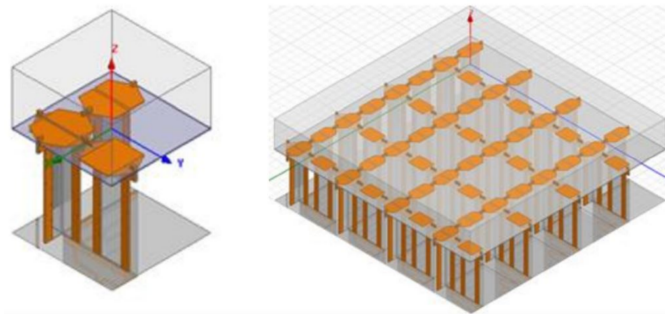


Figura 1.10: Superficie de tres dimensiones [2].

### Basados en aplicación

Debido a sus amplias características que poseen, se han aplicado superficies selectivas de frecuencia para diversos propósitos dentro de las comunicaciones: en el blindaje contra campos electromagnéticos, polarizadores y antenas entre muchas otras aplicaciones, a continuación, se describen dos de las aplicaciones en las que han sido más utilizadas: las superficies selectivas de frecuencia activas y absorbedores electromagnéticos.

**SSF activos.** El desarrollo de las superficies selectivas de frecuencia activas surge de la necesidad de poder variar a conciencia la respuesta de las superficies. Dado que las SSF pasivas tiene un diseño fijo con el cual son fabricadas, cuentan con estas limitaciones. Para el caso de las superficies selectivas de frecuencia activas (AFSS) las características de frecuencia de resonancia que presenta el diseño pueden ser variadas mediante elementos adicionales en la estructura como pueden ser diodos

PIN, otorgando así la característica de poder ser reconfiguradas por medio de señales externas Fig. 1.11.

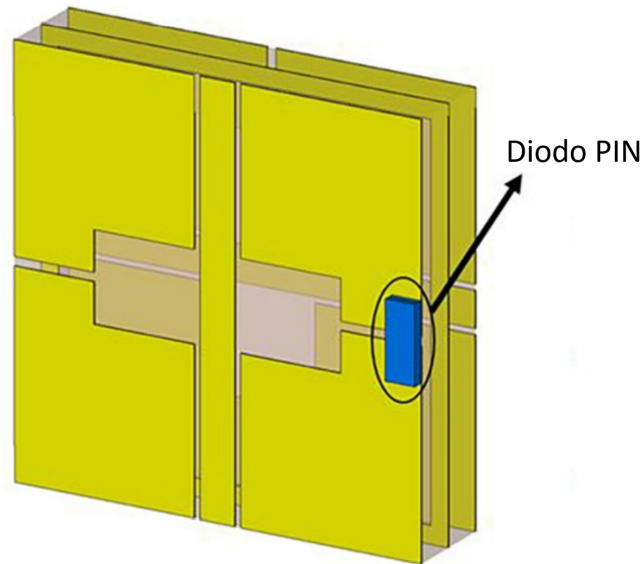


Figura 1.11: Superficie Activa [26].

**Superficies absorbedoras.** Por lo general una superficie selectiva de frecuencia presenta muy buenas características de reflexión en un rango específico de frecuencia, no en todos los casos esta característica es la que se desea en una SSF, en aplicaciones específicas se requiere tener la mayor absorción posible de las ondas incidentes, como es el caso de sistemas contra interferencia electromagnética, los cuales demandan un valor de reflexión de la onda extremadamente bajo para evitar problemas asociados a estas. Por lo tanto, una superficie selectiva de frecuencia absorbedora en lugar de reflejar estas ondas electromagnéticas son absorbidas por la superficie.

#### 1.1.4. Uso de las SSF periódicas

##### Radomos

En el área de telecomunicaciones un radomo es una superficie con la que se cubre una antena o un radar para protegerlo de agentes externos como interferencias o afectaciones del clima, pero sin afectar el funcionamiento de los equipos Fig. 1.12.



Figura 1.12: Radomo utilizado en un avión para proteger un radar meteorológico [21].

##### Subreflectores dicroicos

El uso de subreflectores dicroicos en sistemas de antenas como por ejemplo antenas Cassegrain pueden aportar al subreflector transparencia en una cierta banda y opacidad en una banda distinta. En la Fig. 1.13 se muestra el diseño de una antena cassegrain en el que se han colocado dos alimentadores a distintas frecuencias, para el alimentador de  $f_1$  que se encuentra en el foco del reflector principal el subreflector dicroico es transparente, mientras que para el alimentador de  $f_2$  que se encuentra en el foco del subreflector cassegrain no lo es, de este modo se puede tener dos alimentadores distintos usando el mismo reflector principal [1].

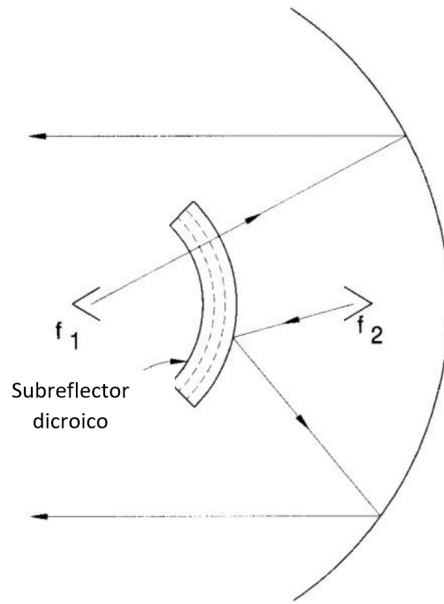


Figura 1.13: Diseño de una antena cassegrain con dos alimentadores y subreflectores dichroicos [1].

### Polarizadores

Una onda electromagnética con polarización circular en comparación con una onda con polarización lineal sufre un desvanecimiento menor ocasionado por efectos de multitrayecto, teniendo así un mayor aprovechamiento de la energía de la transmisión. Una SSF es capaz de convertir ondas linealmente polarizadas en ondas con polarización circular. Estas superficies son de gran utilidad en sistemas satelitales debido a la naturaleza del enlace Fig. 1.14.

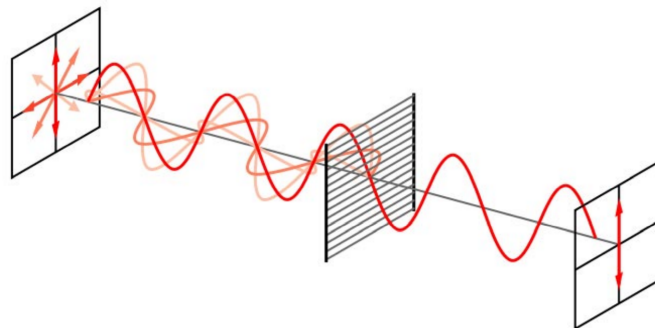


Figura 1.14: SSF polarizadora [22].

## Filtros

Un uso común de las SSF es el de filtros, debido a su capacidad de solo dejar pasar señales deseadas y desviando las que no son de interés, se pueden obtener filtros pasa-bajas Fig. 1.15a, filtros pasa-altas Fig. 1.15b, filtros pasa-banda Fig. 1.15c y filtros supresores de banda Fig. 1.15d.

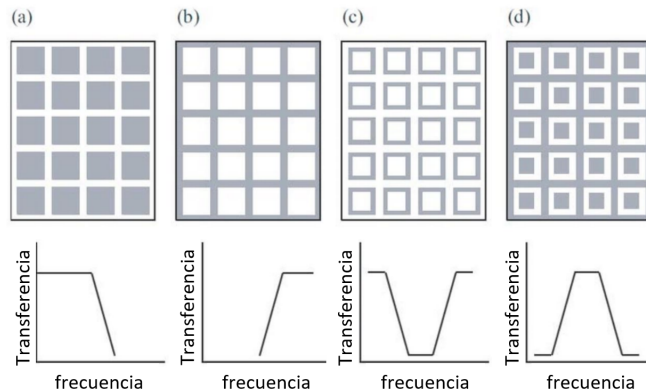


Figura 1.15: SSF usadas como filtros [16].

## Sistemas RFID

La tecnología RFID o Identificación por radio frecuencia es una técnica basada en el uso de SSF capaces de responder de forma única a un cierto estímulo de radio frecuencia pudiendo tener de esta manera un identificador único para cada superficie, este tipo de tecnología ha sido muy difundida los últimos años debido a que es muy útil en situaciones en que se requiera identificar algún producto o incluso personas dentro de un sistema sin necesidad de pedir información al usuario, basta con tan solo acercar una SSF comúnmente llamada RFID tag a los dispositivos lectores para obtener automáticamente una respuesta Fig. 1.16.

## Absorbedores

Un absorbedor electromagnético es una estructura diseñada para aumentar la absorción de ondas electromagnéticas de una porción deseada del espectro [2]. Este tipo de tecnología está siendo utilizada en sistemas de sigilo, es decir una tecnología

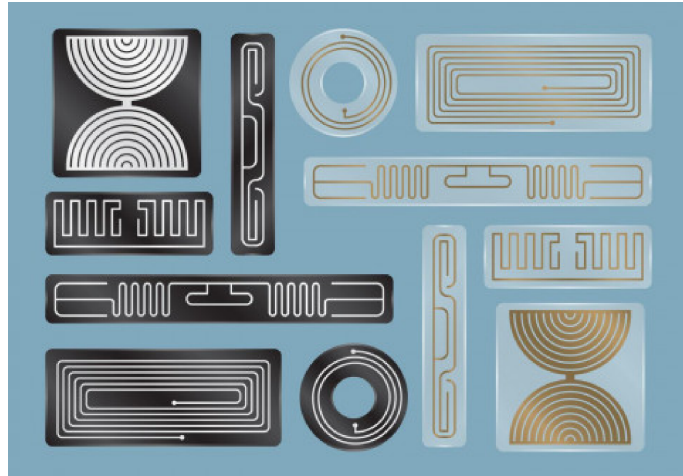


Figura 1.16: Tipos de RFID basados en SSF [23].

que su principal propósito es mantener oculto otros sistemas, por ejemplo: en aeronaves como aviones, helicópteros, drones y misiles militares, en los que se busca que no puedan ser detectados por sistemas de vigilancia como el radar y en antenas como escudos para disminuir el ruido de co-localización Fig. 1.17.

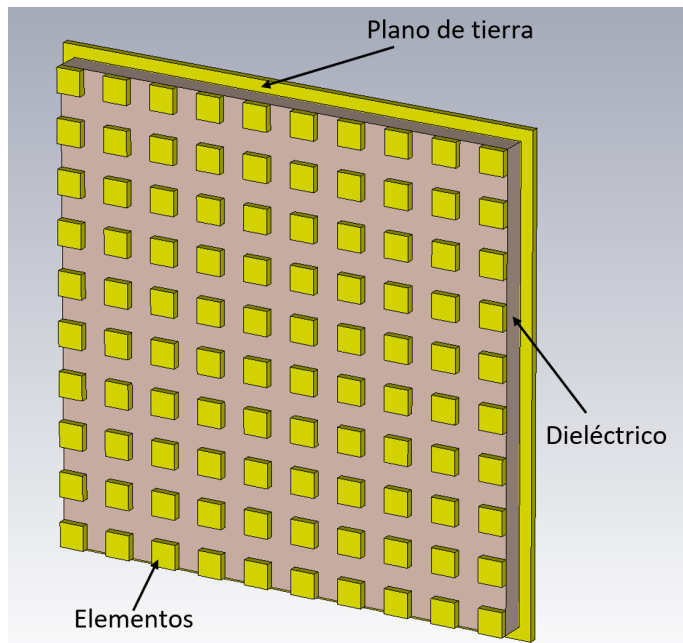


Figura 1.17: Estructura de un absorbedor electromagnético basado en una SSF.



## 1.2. Futuro de las SSF

Las SSF han sido investigadas, desarrolladas y utilizadas durante mucho tiempo, pese a ello aún existen muchos aspectos en los cuales es necesario realizar investigaciones más profundas, esto con la finalidad de ir mejorando las cualidades de las SSF y poder obtener un mayor beneficio de ellas.

### 1.2.1. Futuro

**Ancho de banda y ángulos de incidencia.** Obtener anchos de banda mayores a los obtenidos actualmente es uno de los propósitos principales en las que se requiere investigación y desarrollo, de igual modo la sensibilidad que presentan ante las variaciones de polarización y de los ángulos de incidencia de la onda electromagnética incidente, estos son los principales desafíos que actualmente se tienen.

**Optimización.** Actualmente se ha estado trabajando en la optimización de materiales y estructuras empleadas en la construcción de SSF, con el fin de poder proporcionar mayor nivel de miniaturización de las superficies y mayor insensibilidad ante los cambios de incidencia de las ondas electromagnéticas.

### 1.2.2. Aplicaciones

**Redes inalámbricas.** Las SSF han sido utilizadas en comunicaciones inalámbricas, actualmente en el caso de redes WIFI se está haciendo uso de frecuencias de  $5GHz$  y  $2.4GHz$ . En el caso de telefonía móvil suelen ser frecuencias inferiores las utilizadas, pero la tendencia actual es llevar estos servicios a un mayor rendimiento por lo que se requiere hacer uso de frecuencias mucho mayores a las utilizadas en la actualidad. Frecuentemente en la tecnología 5G se hace uso de frecuencias superiores a los  $24GHz$ . En el cuadro 1.1 se muestra de manera resumida las aplicaciones más comunes en las que se emplean SSF.

Aplicaciones Comunes	
Diseños integrados de antenas	Materiales para aplicaciones de comunicación satelital
Protecciones anti PEM	Comunicaciones Satelitales
Aplicaciones de comunicaciones inalámbricas	Protección contra radiación en hospitales

Cuadro 1.1: Principales aplicaciones en donde se emplean SSF.

### 1.3. Absorbedores electromagnéticos

La absorción, la reflexión y la transmisión son tres propiedades fundamentales de la materia, de esta forma la manera en que las ondas electromagnéticas interactúan con un objeto depende de la frecuencia de la onda y de la naturaleza del objeto. Las FSS muestran una buena reflexión en un rango específico de frecuencias, mientras que los absorbedores electromagnéticos están diseñados para reducir esta reflexión e incrementar la absorción de la onda electromagnética en una porción específica y deseada dentro del espectro electromagnético. Los primeros trabajos reportados sobre absorbedores electromagnéticos están reportados en Alemania durante la II Guerra Mundial, en los cuales se pretendía crear camuflajes antirradar junto con la de reducir interferencia por reflexiones de objetos cercanos a los radares. Al mismo tiempo en Estados Unidos se empiezan a desarrollar dentro del proyecto HARP (halpern-antiradar-paint) láminas de goma y hierro con un comportamiento de absorción los cuales fueron empleadas en paredes de instalaciones, dando paso al desarrollo de la cámara anecoica.

#### 1.3.1. Absorbedores electromagnéticos basados en SSF

Esta aplicación de las SSF actualmente es mayormente empleada en áreas en donde se requiere cierta reserva, como el caso de aviones o misiles militares donde se requiere una absorción altamente eficiente para evitar ser detectados por los radares. Hoy en día los absorbedores fabricados con elementos resistivos metálicos y sustratos dieléctricos son la mejor opción para el diseño de absorbedores, el diseño y su fabricación son relativamente fáciles y las superficies pueden tener un grosor mucho

menor que  $1/4$  de longitud de onda de la frecuencia de resonancia. Generalmente se diseñan SSF con elementos y celdas unitarias con  $90^\circ$  de simetría rotacional para lograr que los elementos resonantes resuenen en polarizaciones diferentes [3].

## 1.4. Estado del arte de los absorbedores electromagnéticos basados en SSF

### 1.4.1. Configuraciones

A continuación, se verán las configuraciones típicas de absorbedores, así como los diseños más recientes usando SSF.

**Superficies Dallenbach.** Estas superficies hacen uso de un sustrato con pérdidas dispuesto en un plano de tierra trasero, los absorbedores comerciales más populares hacen uso de este tipo de diseño, debido a su robustez mecánica [3]. Están fabricados usualmente con goma, resina o silicona cargados con materiales magnéticos y su fabricación suele ser costosa. Estos absorbedores presentan un ancho de banda grande, pero suelen ser de un grosor y peso considerable.

**Superficies Salisbury.** Esta superficie consiste en una capa resistiva dispuesta sobre un plano de tierra el cual debe situarse a  $1/4$  de onda de la superficie resistiva, lo que hace que la superficie no tenga un ancho de banda diferente a la configuración de resonancia a la cual fue diseñada.

**Superficies Jaumann.** Este tipo de superficie es una variación del diseño Salisbury, solo que en este caso presentan diferentes capas resistivas situadas a diferentes distancias del plano de tierra, dando como resultado distintas resonancias y ancho de banda de absorción. El grosor de estas superficies tiende a crecer con cada hoja resistiva añadida al diseño.

**Superficies basadas en SSF.** Actualmente los absorbedores basados en SSF que basan su fabricación en configuraciones de capas metálicas y un sustrato dieléctrico son la principal elección al momento de diseñar una superficie absorbente. Se hace uso de elementos simples y de fácil fabricación ya que sus componentes pueden ser geometrías simples que pueden ser arregladas de forma periódica en una superficie de mayor tamaño, estas geometrías pueden ser de tipo parche o apertura [3].

Como se ha mencionado las configuraciones de las estructuras actualmente utilizadas tiene un grosor mucho menor que un  $1/4$  de longitud de onda de la frecuencia de resonancia lo que ha permitido crear superficies altamente absorbentes y al mismo tiempo muy delgadas. Muchas de estas superficies han sido diseñadas para trabajar de manera conjunta con elementos como resistores o diodos PIN, lo que convierte las superficies en diseños reconfigurables ampliando de gran manera su rango de operación, pero teniendo un mayor costo de fabricación [3].

Actualmente los diseños de absorbedores basados en SSF superan en sus resultados experimentales el 95 % de absorción en las ondas incidentes como es el caso de: [18] en el cual se puede observar que presenta más de una frecuencia de resonancia en las que muestra absorción, incluso estas dos frecuencias pueden estar tan cercanas sin perder sus propiedades absorbentes dando como resultado un ancho de banda mucho mayor en comparación con una sola frecuencia de resonancia.

En el cuadro 1.2 podemos apreciar las diferencias entre las distintas técnicas utilizadas en el diseño de absorbedores. En el cuadro 1.3 están presentes algunos resultados de absorción de diferentes trabajos sobre superficies absorbedoras basadas en SSF.

Tipo de superficie	Grosor	Costo de fabricación	Peso	Bandas de frecuencia	reconfigurable
Dalénbach	Relativamente delgado	Costoso	Grande (mayor a 1Kg)	1	No
Salisbury	Grande =1/4 de longitud de onda	Costoso	Medio	1	No
Jauman	Muy Grande	Costoso	Medio	Mayor a 1	No
Basadas en SSF	Muy delgado	Muy bajo	Pequeño	Mayor a 1	Sí

Cuadro 1.2: Cuadro comparativo entre técnicas utilizadas.

Ref.	Geometría	Bandas de frecuencia	Absorción (%)	Elementos añadidos	Reconfigurabilidad
[18]	Rectangular/estrella	1	~95	No	No
[13]	Cuadrado	1	~98	Resistores	No
[14]	Parche Circular	1	~98	No	No
[15]	Hexágono/círculos	2*	99, 99.2	No	No
[16]	Cuadrado*	2	50	Resistores	Sí
[19]	Decágono	3	96, 93.3, 91.8	No	No

Cuadro 1.3: Cuadro comparativo entre diferentes absorbedores basados en SSF.

**Conclusión.** Podemos concluir que las superficies selectivas de frecuencia tienen un fuerte impacto en la actualidad debido a sus amplios usos y aplicaciones de las que son capaces. Específicamente las SSF absorbentes tienen un estándar de absorción por encima del 90% de absorción de la onda incidente, de igual manera se puede observar que la estructura, el costo y la simplicidad de fabricación son factores muy importantes que considerar en el momento de diseñar una SSF absorbente. En el siguiente capítulo se tratará con más profundidad los aspectos teóricos a considerar en el diseño de una SSF absorbedora, los cuales nos serán sumamente útiles para lograr resultados satisfactorios tanto en valores de absorción como en la simpleza de la superficie al momento de ser fabricada.

# Capítulo 2

## Principio de operación

### 2.1. Introducción

En este capítulo se abordará la teoría detrás de una superficie selectiva de frecuencia con características absorbentes, estas son SSF fabricadas a partir de elementos con pérdidas, esta combinación resulta en absorbedores con una superficie plana y relativamente delgada en términos de longitud de onda. Estas superficies son conocidas en la literatura como superficies absorbedoras de circuito analógico. Son una evolución de pantallas que cuentan solamente con láminas resistivas y sin elementos periódicos (Salisbury y Jaumann). Más adelante se abordará el análisis de los absorbedores electromagnéticos basados en SSF por medio de la teoría de líneas de transmisión de una manera eficaz.

#### 2.1.1. Acoplamiento de impedancias

Dentro del diseño de circuitos de RF, el concepto de acoplamiento de impedancias es importante para obtener la máxima transferencia de potencia entre la fuente y la carga, esta máxima transferencia se obtiene cuando la resistencia de la carga es igual a la resistencia de la fuente, en el caso de corriente alterna esta máxima transferencia de potencia se da cuando la impedancia de carga es igual al complejo conjugado de la impedancia de la fuente.

## Parámetros de dispersión $S$

Los parámetros de dispersión describen los coeficientes de reflexión y transmisión de una onda incidente en una red de dos puertos, con estos parámetros se puede describir el comportamiento de un dispositivo en un rango de frecuencia determinado. Las afectaciones en una línea de transmisión que reciben las corrientes y las tensiones al entrar en ella se les conoce como dispersión. Es decir, la respuesta de una onda electromagnética a una impedancia diferente a la de la línea de transmisión.

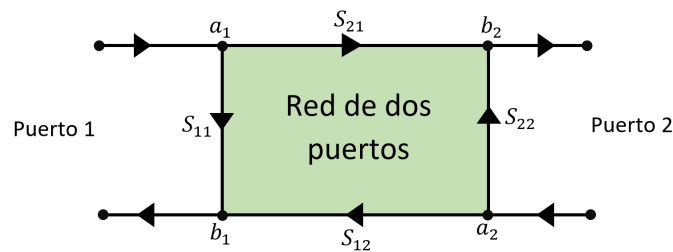


Figura 2.1: Parámetros  $S$  de una red de dos puertos.

De acuerdo con la figura 2.1:

- $a_1, a_2$  Son las ondas incidentes.
- $b_1, b_2$  Son las ondas reflejadas.
- $S_{11}$  Es el coeficiente de reflexión a la entrada ( $\Gamma$ ).
- $S_{21}$  Es el coeficiente de transmisión directa ( $T$ ).
- $S_{22}$  Es el coeficiente de reflexión a la salida.
- $S_{12}$  Es el coeficiente de transmisión inversa.

Se hace uso de los parámetros de dispersión para el análisis de superficies selectivas de frecuencia ya que estos parámetros de dispersión se asocian directamente con la amplitud de la onda a la entrada y a la salida en una red, estos parámetros se pueden medir en una red de dos puertos de dos formas distintas:

## Medición en modo directo

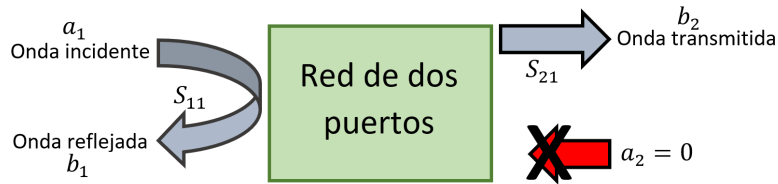


Figura 2.2: Modo de medición directo.

De la Fig. 2.2 podemos deducir que el coeficiente de reflexión a la entrada se puede calcular de la siguiente manera:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (2.1)$$

De igual forma para calcular el coeficiente de transmisión directo:

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (2.2)$$

## Medición en modo inverso

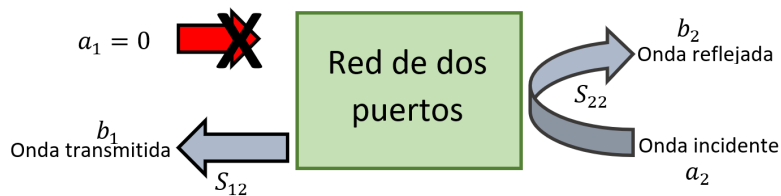


Figura 2.3: Modo de medición inverso.

De la Fig. 2.3 podemos deducir que el coeficiente de reflexión a la salida se puede calcular de la siguiente manera:

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (2.3)$$

De igual forma para calcular el coeficiente de transmisión inverso:

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (2.4)$$



### 2.1.2. Redes de un solo puerto

Para el caso de Superficies selectivas de frecuencia absorbedoras generalmente se hace uso de una placa metálica trasera como se puede observar en la Fig. 1.17. La presencia de esta placa metálica ocasiona que la transmisión directa de la onda sea nula, es decir:  $S_{21} = 0$  Por lo que para el caso de las superficies selectivas de frecuencia absorbedoras con esta característica las podemos analizar de una forma más sencilla por medio de una red de un solo puerto como se muestra en la Fig. 2.4.

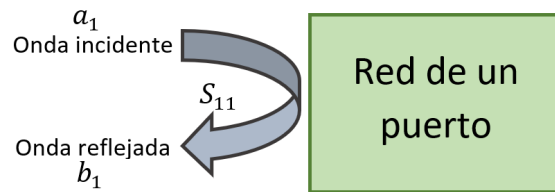


Figura 2.4: Parámetros de una red de un solo puerto.

Para las redes de un solo puerto los parámetros de dispersión solo están referidos al coeficiente de reflexión  $S_{11}$  por lo que de la ecuación 3.6 podemos simplificar de la siguiente manera:

$$\Gamma = S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad (2.5)$$

En el momento en que una onda electromagnética plana incide en una superficie selectiva de frecuencia, la potencia reflejada está determinada por el desacoplamiento entre el espacio libre y la impedancia de la superficie [3]. El diseño de los absorbedores generalmente está basado en el concepto de acoplamiento de impedancias, cuando la impedancia de la superficie coincide con la impedancia del espacio libre las ondas electromagnéticas incidentes no encuentran discontinuidad, teniendo así una reflexión muy baja. En el caso de absorbedores que cuentan con una pantalla metálica trasera se impide que la energía pueda presentar transmisión y esta energía es disipada en la superficie.

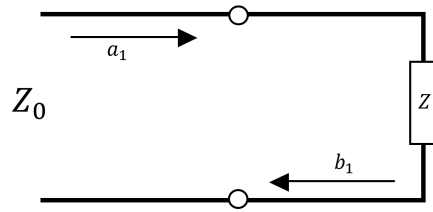


Figura 2.5: Circuito equivalente de una red de un puerto.

Tomando como referencia la Fig. 2.5 que es el circuito equivalente de una red de un puerto el cual está referido en términos de  $Z$  podemos calcular  $\Gamma$  de la siguiente forma:

$$\Gamma = \frac{b_1}{a_1} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (2.6)$$

En donde  $Z_0$  es la impedancia del espacio libre y  $Z$  es la impedancia de la red. Podemos concluir que;

Sí:

$$b = 0 \Rightarrow |\Gamma| = 0 \quad (2.7)$$

Entonces:

$$Z = Z_0 \quad (2.8)$$

No existe reflexión de la onda incidente.

De forma contraria sí:

$$b = a \Rightarrow |\Gamma| = 1 \quad (2.9)$$

Entonces:

$$Z = 0 \quad (2.10)$$

La reflexión de la onda incidente es total.

### 2.1.3. Flujo de Potencia

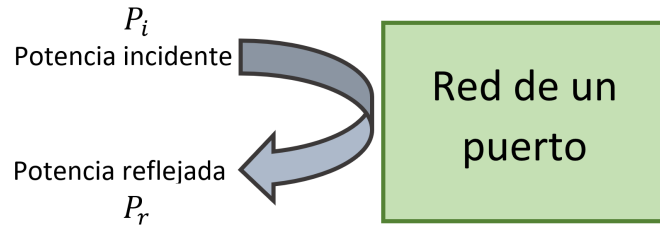


Figura 2.6: Flujo de potencia en una red de un puerto.

Otra manera de analizar el desacople de una red de un puerto es por medio del flujo de potencia. El flujo de potencia radica en la combinación entre línea-carga de tal forma que en el caso de no existir reflexión resulta que la carga recibe la totalidad de la potencia, para que esto suceda se necesita que el coeficiente de reflexión sea igual a 0 es decir  $\Gamma = 0$ , esto significa que la impedancia de la carga y la impedancia de la línea sean exactamente iguales, esto es lo que se conoce como acoplamiento de impedancias de acuerdo con la ecuación 2.11 mostrada en [71] las potencias se describen de la siguiente manera;

Potencia incidente:

$$P_i = \frac{1}{2} Re \left\{ \frac{V_0 V_0^*}{|Z_0|} e^{-2\alpha L} e^{j\theta} \right\} = \frac{1}{2} \frac{|V_0|^2}{|Z_0|} e^{-2\alpha L} \cos\theta \quad (2.11)$$

En dónde  $e^{-2\alpha L}$  es la atenuación de la potencia y  $e^{j\theta}$  refleja la naturaleza compleja de la onda mostrado en [71].

La potencia reflejada se encuentra sustituyendo el voltaje de la onda reflejada en 2.11 donde este último se obtiene multiplicando el voltaje incidente por  $\Gamma$ , como se muestra en la ecuación 2.12:

$$P_r = \frac{1}{2} Re \left\{ \frac{(\Gamma V_0)(\Gamma^* V_0^*)}{|Z_0|} e^{-2\alpha L} e^{j\theta} \right\} = \frac{1}{2} \frac{|V_0|^2 |\Gamma|^2}{|Z_0|} e^{-2\alpha L} \cos\theta \quad (2.12)$$

La fracción de la potencia reflejada en la carga está determinada por el cociente mostrado en la ecuación 2.13:

$$\frac{P_r}{P_i} = \Gamma \Gamma^* = |\Gamma|^2 \quad (2.13)$$

Por consiguiente la fracción de potencia incidente que se transmite a la carga o que puede ser disipada se muestra en la ecuación 2.14:

$$P_d = \frac{P_r}{P_i} = 1 - |\Gamma|^2 \quad (2.14)$$

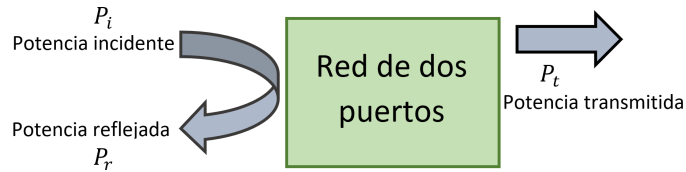


Figura 2.7: Flujo de potencia en una red de dos puertos.

En una red de dos puertos como se muestra en la Fig. 2.7 está presente una potencia transmitida, este es el coeficiente de transmisión en sentido directo, el cual está determinado por la ecuación 2.15:

$$|T|^2 = \frac{P_t}{P_i} \quad (2.15)$$

En situaciones en la que dos líneas de transmisión conectadas tengan diferentes impedancias característica se presentan reflexiones en la unión, la segunda línea es tratada como la carga, es decir si  $L1 = Z_1$  y  $L2 = Z_2$  se obtiene la ecuación 2.16 y la porción de potencia que se propaga a la siguiente línea es  $1 - |\Gamma|^2$  [71].

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.16)$$

## 2.2. Configuraciones de una SSF Absorbedora

Una superficie selectiva de frecuencia con características absorbentes consiste en una capa resistiva en la parte delantera y generalmente se hace uso de un plano de tierra metálico en la parte trasera, por lo tanto, la impedancia de entrada está determinada por la resistencia superficial de la capa resistiva frontal y el plano de tierra trasero.

En el caso de que no se haga uso de un material dieléctrico entre estas dos superficies debe existir una distancia igual a  $1/4$  de longitud de onda de la frecuencia de operación (en la que presenta resonancia) de la superficie. Por consiguiente, una SSF al ser una configuración resonante el ancho de banda se ve limitado por valores cercanos ambos lados de la frecuencia de resonancia.

La impedancia de entrada del absorbedor está definida desde el punto de vista de línea de transmisión por una conexión en paralelo entre la impedancia de la SSF y el plano de tierra.

En el caso de una SSF periódica la impedancia es compleja y no es puramente real, esta característica es sumamente importante ya que nos permite tener resonancias adicionales.

A continuación, se mostrarán las configuraciones de SSF más comunes junto con una breve descripción de su estructura, de su circuito equivalente y las características absorbentes que presentan.

## 2.3. Pantalla Salisbury

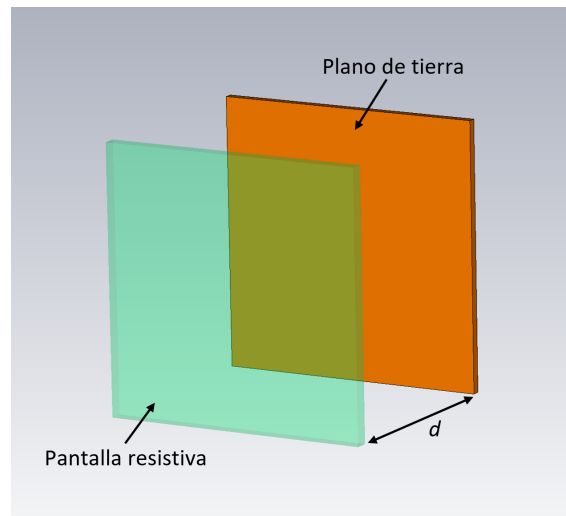


Figura 2.8: Pantalla Salisbury.

La Fig. 2.8 representa la estructura típica de una pantalla Salisbury la cual está formada por una pantalla resistiva frente a un plano de tierra con una separación  $d$  esta separación es igual a un cuarto de longitud de onda de la frecuencia de resonancia. El funcionamiento de esta pantalla se puede entender fácilmente por medio del circuito equivalente de la Fig. 2.9 la distancia  $d$  equivale a  $\lambda/4$  de la frecuencia de resonancia, por lo que al ser una configuración resonante el ancho de banda está limitado alrededor de la frecuencia de resonancia. La impedancia de entrada está determinada por la resistencia superficial de la superficie. La impedancia de entrada del absorbedor está dada por la conexión en paralelo entre la impedancia de entrada del sustrato conectado a tierra y la impedancia resistiva de la hoja frontal [3].

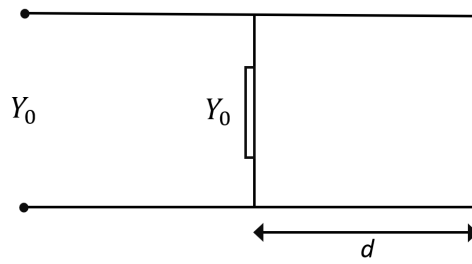


Figura 2.9: Circuito equivalente de la pantalla Salisbury.

## 2.4. Pantalla Jaumann

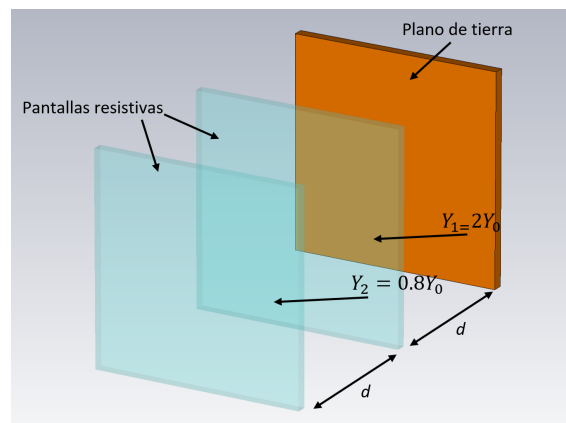


Figura 2.10: Pantalla Jaumann.

Es posible observar a la pantalla Jaumann como una pantalla Salisbury extendida ya que tiene dos o más pantallas resistivas espaciadas entre sí a una distancia de  $\lambda/4$  de la frecuencia de resonancia a la que fue diseñada. Una característica de esta pantalla es que la resistencia en sus láminas debe aumentar gradualmente conforme se acerca al plano de tierra, de esta manera la onda incidente penetra gradualmente dentro de la estructura encontrando de esta manera una reflexión baja en las capas exteriores. Esta configuración presenta un ancho de banda mayor y este aumento es proporcional al número de capas, pero este ancho de banda tiene el inconveniente de que a mayor número de capas mayor es el grosor de la estructura.

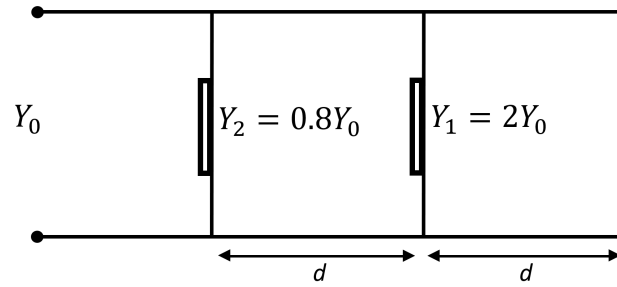
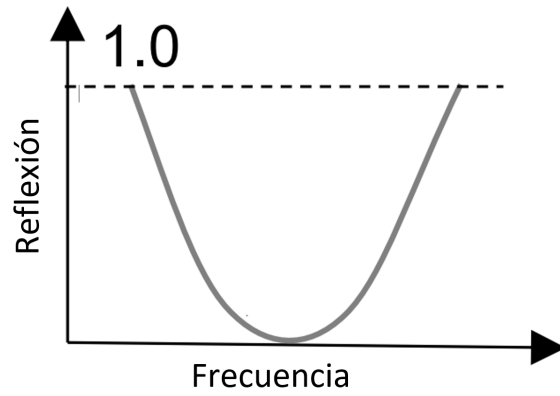


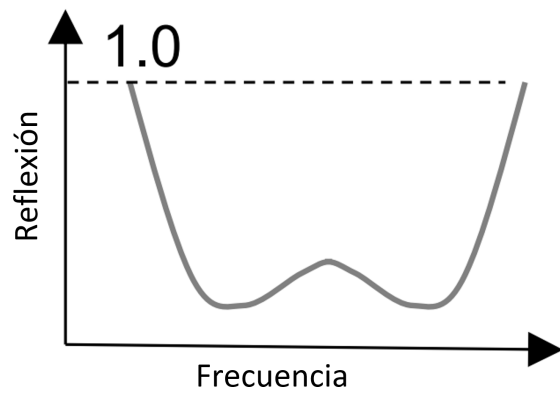
Figura 2.11: Circuito equivalente de la pantalla Jaumann.

En la Fig. 2.12 es posible observar las diferencias de la respuesta entre la pantalla Salisbury y la pantalla Jaumann, por un lado, tenemos que el ancho de banda en la pantalla Salisbury 2.12a es menor en comparación con el ancho de banda que presenta la pantalla Jaumann 2.12b. Podemos notar que la reflexión es mayor para la pantalla Jaumann. Esto tiene como consecuencia una menor absorción, pero un ancho de banda mayor.





(a) Respuesta de la pantalla Salisbury.



(b) Respuesta de la pantalla Jaumann.

Figura 2.12: Detalle de elemento unitario y una superficie Jaumann.

## 2.5. Absorbedores de circuito analógico

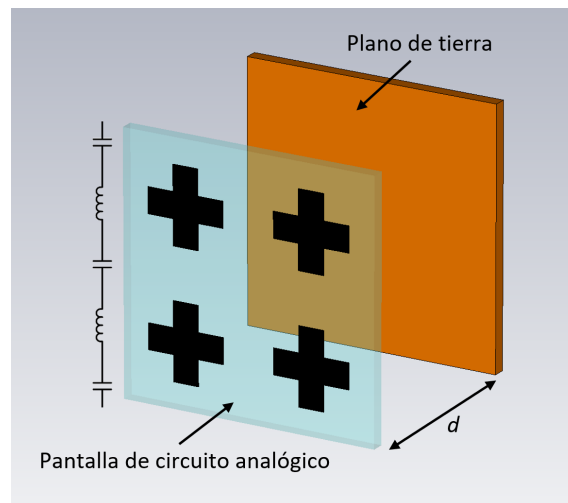


Figura 2.13: Absorbedor de CA basado en una superficie periódica.

La principal característica de las pantallas Salisbury y Jaumann es que en ambas se utilizan pantallas puramente resistivas al frente del plano de tierra.

El concepto de absorbedor de circuito analógico se basa en que están diseñados de pantallas que no son solamente resistivas sino que son pantallas reactivas, esto se logra por medio del uso de superficies periódicas fabricadas con materiales que presenten pérdidas, como consecuencia del uso de este tipo de configuración obtenemos un circuito equivalente RLC, en el que el componente resistivo está asociado al material con pérdidas utilizado en la fabricación, el componente inductivo está asociado a las partes rectas de los elementos y el componente capacitivo está asociado al espaciado entre los elementos 2.14.

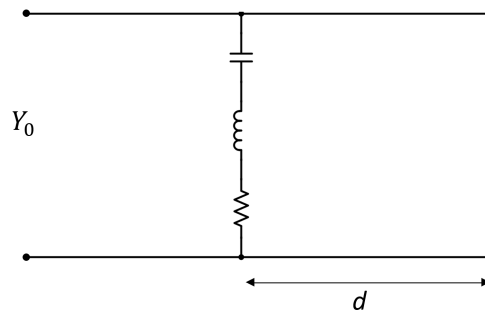


Figura 2.14: Circuito equivalente de absorbedor de CA.

La siguiente gráfica muestra la respuesta de esta pantalla, se puede observar que este tipo de pantalla presenta un ancho de banda similar al que presenta una pantalla Jaumann pero con un nivel de reflexión menor.

## 2.6. Absorbedores basados en SSF

Como se ha podido observar hasta ahora, la ventaja que presenta una superficie selectiva de frecuencia periódica con respecto a una superficie resistiva simple es que la impedancia de una SSF periódica es compleja en comparación con la impedancia puramente real que presentan las superficies resistivas simples como la pantalla Salisbury y la pantalla Jaumann. Esta característica puede usarse para generar comportamientos resonantes adicionales [3]. En ambos casos se observa que se requiere

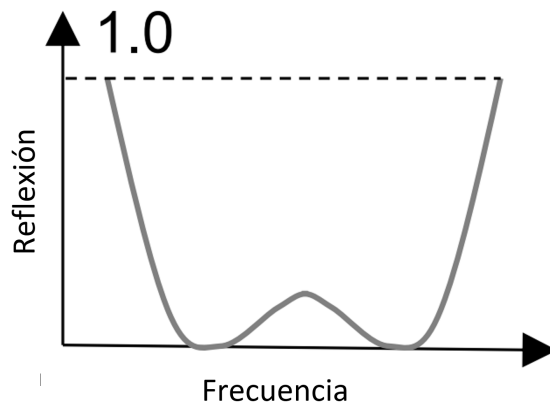


Figura 2.15: Respuesta del absorbedor de CA.

tener un distanciamiento igual a  $1/4$  de la longitud de onda entre la pantalla y el plano de tierra para que se presenten propiedades absorbentes, y no existe otro elemento o estructura entre estos dos elementos, esto causa que la superficie tenga un grosor considerable y una robustez mecánica baja haciéndolas inviables en ciertas aplicaciones. Actualmente existe una técnica de fabricación que resuelve estos problemas, es la utilización de un material dieléctrico entre estos elementos.

### 2.6.1. Superficies de impedancia artificial (AIS)

Una superficie de impedancia artificial está comprendida por una superficie selectiva de frecuencia con elementos periódicos sobre un dieléctrico de baja pérdida puesto a tierra. Gracias al uso de un material dieléctrico la estructura tiene un grosor mucho menor a  $1/4$  de longitud de onda de la frecuencia para la cual está diseñado y al mismo tiempo agregando robustez mecánica a la estructura. Una superficie de impedancia artificial puede verse como un circuito RLC paralelo. En la resonancia fundamental, el valor de la impedancia capacitiva de la SSF coincide con el valor de la impedancia inductiva del sustrato puesto a tierra, pero con signo opuesto Fig. 2.16.

La Fig. 2.17 muestra el circuito equivalente de una superficie de impedancia artificial, en él se puede observar el uso de un dieléctrico conectado a tierra junto con la sección RLC que representa la SSF periódica.

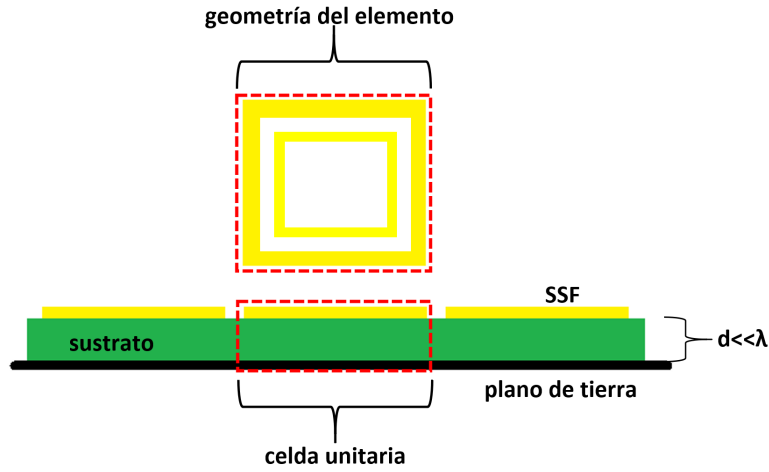


Figura 2.16: Estructura de una superficie AIS.

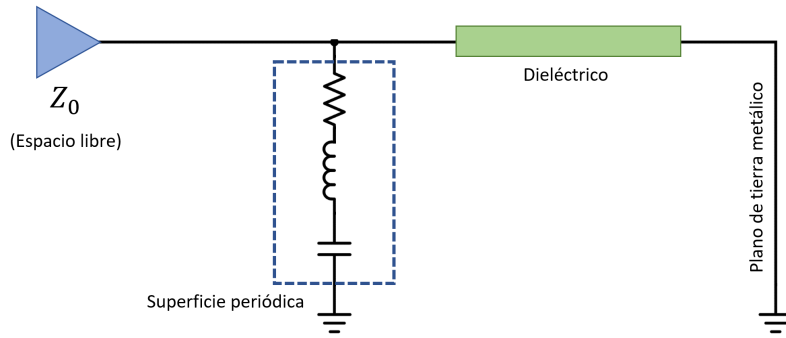


Figura 2.17: Circuito equivalente de una superficie de impedancia artificial.

La absorción en una superficie de impedancia artificial se logra si el sustrato y/o la SSF se ajusta con la cantidad adecuada de pérdidas y un espesor adecuado, la parte real de la impedancia de entrada debe coincidir con la impedancia del espacio libre en la frecuencia de resonancia. La impedancia de entrada de una AIS con pérdidas en la resonancia fundamental puede ser calculada de una forma cerrada, la parte imaginaria de  $Z_{in_{ABS}}$  es 0 y la parte real se muestra en 2.17 [3].

$$Re \{ Z_{in} \} \approx \frac{(Im\{Z_d\})^2}{(Re\{Z_d\} + R_O + R_D)} \quad (2.17)$$

Donde  $R_O$  y  $R_D$  son las pérdidas óhmicas y dieléctricas respectivamente de la superficie selectiva de frecuencia y  $Z_d$  es la impedancia de entrada del sustrato de

bajas pérdidas conectado a tierra. La ecuación 2.17 contiene todas las variables que se pueden sintonizar en una AIS con resonancia única la cual está en función de la reactancia contemplada dentro de  $R_D$ , el espesor del sustrato contemplado dentro de  $Z_d$  y la parte real e imaginaria de la permitividad eléctrica contemplada dentro de  $R_D$  y  $Z_d$  respectivamente [3].

Dependiendo del tipo de pérdidas presentes se puede clasificar las siguientes configuraciones [3]:

- $R_D \gg R_O$  Las pérdidas óhmicas son despreciables respecto a las pérdidas dieléctricas. Son SSF metálicas impresas sobre un dieléctrico de baja pérdida extremadamente delgado. Estos son conocidos como metamateriales perfectos debido a su peculiaridad de absorber ondas electromagnéticas incidentes desde todos los ángulos en un ancho de banda muy pequeño.
- $R_D \approx R_O$  Las pérdidas óhmicas y las dieléctricas contribuyen a la absorción en resonancia y la estructura es típicamente de banda estrecha.
- $R_O \gg R_D$  Predominan las pérdidas óhmicas y es normal en los absorbedores fabricados con materiales resistivos. La estructura puede ser de banda ancha o ultra ancha.

### 2.6.2. Segunda resonancia

Como se ha observado la absorción se presenta en el momento en que la impedancia inductiva del sustrato puesto a tierra y la impedancia capacitiva de la SSF tiene el mismo valor, pero con signo opuesto y la inclusión de una cantidad de pérdidas adecuada en la estructura. La segunda resonancia se puede obtener si la impedancia capacitiva del sustrato puesto a tierra sea igual a la impedancia inductiva de la SSF.

En el centro de la banda operativa la impedancia de entrada del sustrato tiende a infinito; la impedancia de la SSF puede diseñarse para que sea puramente real con parte imaginaria igual a 0 [3]. En la Fig. 2.18 se encuentra representada la

impedancia de la SSF ( $Z_{SSF}$ ) y la impedancia del sustrato ( $Z_{sustrato}$ ) en la cual se puede observar de manera gráfica el principio de la segunda resonancia.

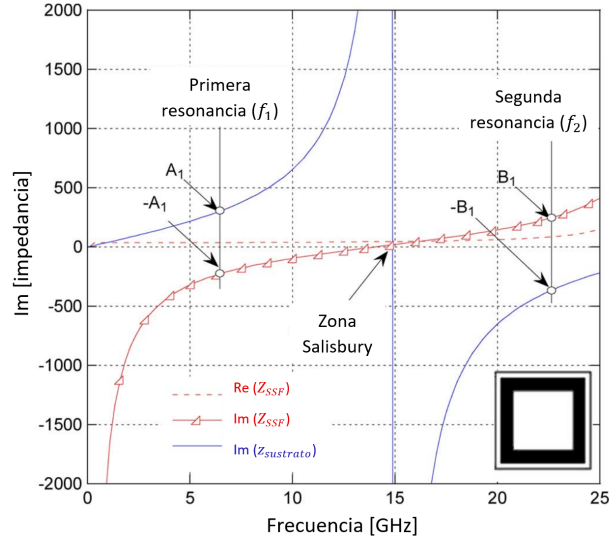


Figura 2.18: Principio de dos resonancias [28].

La Fig. 2.18 ilustra por medio de una gráfica este mecanismo de absorción, por un lado está graficado el componente imaginario del dieléctrico junto con la impedancia de la SSF contra la frecuencia en la primera frecuencia inferior. La reactancia inductiva del dieléctrico conectado a tierra es igual a la reactancia capacitiva de la SSF pero con signo opuesto, en la frecuencia media la parte imaginaria del dieléctrico conectado a tierra cambia de inductiva a capacitiva, en este punto actuara como una pantalla de alta impedancia y se le conoce como zona de Salisbury, el valor real de la impedancia del dieléctrico es muy alta y en esta misma frecuencia la parte imaginaria de la impedancia de la SSF no es cero, por lo que no se obtiene ninguna resonancia, en la frecuencia superior la reactancia capacitiva del dieléctrico es igual a la reactancia inductiva de la SSF generando una segunda resonancia [13].

### 2.6.3. Dieléctrico

Como se mencionó anteriormente el uso de un material dieléctrico en las superficies selectivas de frecuencia tiene diferentes utilidades tanto como para proporcionar

soporte estructural, así como modificar la respuesta de la superficie selectiva de frecuencia, el dieléctrico es comúnmente utilizado en el diseño de SSF para otorgar estabilidad a la frecuencia de resonancia frente a los ángulos de incidencia de la onda. Se puede presentar en dos configuraciones básicas: que una sola hoja de dieléctrico se encuentre por un solo lado del elemento metálico Fig. 2.19a, o que dos capas de dieléctrico se encuentren a ambos lados del elemento metálico Fig. 2.19b.



(a) Una sola capa de dieléctrico.



(b) Dos capas de dieléctrico.

Figura 2.19: Configuraciones básicas del dieléctrico en una SSF (Vista lateral).

Tanto la constante dieléctrica relativa  $\epsilon_r$  y el grosor del dieléctrico actúan directamente en la frecuencia de resonancia. Un mayor  $\epsilon_r$  y un mayor grosor de este dan como resultado una frecuencia de resonancia más baja, es decir si tenemos una superficie con frecuencia de resonancia  $f_0$  y la añadimos por ambos lados un dieléctrico de grosor infinito y un  $\epsilon_r$  constante, la frecuencia de resonancia resultante sería igual a:  $f = f_0/\sqrt{\epsilon_r}$  Fig. 2.20 [1]. Para el caso en el que el dieléctrico sea de un grosor:  $d$  la frecuencia de resonancia se sitúa en un valor comprendido entre  $f_0/\sqrt{\epsilon_r}$  y  $f_0$  Fig. 2.21 [1].

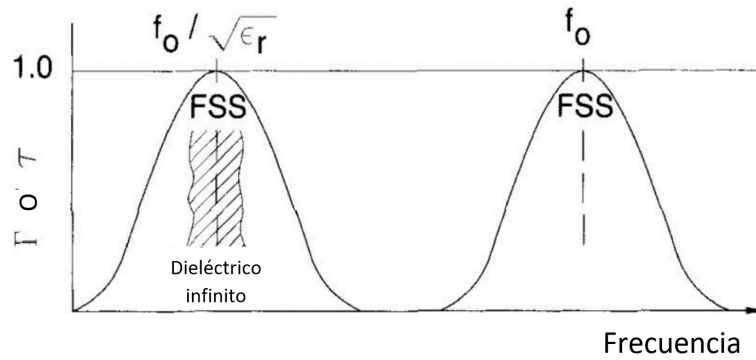


Figura 2.20: Respuesta de la frecuencia de resonancia con dieléctrico infinito [1].

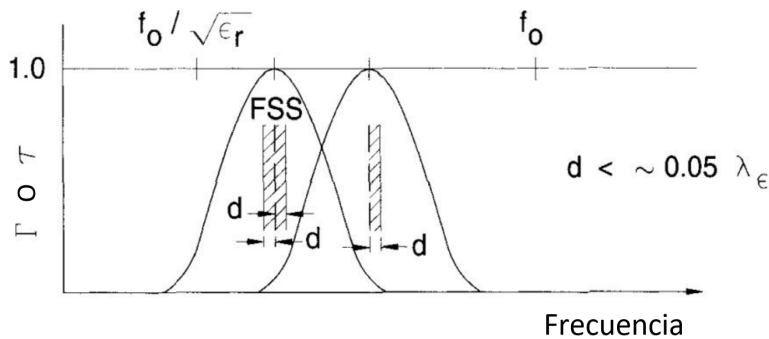


Figura 2.21: Respuesta de la frecuencia de resonancia con dieléctrico de grosor  $d$  [1].

## 2.7. Cálculo de Absorción

La absorción en una superficie selectiva de frecuencia en términos de potencia se puede calcular mediante la ecuación 2.18.

$$A = 1 - \Gamma^2 + T^2 \quad (2.18)$$

En donde  $A$  es la absorción,  $\Gamma^2$  es el coeficiente de reflexión  $T^2$  es el coeficiente de transmisión.

Una absorción  $A$  alta se obtiene al minimizar el coeficiente de reflexión  $\Gamma^2$  y minimizando el coeficiente de transmisión  $T^2$ . Estos valores bajos de  $\Gamma^2$  se obtienen cuando la condición de adaptación de impedancia se cumple. En caso de que sea utilizada una pantalla metálica trasera como plano de tierra, el coeficiente de transmisión  $T$  es igual a cero  $T = 0$  por lo tanto se puede simplificar la ecuación



prescindiendo de  $T$  y solo calcular en términos del coeficiente de reflexión, por lo que tendríamos:

$$A = 1 - \Gamma^2 \quad (2.19)$$

Traduciendo la ecuación 2.18 en términos de potencia usando los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  se tiene:

$$A = 1 - |S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 \quad (2.20)$$

Como se mencionó, para el caso en que la SSF este diseñada con una pantalla metálica trasera se simplifica como:

$$A = 1 - |S_{11}|^2 \quad (2.21)$$

Esta última expresión es de gran importancia para los cálculos posteriores, tanto en simulación como en caracterización.

### 2.7.1. Conclusiones

Como se ha visto hasta ahora utilizando la teoría de líneas de transmisión se puede analizar el funcionamiento de las superficies selectivas de frecuencia con características absorbentes, en el momento en que una onda electromagnética plana incide en la superficie la cantidad de potencia reflejada está determinada por la diferencia entre el espacio libre y la impedancia de la superficie, en el caso de que la superficie presente una pantalla trasera no existirá transmisión de la onda, esto genera que la energía sea disipada en la estructura. De igual forma se han dado hasta el momento las bases teóricas sobre el funcionamiento y la respuesta de los materiales que se utilizan en la fabricación de superficies selectivas de frecuencia absorbentes, con estos datos podemos notar cuales son los puntos clave a considerar al momento de realizar un diseño propio, cuales podrían ser en algún momento los puntos débiles en el proceso de diseño. Teniendo en cuenta estos requisitos y conociendo los alcances tanto estructurales como de las propiedades de los materiales. Con base en estos conocimientos que son de gran utilidad podemos proponer un diseño propio que cumpla con la meta fijada anteriormente.

# Capítulo 3

## Diseño de la Superficie Selectiva de Frecuencia

Con las bases teóricas vistas anteriormente tenemos una base sólida para poder proponer geometrías propias que presenten características absorbentes, principalmente se centrarán los esfuerzos en conseguir una estructura con una simpleza estructural muy buena y que al mismo tiempo tenga la mejor respuesta posible, se hará uso de materiales comercialmente disponibles, lo cual facilita la fabricación del dispositivo.

### 3.1. Diseño de la celda unitaria absorbente propuesta

Se diseñó la celda unitaria de la SSF bajo las características de las láminas de dieléctrico Rogers RO3210, estas están fabricadas con una lámina de dieléctrico con una constante dieléctrica  $\epsilon_r = 10.2$  y un grosor de  $0.63mm$ , las mismas están recubiertas por ambos lados por una capa de cobre con un grosor de  $17\mu m$ .

En el diseño de la geometría de los elementos resonantes de la SSF se optó por hacer uso de dos diferentes geometrías, una geometría de anillos circulares combinada con una geometría de cruz, esto para tener como resultado dos frecuencias de

resonancia distintas en las que se presente absorción. Uno de los puntos importantes a considerar en el diseño fue la facilidad de fabricación de estos elementos dentro de la SSF, por lo que se optó por que estos elementos fueran del tipo ranura y hacer uso de la técnica litográfica.

El diseño de esta celda unitaria contiene ambos elementos interactuando entre sí. La combinación de estos dos elementos resonantes dentro de la celda unitaria tiene como resultado dos bandas de frecuencia de resonancia distintas con características y resultados similares de absorción. Manteniendo la geometría descrita se logró proponer una estructura que presenta propiedades absorbentes con resultados favorables por encima del 90 % de absorción para ambas frecuencias de resonancia.

## 3.2. Modelado

A continuación, se muestran a detalle las geometrías utilizadas en el diseño de la celda unitaria, estas corresponden a la parte frontal de la estructura en la cual se encuentran los elementos resonantes.

**Celda unitaria.** La celda unitaria corresponde a un cuadrado perfecto con una longitud de  $2.4mm$  por lado Fig. 3.1.

**Anillos.** Dentro de la celda unitaria tenemos cuatro cuadrantes circulares con centro en cada uno de los vértices de la celda unitaria, estos corresponden a un anillo de radio medio igual a  $0.63mm$  en apertura con un grosor en ella igual a  $0.15mm$ . Este arreglo de anillos es llamado de tipo loop o lazo cerrado Fig. 3.1.

**Cruz central.** De igual manera se encuentra presente una cruz central perpendicular con un ángulo de rotación de  $45^\circ$  respecto al eje x, y con un largo de  $3.2mm$  y  $0.12mm$  de grosor, estas se encuentran contenidas dentro de la celda unitaria la cual tiene  $2.4mm$  por lado. Esta cruz corresponde a un arreglo del tipo N-Poles

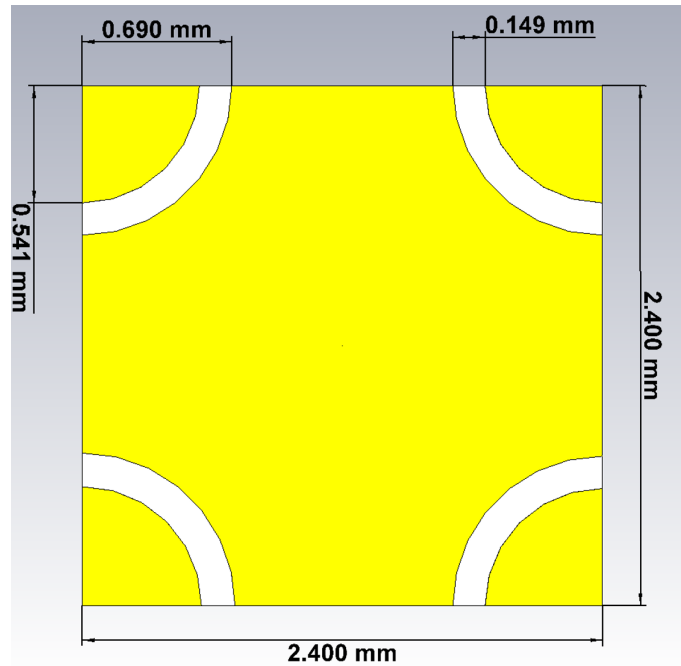


Figura 3.1: Dimensiones de la celda unitaria y de los anillos.

conectados en el centro Fig. 3.2.

**Configuración final.** La configuración final de la geometría es el resultado de la unión de las dos geometrías anteriores compartiendo el mismo espacio de la celda unitaria. La unión da como resultado una estructura en combinación de arreglos *N – Poles* y *Loop* Fig. 3.3. La unión de varios arreglos de geometrías conduce a que los resultados obtenidos individualmente para cada geometría no sean los mismos al tener la unión de dos o más geometrías ya que se genera un acoplamiento entre ellas.

En correspondencia con el material empleado en el diseño de la SSF, Rogers RO3210 la capa frontal de cobre en la cual se encuentran los elementos resonantes está adherida al dieléctrico central el cual tiene un grosor de  $640\mu m$ , de igual manera en la parte posterior de la estructura se encuentra adherida la segunda capa de cobre con igual grosor que la frontal en la Fig. 3.4 se muestra a detalle la estructura.

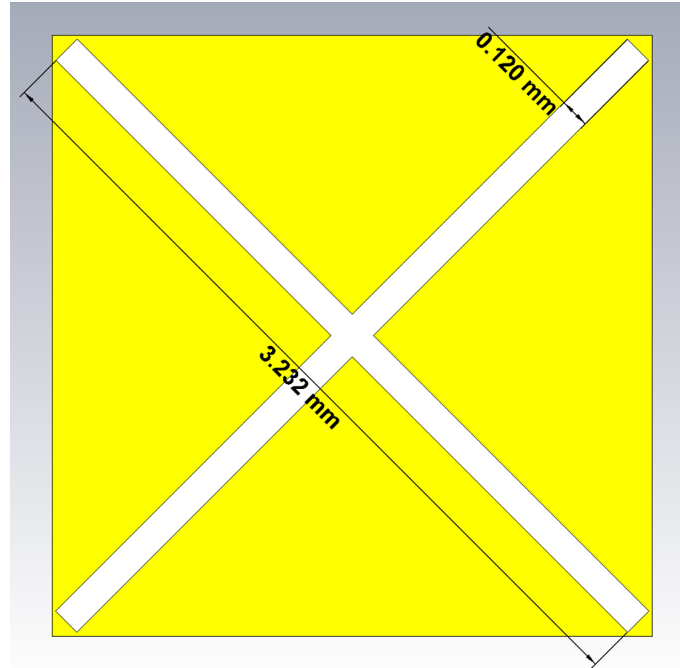


Figura 3.2: Dimensiones de la cruz central.

**Simetría de la celda unitaria.** Tener simetría en una celda unitaria proporciona el poder utilizar la superficie en diferentes ángulos de polarización, en este caso al tener simetría tanto en el eje  $x$  como en el eje  $y$  se obtienen respuestas similares para polarizaciones horizontales  $H$  y verticales  $V$ .

### 3.3. Simulación

La simulación numérica se realizó con el software especializado *CST Studio Suite*, se simuló en un rango de frecuencia entre los  $29GHz$  y  $42GHz$ . En la Fig. 3.5 se puede observar el modelado  $3D$  de la estructura hecha en CST por la parte frontal y la parte trasera, como se mencionó anteriormente es una pantalla de cobre que cubre la totalidad de la superficie.

#### Modelo 3D

La estructura fue simulada con un modelo  $3D$  con el software *CST Studio Suite*, con las dimensiones mencionadas anteriormente Fig. 3.5.

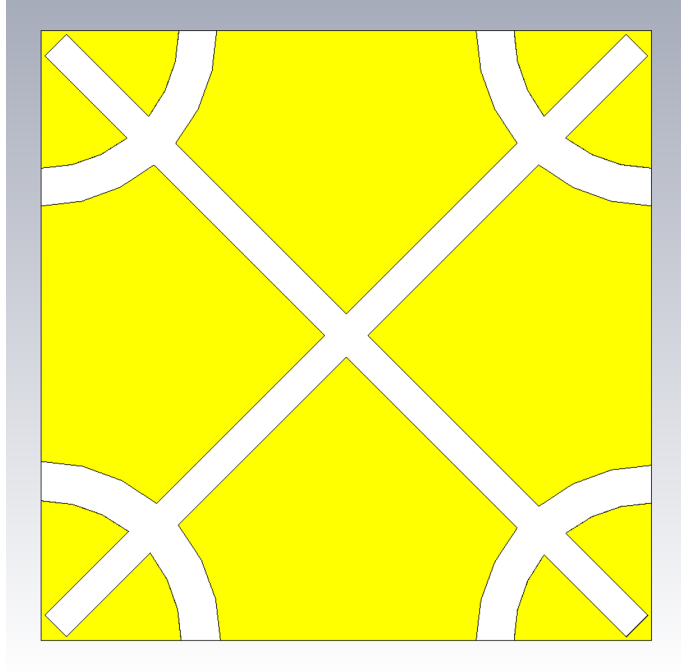


Figura 3.3: Geometría final.

### 3.3.1. Resultados numéricos

Se realizó la simulación numérica para polarización de la onda electromagnética en horizontal y vertical, esto permite hacer una comparación entre ambas polarizaciones y evaluar la efectividad de la simetría en el diseño de los elementos resonantes.

De acuerdo con la ecuación 3.1 los parámetros de interés para el cálculo de absorción  $A$  de la superficie son:  $\Gamma$  y  $T$ .

$$A = 1 - |\Gamma|^2 + |T|^2 \quad (3.1)$$

Debido a que la superficie está formada por una pantalla metálica en la parte trasera, no existe transmisión por lo que  $|T|^2 = 0$ , de esta manera reduciendo la expresión tendríamos la ecuación 3.2 la cual sería suficiente para calcular el coeficiente de absorción.

$$A = 1 - |\Gamma|^2 \quad (3.2)$$

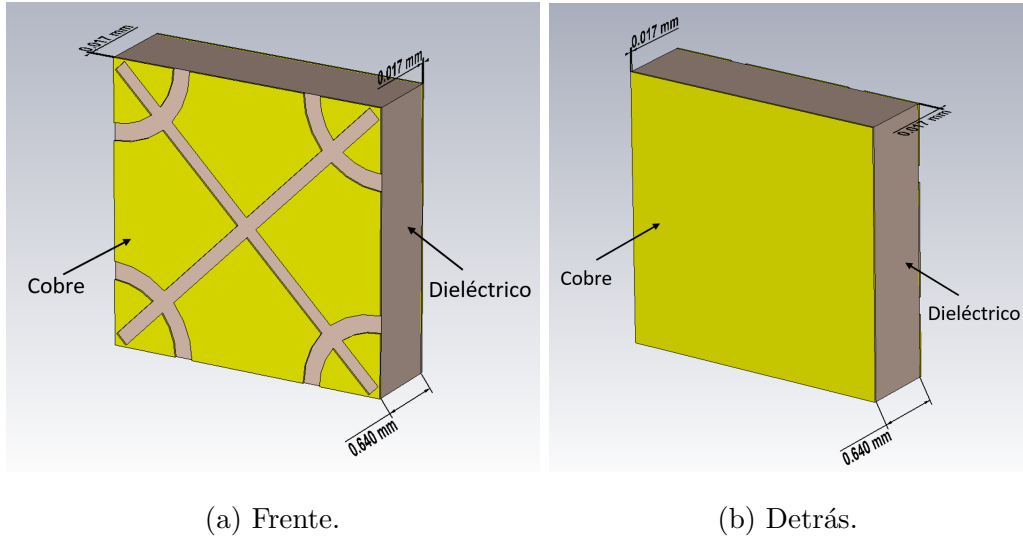


Figura 3.4: Vista frontal y trasera.

Sabiendo que  $S_{11}$  es el coeficiente de reflexión a la entrada en un sistema de bipuertos y dado que podemos analizar una SSF con teoría de líneas de transmisión, una superficie puede ser tratada como un sistema de bipuertos, de esta manera podemos traducir la ecuación 3.2 en términos de potencia como se muestra en 3.3.

$$A = 1 - |S_{11}|^2 \quad (3.3)$$

Teniendo los datos de los parámetros de dispersión para la polarización  $H$  y  $V$  resultado de la simulación numérica en *CST Studio Suite* podemos evaluar el nivel de absorción presentado por la superficie. Como vimos anteriormente, para este caso en que la superficie no presenta transmisión, sólo es suficiente con conocer los valores correspondientes a  $S_{11}$ .

A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a el parámetro  $S_{11}$  para cada una de las polarizaciones  $H$  y  $V$  respectivamente.



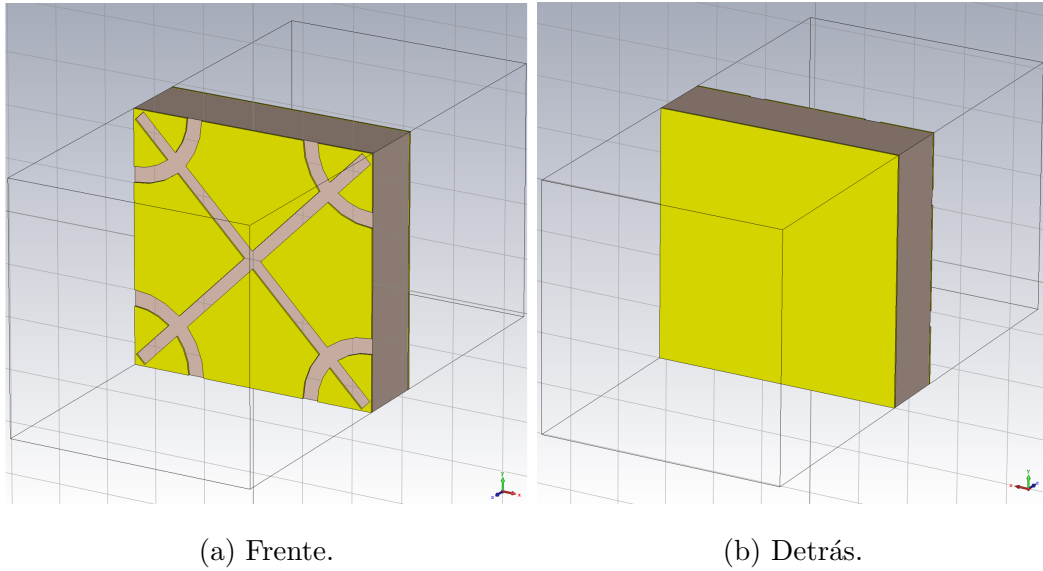


Figura 3.5: Vista frontal y trasera de la simulación 3D en *CST Studio Suite*.

### 3.3.2. Absorción

La Fig. 3.6 muestra la gráfica de  $S_{11}$  para la polarización horizontal, en ella podemos apreciar dos picos de resonancia ubicados en  $32.324GHz$  y  $37.924GHz$ . Estos picos corresponden a una reflexión muy baja de la onda incidente teniendo valores de 0.0299 y 0.0243 respectivamente, ambos inferiores a 0.1, en contraste tenemos valores cercanos a 1 para frecuencias distintas, por ejemplo:  $29GHz$ ,  $35GHz$  y  $41GHz$  en las que la reflexión es muy alta.

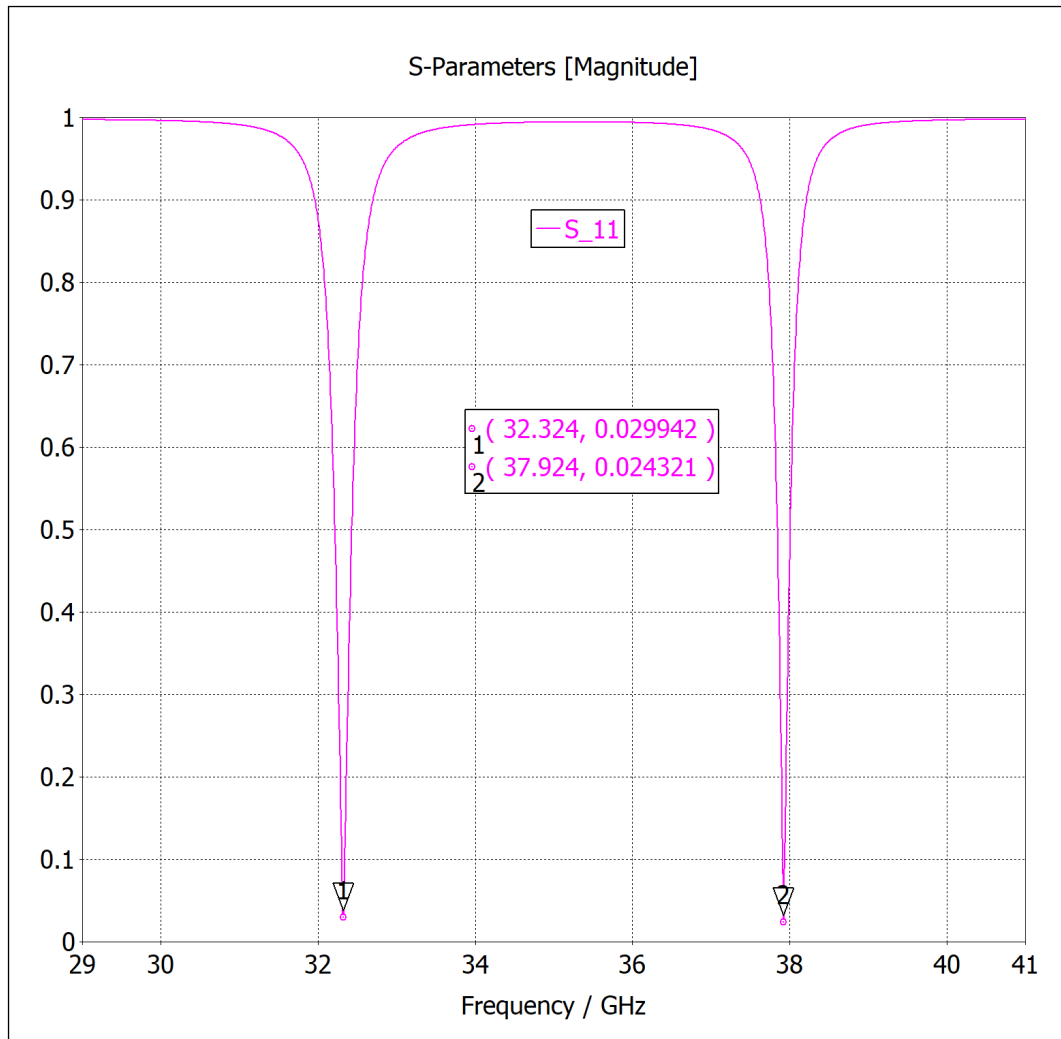


Figura 3.6:  $S_{11}$  Polarización horizontal.

En la gráfica representada en la Fig. 3.7 se observan los valores de  $S_{11}$  para la polarización vertical, se aprecian dos picos de resonancia ubicados en  $32.324GHz$  y  $37.924GHz$  con valores de 0.0288 y 0.0249 respectivamente. Podemos apreciar que los resultados son muy similares a los obtenidos en la polarización horizontal tanto en reflexión como en frecuencia, lo cual nos indica que el diseño de la estructura tiene buen desempeño en ambas polarizaciones.

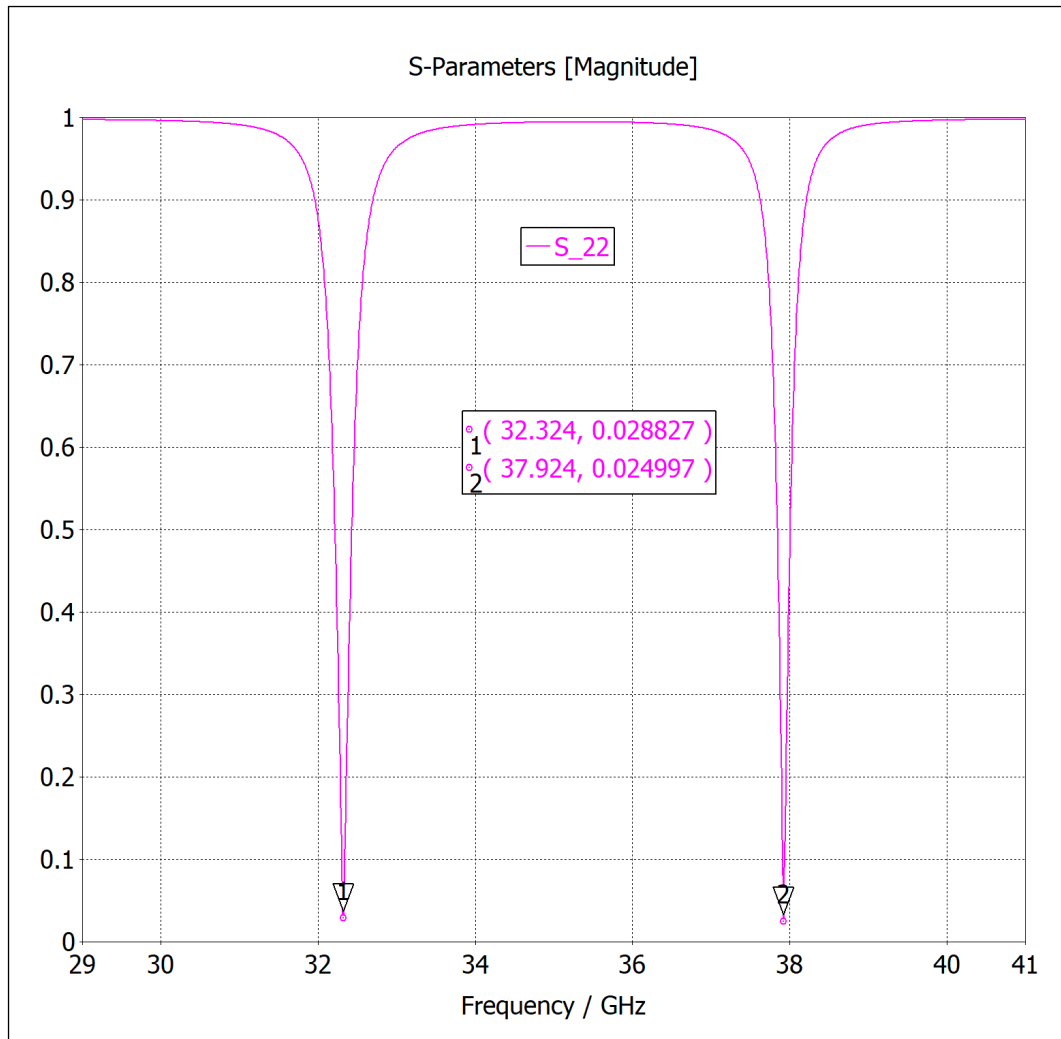


Figura 3.7:  $S_{11}$  Polarización vertical.

La Fig. 3.8 y la Fig. 3.9 muestran la absorción presentada por la SSF para polarización horizontal y vertical. Los resultados mostrados en la gráfica son la evaluación de la fórmula 3.4 en esta se añade una multiplicación por 100 esto para obtener resultados en el orden del 0% al 100%. En la gráfica se puede apreciar la presencia de dos picos en donde la SSF presenta absorción, la presencia de estos picos se encuentra en ambas polarizaciones con prácticamente igual frecuencia y prácticamente igual valor de absorción, para ambos casos el porcentaje de absorción es: 99.91% en 32.324GHz y 99.93% en 37.924GHz para polarización horizontal y 99.91% en 32.324GHz y 99.94% en 37.924GHz para polarización vertical.

$$(A = 1 - |\Gamma|^2) * 100 \quad (3.4)$$

Observando estos resultados podemos concluir que el diseño de la SSF cumple correctamente con lo requerido para este trabajo de investigación; la superficie presenta dos picos de absorción dentro del rango de  $30GHz$  y  $40GHz$ , concretamente en  $32.34GHz$  y  $37.92GHz$  para ambos casos el porcentaje de absorción supera el 95% que era uno de los puntos más importantes de este trabajo, lo cual supera cuando menos a algunos resultados reportados en el estado del arte.

Es importante mencionar que la superficie presenta resultados de absorción muy cercanos entre polarizaciones  $H$  y  $V$ , esto resultado de la simetría  $x, y$  que presenta el diseño de la geometría, lo cual vuelve a la SSF apta para trabajar en ambas polarizaciones sin problema alguno.

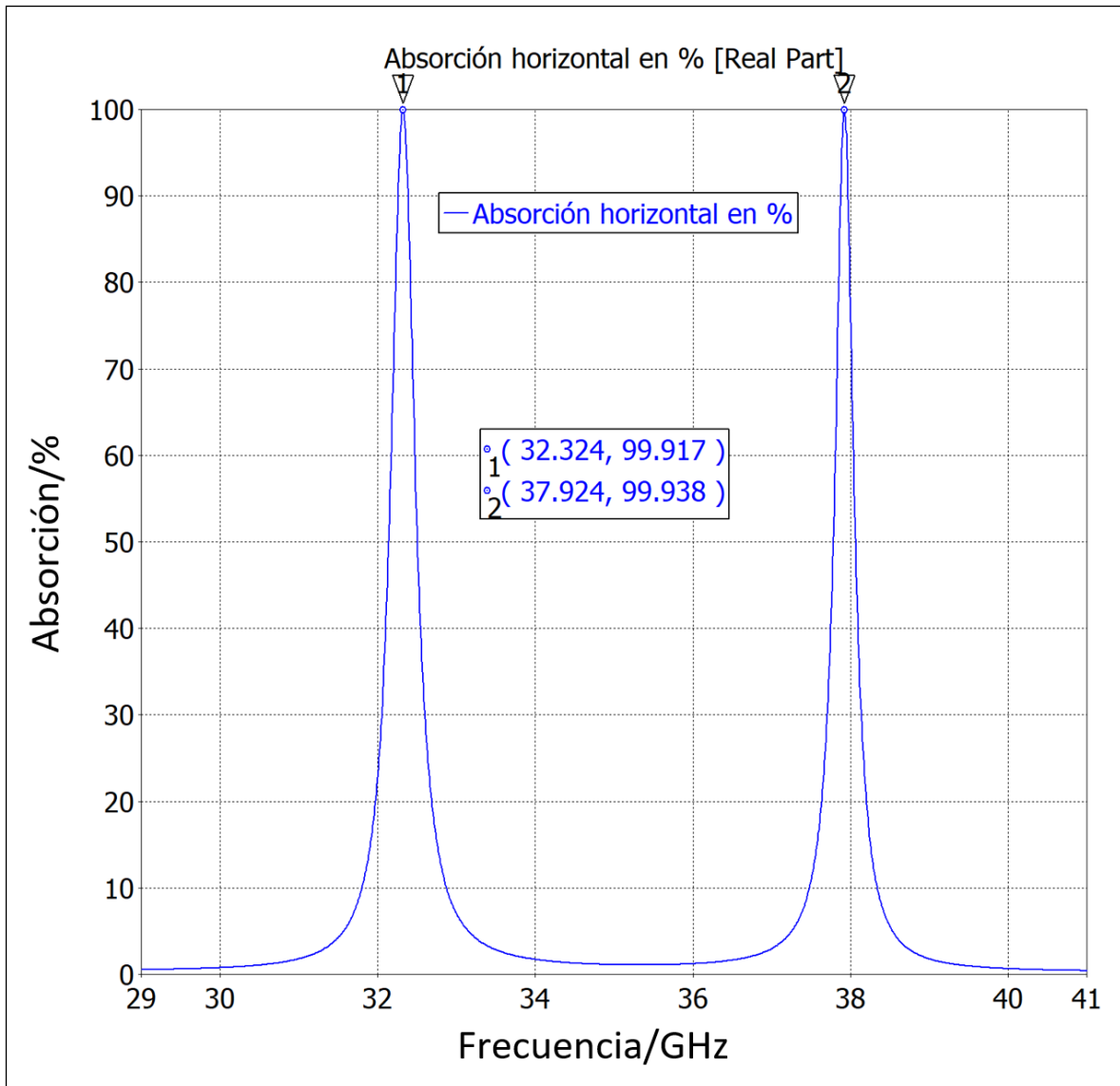


Figura 3.8: Absorción en polarización horizontal.

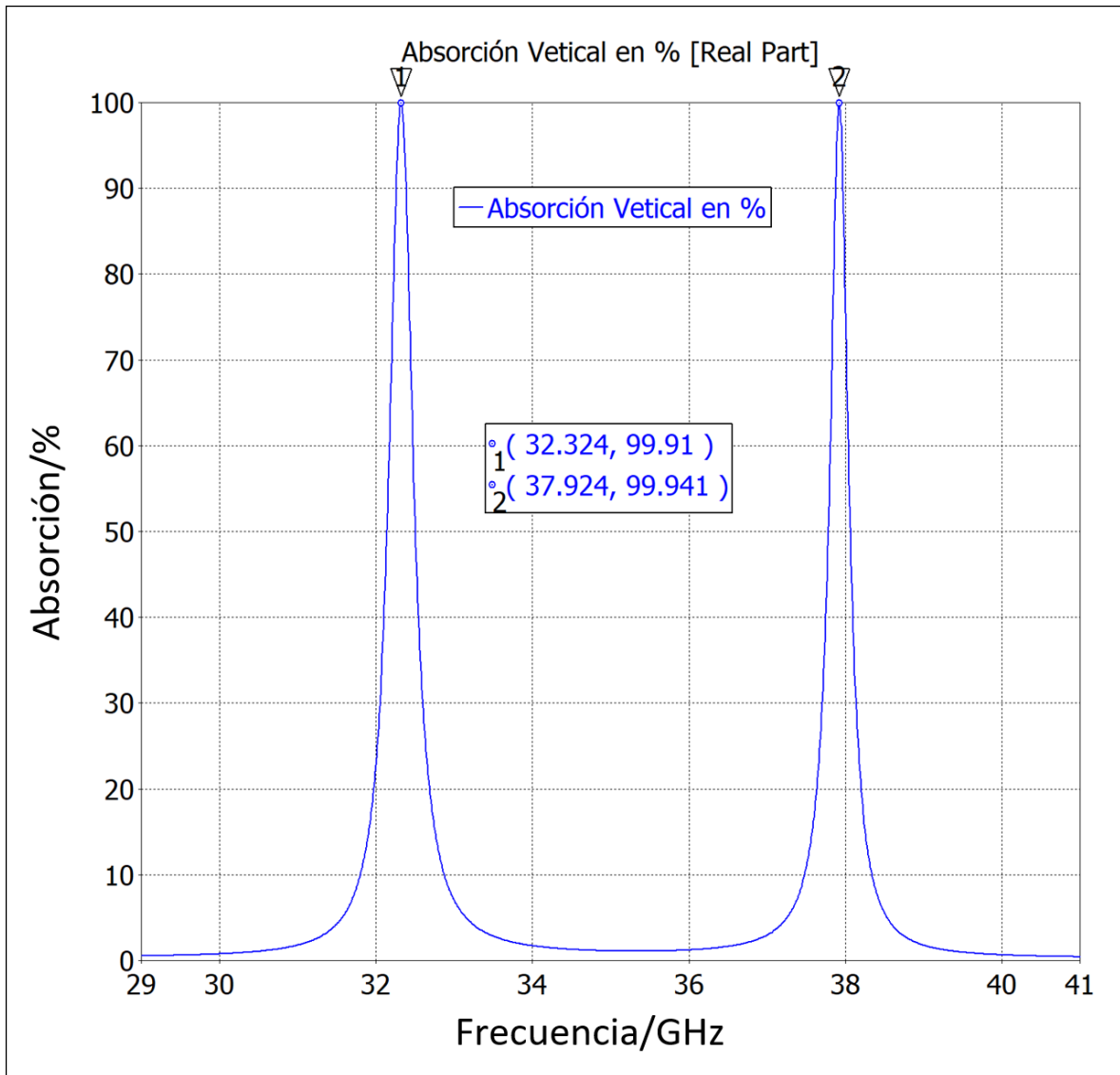


Figura 3.9: Absorción en polarización vertical.

### 3.3.3. Respuesta a variaciones de ángulo

Hasta ahora los resultados presentados corresponden a una onda electromagnética plana incidente en la superficie con un ángulo  $\theta = 0^\circ$  con respecto al eje de propagación de la onda (Eje  $Z$ ). Tanto la frecuencia de resonancia como el valor de absorción se ven afectados en cierta medida por variaciones del ángulo de incidencia de la onda electromagnética.

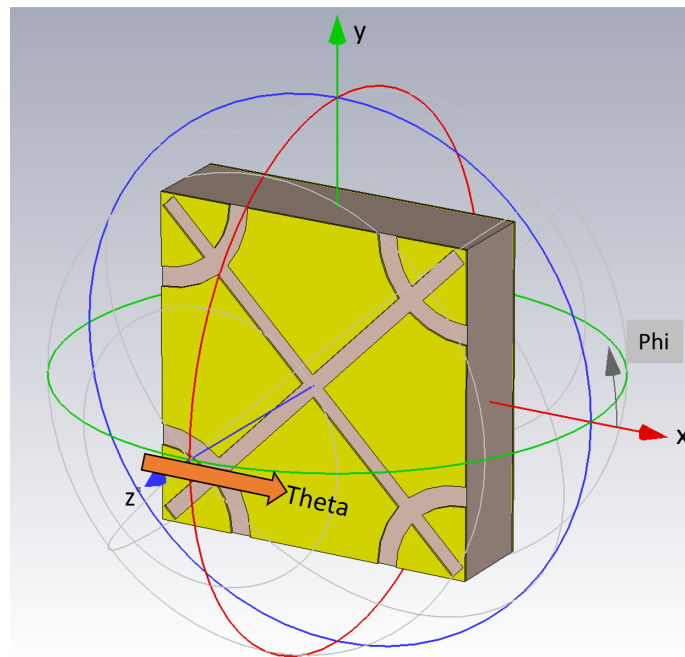


Figura 3.10: Orientación de los ángulos.

Para poder analizar estas variaciones se realizaron distintas simulaciones con *CST Studio Suite* a distintos valores de ángulo de incidencia. Los resultados se muestran a continuación:

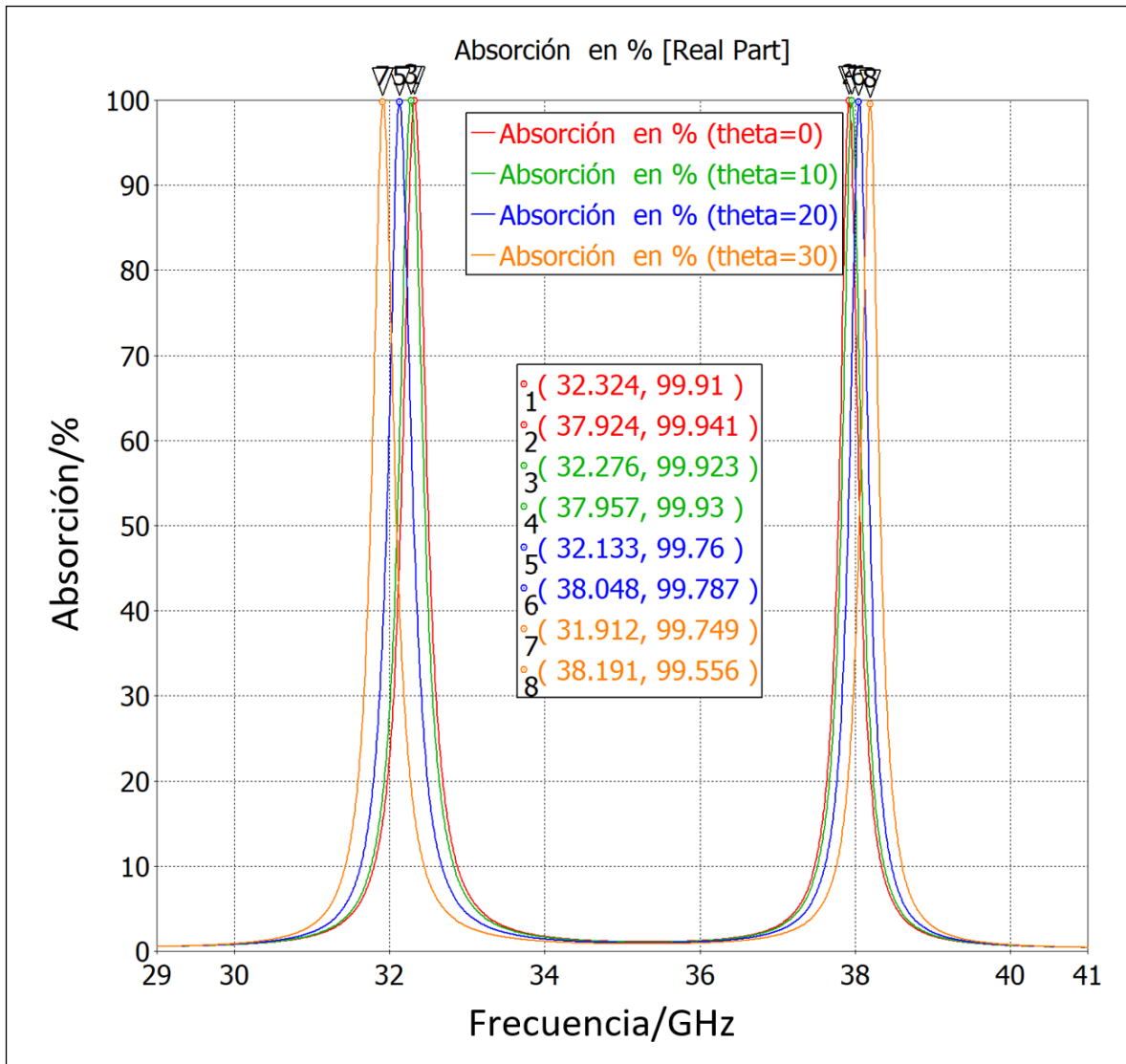


Figura 3.11: Respuesta de  $A$  en  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $30^\circ$ .



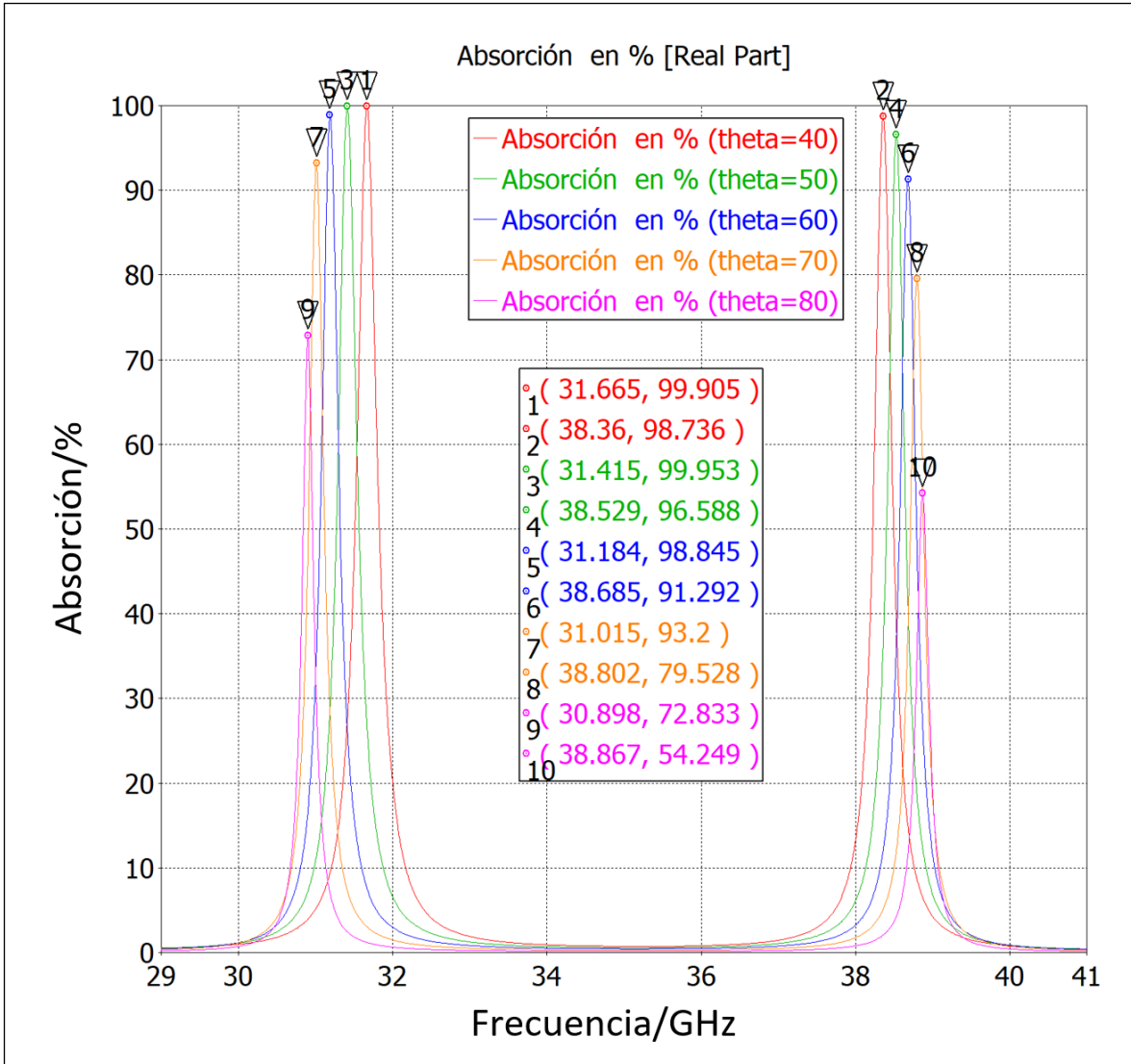


Figura 3.12: Respuesta de  $A$  en  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  y  $80^\circ$ .

Ángulo	Frecuencia 1/GHz	Absorción 1/ %	Frecuencia 2/GHz	Absorción 2/ %
0°	32.324	99.91	37.924	99.941
10°	32.276	99.923	37.957	99.93
20°	32.133	99.76	38.048	99.787
30°	31.912	99.749	38.191	99.556
40°	31.665	99.905	38.36	98.736
50°	31.415	99.953	38.529	96.588
60°	31.184	98.845	38.685	91.292
70°	31.015	93.2	38.802	79.528
80°	30.898	72.8833	38.867	54.249

Cuadro 3.1: Tabla comparativa entre ángulos de incidencia y absorción.

### 3.3.4. Ancho de banda

A continuación, se muestran los resultados del cálculo de ancho de banda, conocer este parámetro es relevante en muchas aplicaciones de comunicaciones en donde se emplean este tipo de superficies, los valores del ancho de banda reflejan en cierta medida la aptitud de la superficie para estas aplicaciones.

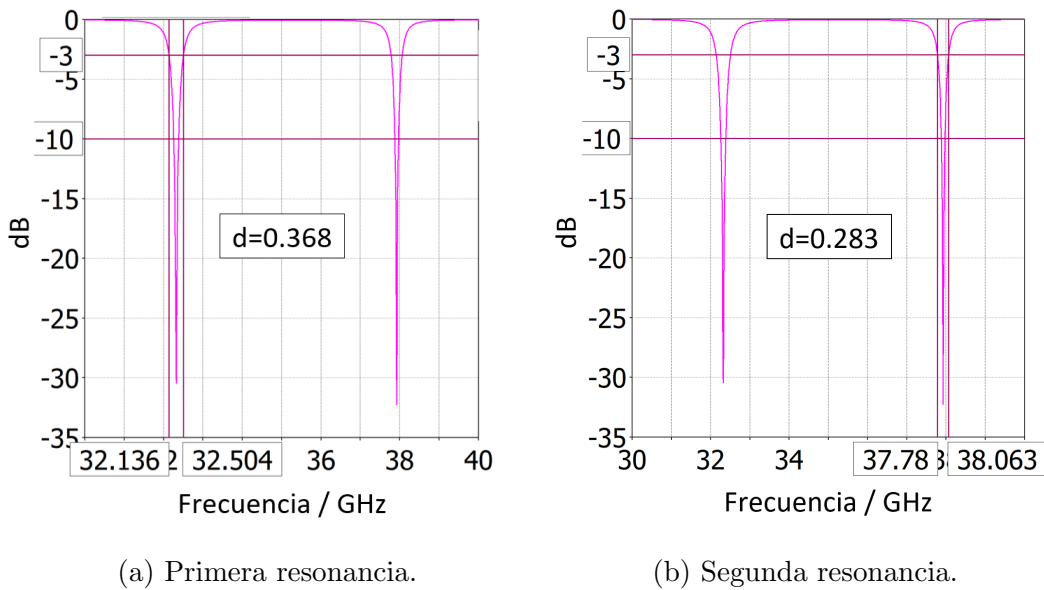


Figura 3.13: Anchos de banda en ambas resonancias a -3dB.

En la Fig. 3.13 se muestran los anchos de banda para cada una de las bandas de absorción medidas en  $-3\text{dB}$  que es el valor en donde se tiene el  $50\%$  de absorción. Se observa que para la primera banda se tiene un valor de  $0.368\text{GHz}$  (3.13a) mientras que para la segunda banda se tiene un valor de  $0.283\text{GHz}$  (3.13b).

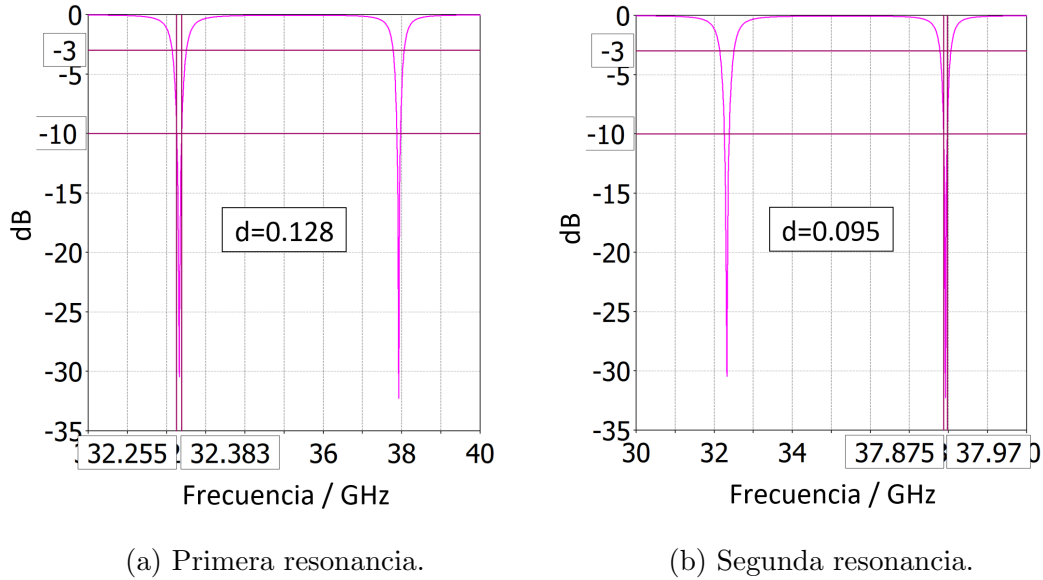


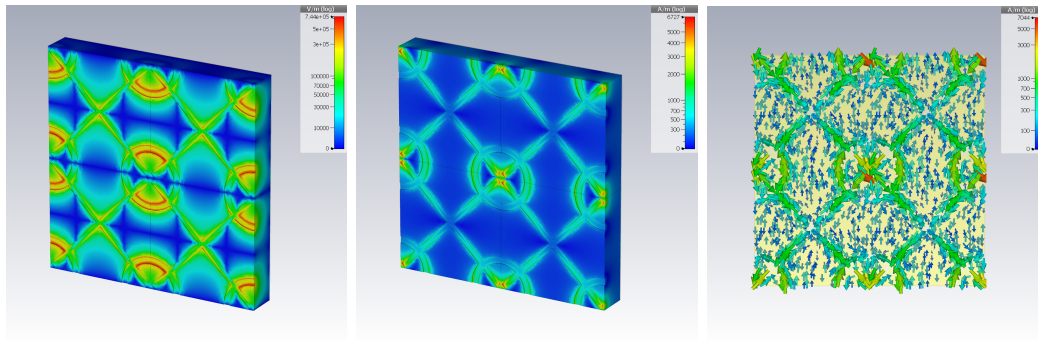
Figura 3.14: Anchos de banda en ambas resonancias a  $-10\text{dB}$ .

En la Fig. 3.14 se muestran los anchos de banda para la primera y segunda banda de absorción en el valor de  $-10\text{dB}$  que es en donde se tiene el  $90\%$  de absorción, estos valores son:  $0.128\text{GHz}$  (3.14a) y  $0.095\text{GHz}$  (3.14b) para la primera y segunda banda respectivamente. El ancho de banda se ve limitado debido a la naturaleza resonante de las superficies selectivas de frecuencia como se muestra en la literatura.

### 3.3.5. Campo eléctrico, magnético y corriente superficial

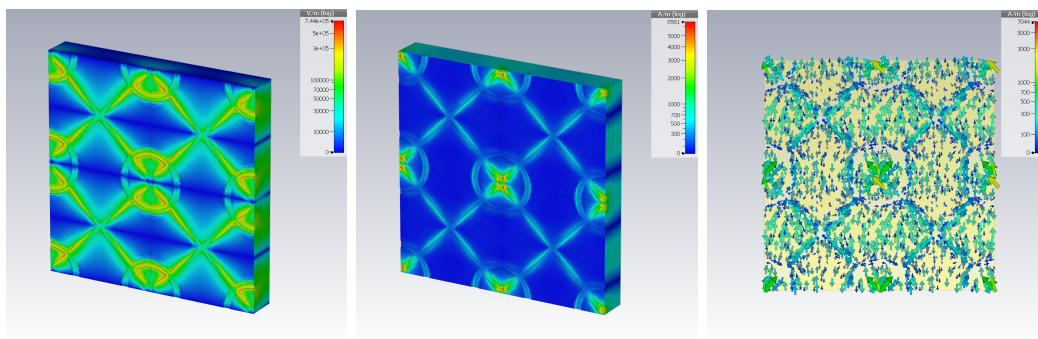
Para comprender el mecanismo de funcionamiento de las distintas geometrías de la superficie se puede hacer uso de los campos eléctricos, magnéticos y la corriente superficial. Al observar las diferencias entre estos se puede afirmar que existe diferencia en los modos de resonancia entre las geometrías [66]. Fig. 3.15 y Fig. 3.16.

Como se puede observar las diferentes partes de la geometría que conforman



(a) Campo eléctrico. (b) Campo magnético. (c) Corriente superficial.

Figura 3.15: Distribución de campos y corriente superficial para resonancia No. 1.



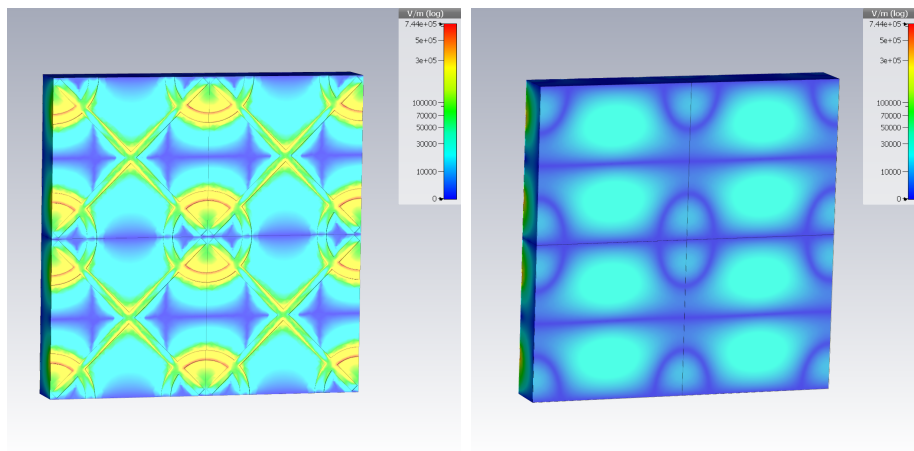
(a) Campo eléctrico. (b) Campo magnético. (c) Corriente superficial.

Figura 3.16: Distribución de campos y corriente superficial para resonancia No. 2.

la superficie repercuten en la resonancia eléctrica o magnética, de igual manera se puede observar este mismo fenómeno en las corrientes superficiales, las corrientes simétricas crean las resonancias eléctricas mientras que las corrientes asimétricas crean la resonancia magnética, la unión de estas resonancias eléctricas y magnéticas coinciden con la onda electromagnética que incide en la superficie. Se tiene como resultado una adaptación de impedancia entre la superficie y el espacio libre [66].

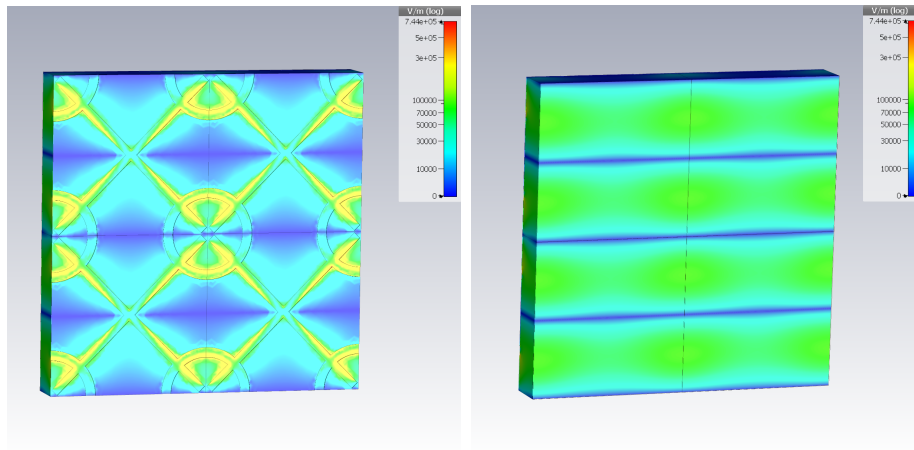
### 3.3.6. Presencia de dos resonancias

Visualmente se puede comprender cómo es que funciona la presencia de dos resonancias, en las Fig. 3.15 y 3.16 se muestra la distribución del campo eléctrico a las dos frecuencias de resonancias  $32.32GHz$  y  $37.92GHz$  respectivamente, en la figura se puede observar que en la primera frecuencia de resonancia el campo eléctrico está más altamente concentrado en el centro de la cruz central y mayormente solo en el área circular de los anillos de las aristas, mientras que en la segunda frecuencia de resonancia esta concentración de campo eléctrico se presenta en una combinación entre la intersección de los anillos circulares y los extremos de la cruz central. Esto significa que cada modo tiene un carácter diferente como se menciona en [66] este carácter de resonancia puede comprobarse con la diferencia entre la distribución de la corriente superficial.



(a) Campo eléctrico frontal para la primera resonancia a  $32.32GHz$ . (b) Campo eléctrico trasero para la primera resonancia a  $32.32GHz$ .

Figura 3.17: Distribución del campo eléctrico para la primera resonancia a  $32.32GHz$ .



(a) Campo eléctrico frontal para la (b) Campo eléctrico trasero para la  
segunda resonancia a  $37.92GHz$ . segunda resonancia a  $37.92GHz$ .

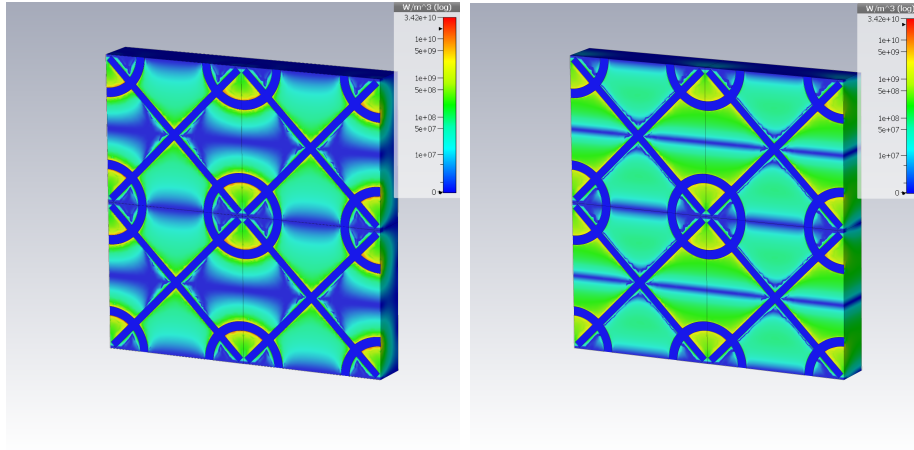
Figura 3.18: Distribución del campo eléctrico para la segunda resonancia a  $37.92GHz$ .

### 3.3.7. Densidad de pérdida de potencia

Las imágenes 3.19 y 3.20 muestran gráficamente la distribución de la densidad de pérdida de potencia en la superficie. Estas imágenes aportan una referencia visual de la absorción de la onda electromagnética.

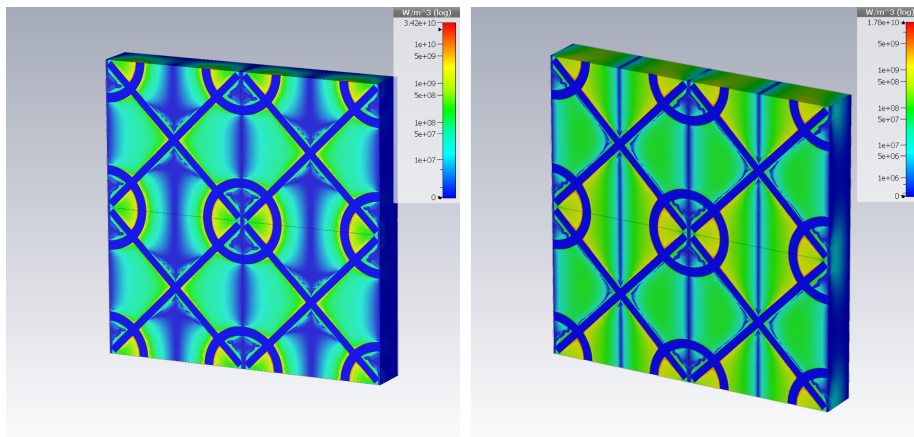
La Fig. 3.19a muestra la densidad de pérdida de potencia en la polarización vertical en la primera frecuencia de absorción a  $32.32GHz$  mientras que la Fig. 3.19b muestra esta densidad de pérdidas en la frecuencia de  $37.92GHz$ . Es posible apreciar la diferencia en la distribución de la densidad de pérdida de potencia, para ambos casos la mayor pérdida se da al interior del anillo circular, pero con la diferencia que a la frecuencia de  $37.92GHz$  esta distribución es más uniforme en toda la superficie.

La Fig. 3.20 de forma similar a la figura anterior se muestra la densidad de la pérdida de potencia, pero para la polarización horizontal, es posible observar que la distribución es similar para ambas frecuencias de acuerdo con la polarización vertical.



(a) Densidad de pérdida de potencia en polarización TM en  $32.32GHz$ . (b) Densidad de pérdida de potencia en polarización TM en  $37.92GHz$ .

Figura 3.19: Densidad de pérdida de potencia para la primera y segunda frecuencia de absorción para la polarización TM.



(a) Densidad de pérdida de potencia en polarización TE en  $32.32GHz$ . (b) Densidad de pérdida de potencia en polarización TE en  $37.92GHz$ .

Figura 3.20: Densidad de pérdida de potencia para la primera y segunda frecuencia de absorción para la polarización TE.

### 3.3.8. Conclusiones

De acuerdo con las condiciones iniciales que debía cumplir la SSF, la presencia de dos bandas de resonancia dentro del rango de frecuencias de  $30GHz$  y  $40GHz$ ,

estas frecuencias de resonancia debían presentar propiedades de absorción mayores al 95 % dado que los valores reportados en el estado del arte son mayores a este valor, se logró diseñar utilizando un sustrato dieléctrico Rogers RO3210 con una constante dieléctrica  $\epsilon_r = 10.2$  y una estructura con elementos resonantes que cumplieran estas características mencionadas.

La estructura está compuesta por un arreglo periódico de una celda unitaria, esta celda contiene las dos geometrías utilizadas para lograr las dos resonancias, estas geometrías son por un lado un anillo en apertura junto con una cruz en apertura rotada  $45^\circ$ .

En correspondencia con los trabajos reportados se decidió hacer uso de una pantalla metálica en la parte trasera, esto con el fin de impedir la transmisión de la onda incidente.

Esta estructura fue simulada con software especializado *CST Studio Suite* con el cual se consiguieron resultados numéricos favorables para las condiciones descritas anteriormente. La simulación arrojó resultados de absorción mayores al 99 % en dos frecuencias distintas dentro del rango especificado de frecuencia, con lo cual podemos concluir que el diseño presentado cumple completamente con lo esperado de momento con resultados de simulación numérica, esto convierte al diseño en una buena propuesta.

Dentro de las simulaciones numéricas que se realizaron están incluidas las realizadas a la variación a los ángulos de incidencia  $\theta$  de la onda plana incidente, estos resultados nos permiten observar las variaciones de frecuencia de resonancia y valor de absorción que sufre la SSF frente a estas.

En consecuencia, con los resultados favorables presentados en la simulación numérica, se puede inferir que la fabricación y caracterización de la superficie es factible.



# Capítulo 4

## Proceso de Fabricación

El equipo de trabajo del departamento de Electrónica y el centro de diseño UNAMems de la facultad de ingeniería perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM cuenta con un proceso litográfico de fabricación de circuito impreso para altas frecuencias. El proceso de fabricación se abordará con más detalle en secciones posteriores.

El alcance del presente trabajo se limitó solo a presentar los resultados simulados, por lo que no se realizó la fabricación y la caracterización que contemplaba el plan de trabajo y alcance de la investigación inicial, esto derivado de la situación sanitaria presentada durante la elaboración del presente trabajo. Sin embargo, se presenta el flujo de trabajo de dicho proceso litográfico.

### 4.1. Proceso litográfico

Para muchas tareas de miniaturización se hace uso de la técnica litográfica, esta técnica es utilizada para transferir copias de un patrón maestro a una superficie de un material sólido [30]. Este proceso es utilizado en la fabricación de dispositivos electrónicos semiconductores, y como es el caso en fabricación de superficies selectivas de frecuencia.

## Fotolitografía

La fotolitografía es la técnica normalmente utilizada en diseños de dos dimensiones. La fotolitografía es la variación de litografía más utilizada en la fabricación de circuitos integrados ya que la transferencia de patrones de máscaras a películas muy delgadas se logra casi exclusivamente a través de un proceso de fotolitografía, la combinación de exponer una serie de patrones sucesivos tiene como resultado la obtención de circuitos integrados complejos de múltiples capas [30]. La Fig. 4.1 resume brevemente los pasos del proceso de fotolitografía para la fabricación de una superficie selectiva de frecuencia.

1. Detalle del sustrato Rogers RO3210™ en la capa central se encuentre el dieléctrico y por ambos lados de esta capa se encuentran las capas de cobre.
2. Sobre una cara del sustrato en la cual se realizará la impresión de los elementos es depositado una capa de Photoresit.
3. Se coloca sobre la superficie previamente cubierta con una capa de photoresist la máscara que contiene impreso de forma oscura el patrón a transferir, la superficie es expuesta a luz UV la cual genera que las áreas que están expuestas a la luz UV se solidifiquen.
4. El paso siguiente consiste en revelar la superficie lo cual deja expuesto el material que se desea eliminar.
5. Una vez revelado el patrón es atacado con material corrosivo para eliminar el material no deseado.

6. Finalmente, después del ataque, la superficie es limpiada para remover el atacante y el photoresist, dejando expuesta la superficie terminada con los elementos deseados.

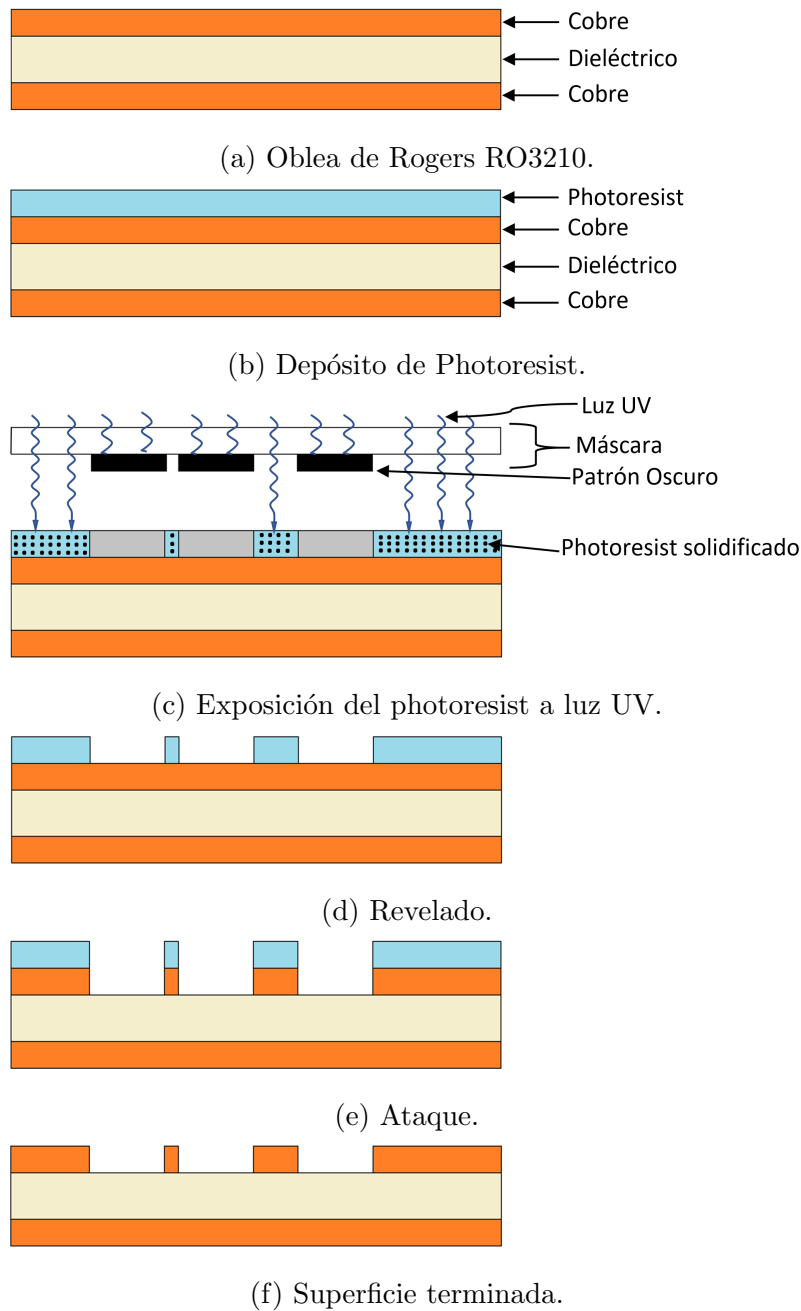


Figura 4.1: Proceso de fotolitografía.

## 4.2. Materiales

**Sustrato.** Como se observó en el Cap.3 el diseño de la superficie selectiva de frecuencia se realizó bajo las especificaciones del sustrato comercial Rogers RO3210™ este material es un laminado relleno de cerámica reforzado con fibra de vidrio, cubierto por ambos lados con dos capas metálicas de cobre. Estos materiales están diseñados para ofrecer una estabilidad mecánica y muy buen rendimiento en aplicaciones de alta frecuencia [29]. Este material tiene una constante dieléctrica alta, igual a 10.2. Este material es ideal para la fabricación de sistemas de telecomunicaciones inalámbricas y estructuras multicapa de alta frecuencia como pueden ser antenas de microcinta tipo parche a un costo promedio bajo. En este trabajo se utilizó la variante de sustrato con las siguientes características:

Propiedad	Valor
Permitividad relativa $\epsilon_r$	10.2
Tangente de pérdidas $\delta$	0.0027
Espesor del sustrato	0.64mm
Espesor del cobre	17 $\mu\text{m}$

Cuadro 4.1: Características eléctricas y mecánicas del sustrato Rogers RO3210.

**Características del cobre.** El cobre además de ser uno de los mejores conductores eléctricos conocidos tiene un costo bajo, por lo cual es uno de los elementos más utilizados en la fabricación de circuitos integrados y como se ha podido observar últimamente en la elaboración de superficies selectivas de frecuencia y en antenas tipo parche, muy comunes en dispositivos móviles cuadro 4.2.

Propiedad	Valor
Conductividad eléctrica	$5.8 \times 10^7 S/m$
Densidad	$\sigma = 8960 Kg/m^3$

Cuadro 4.2: Características eléctricas del cobre.

### 4.3. Flujo del proceso de fabricación

#### 4.3.1. Preparación del sustrato

Una vez cortado el sustrato con las dimensiones requeridas para el uso del equipo de medición, el sustrato tiene que ser limpiado para eliminar todas las impurezas que puedan afectar la fabricación, el primer paso es un lavado con detergente libre de fosfato comercialmente llamado Extran MA03. Posterior a este lavado, se efectúa un segundo y tercer baño con acetona, para finalizar el proceso de limpieza se realiza un último baño con agua bidestilada, finalmente el proceso de secado se realiza por medio de centrifugado dentro del equipo Spinner (Fig. 4.1a).

#### 4.3.2. Depósito de resina fotosensible

El siguiente paso es el depósito de una resina fotosensible, esta resina llamada comercialmente Photoresist es un tipo de resina que tiene la característica de cambiar su estado al interactuar con luz UV. Esta resina es depositada y posteriormente se realiza un centrifugado en el spinner para asegurar una capa uniforme sobre el sustrato (Fig. 4.1b).

#### 4.3.3. Máscara de la SSF

Dentro del contexto de fabricación por litografía, se le conoce como máscara al patrón del arreglo periódico impreso en un material especial para ser usado en el proceso litográfico de fabricación, esta máscara permite transferir un patrón deseado a una superficie (Fig. 4.1c).

## Exposición UV

La máscara es montada sobre un cristal y es puesta sobre la superficie que contiene una capa de Photoresist para después ser expuesta a luz UV por un periodo de 65 segundos, tiempo suficiente para que el material fotosensible cambie su composición.

### 4.3.4. Revelado

Después de la exposición del Photoresist a luz UV, sigue el revelado con líquido especial Developer AVK 430 en una solución de 4 Partes por una parte de agua a una temperatura de 30°C. La superficie se expone a esta solución por 2 minutos y 45 segundos para después pasar al secado que nuevamente se realiza en el spinner. En este paso se consigue la eliminación de Photoresist que no se desea dejando expuesto el cobre para el siguiente paso (Fig. 4.1d).

### 4.3.5. Ataque

Después de haber dejado expuestas las áreas de cobre que se desean eliminar se prosigue a atacar la superficie con una solución corrosiva la cual consiste en una mezcla de 15% peróxido de hidrógeno, 15% ácido clorhídrico y 70% agua, esta solución es utilizada para atacar el cobre. Dependiendo del tiempo de exposición del cobre con esta mezcla se puede obtener desde una disminución del grosor de la capa de cobre hasta la eliminación total del cobre. Para el caso de este trabajo se desea eliminar completamente la capa de cobre por lo cual se tiene que atacar por un periodo de 1 minuto y 10 segundos, tiempo suficiente para eliminar completamente el cobre (Fig. 4.1e).

**Lavado.** Pasado el tiempo pertinente de ataque del cobre se realiza una serie de lavados, un lavado en agua seguido de dos lavados con acetona con la cual se elimina el photoresist adherido para ser nuevamente secado en el spinner.

#### **4.3.6. Superficie terminada**

Después de realizar los pasos anteriores se tiene la superficie terminada con las geometrías deseadas transferidas, se tiene que observar para descartar alguna imperfección en la superficie (Fig. 4.1f)

# Conclusiones Generales

Las superficies selectivas de frecuencia que son construidas y diseñadas haciendo uso de sustratos dieléctricos han demostrado de acuerdo a sus resultados experimentales y medidos que son una de las mejores opciones a considerar para el diseño y fabricación de absorbedores electromagnéticos debido a su perfil fino que lo vuelve útil en la mayoría de aplicaciones, esto aunado a que son de fácil fabricación y un bajo costo en comparación con diferentes tipos de estructuras existentes en el mercado.

En este trabajo de investigación se diseñó un absorbedor electromagnético de dos bandas de absorción basado en una superficie selectiva de frecuencia haciendo uso del sustrato dieléctrico Rogers RO3210™.

La superficie diseñada mostró dos picos de absorción que se presentan en las frecuencias de  $32.32GHz$  y  $37.92GHz$  con porcentajes de absorción mostrados en simulación de 99.91 % y 99.94 % respectivamente.

Estos resultados de absorción obtenidos, ambos mayores al 99 % de la onda incidente superan con un amplio margen a los resultados mínimos esperados del diseño (95 % de absorción) y que a su vez son el límite inferior en la mayoría de los trabajos presentados en el estado del arte, sin embargo la absorción media presentada en la mayoría de los trabajos presentados oscilan entre 97 % y 98 %, por lo que podemos destacar como favorables y sobresalientes los resultados obtenidos en este trabajo.

Estas dos resonancias se ajustan dentro del parámetro de frecuencia considerado en las condiciones iniciales del diseño en el cual se consideraba tener dos resonancias entre  $30GHz$  y  $40GHz$ . Este rango de frecuencias fue elegido debido a la tendencia



actual en el uso de altas frecuencias para los sistemas inalámbricos para la transmisión de datos como lo es por citar un ejemplo la tecnología celular 5G en la que se pueden encontrar aplicaciones desde los  $20GHz$  a  $40GHz$  llegando incluso hasta los  $100GHz$  en algunos casos.

El diseño presenta resultados favorables a nivel de simulación; resultados de absorción mayores al límite mínimo fijado en los parámetros del diseño inicial junto con una respuesta muy similar entre la polarización vertical y horizontal. La superficie presentó una sensibilidad baja de absorción a los ángulos de incidencia entre  $0^\circ$  y  $40^\circ$  grados con respecto a la normal para ambas polarizaciones. Contrastado con una sensibilidad a la frecuencia de resonancia pequeña dentro de los primeros  $20^\circ$ .

El ancho de banda de la absorción mostrados en la simulación en  $-3dB$  y  $-10dB$  coinciden con los valores promedio reportados en el estado del arte para los absorbentes electromagnéticos basados en superficies selectivas de frecuencia construidos con materiales dieléctricos similares. Los resultados satisfactorios mostrados en simulaciones de este trabajo de investigación hacen de ésta una propuesta candidata a ser fabricada y posteriormente caracterizada para obtener mediciones reales del comportamiento de la superficie en un entorno real.

Es importante mencionar y considerar que este tipo de superficies pueden ser adaptadas a diferentes frecuencias de resonancia, con solo modificar las dimensiones de los elementos y la estructura obteniendo valores de absorción muy similares a diferentes frecuencias, esto es un punto a favor del diseño de la geometría presentada ya que no se limita a las frecuencias mostradas en este trabajo de investigación, lo cual aumenta las aplicaciones posibles del absorbente electromagnético.

# Bibliografía

- [1] Ben A. Munk, “FREQUENCY SELECTIVE SURFACES.,” *Johon Wiley & Sons, Inc.*, (2000).
- [2] Rana Sadaf Anwar, Lingfeng Mao y Huansheng Ning., “Frequency Selective Suerfaces: A Review.,” *Applied Sciences.*, (2018).
- [3] Filippo Costa, Agostino Monorchiro y Guiliano Manara, “Theory, Design and perspectives of Electromagnetic Wave Absorbers” *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*,(1016).
- [4] Deepak Sood y Chandra Charu, “A Wide-Angle Ultrathin Metamaterial Microwave Absorber,” *Progress In Electromagnetics Research* , Vol. 44, 39–46 (2015)
- [5] FawWaz T. Ulaby, “ Damping of the resonant modes of a rectangular metal package [MMICs]” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*,vol.37, no. 1,pp. 253–256,Jan.(1989).
- [6] D. F. Williams. “ Damping of the resonant modes of a rectangular metal package [MMICs]” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.37, no. 1,pp. 253–256,Jan.(1989).
- [7] P. Dixon, “Cavity-resonance dampening ” *IEEE Microwave Magazine.*,vol.6, no. ,pp. 74-48 ,Jan.(2005).

- [8] R. Araneo, G. Lovat, y S. Celozzi, “Low-frequency intertwined spiral aperture absorbers for Shielded enclosures” *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, pp. 456–461 (2013).
- [9] F. Costa, S. Genovesi, A. Monorchio y G. Manara “ Low-Cost Metamaterial Absorbers for Sub-GHz Wireless Systems” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 27–30, 2014. (2014).
- [10] R.L. fante, y M.T. McCormack, “ Reflection properties of the Salisbury screen” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 36 (1988).
- [11] G. T. Ruc, D. E. Barrick, W. D. Stuart y C. K. Krichbaum “ Radar cross section handbook, vol. 1.” *Plenum press New York*, 1970.
- [12] Huanhuan Yang, Xiangyu Cao y Jun Gao “ LOW RCS METAMATERIAL ABSORBER AND EXTENDING BANDWIDTH BASED ON ELECTROMAGNETIC RESONANCE” *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 33, 31–44 (2013).
- [13] Libi Mol, Chandroth Karuvandi. “A Novel Polarization Independent Wide-band Circuit Analog Absorber Using Crossed Loops ” *RADIOENGINEERING ELECTROMAGNETICS*, Vol. 27, No.3, September 2018.
- [14] Kunzhe Zhang, Wen Jiang y Junyi Ren, “Design of Frequency Selective Absorber Based on Parallel LC Resonators ” *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 65, 91–100, 2018.
- [15] Qiang Chen, Qiang Chen y Qiang Chen, “ Design of Absorptive/- Transmissive Frequency-Selective Surface Based on Parallel Resonance,” *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, VOL. 65, NO. 9, SEPTEMBER 2017.

- [16] M. Gustafsson, A. Karlsson, “Design of frequency selective windows for improved indoor outdoor communication” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 6, pp. 1897-1900, June 2006.
- [17] Yu Yi, Feng Liang y Zhen-Zhong Yang, “ A Novel Method for Extracting Equivalent Circuit Parameters of Circular Patch and Ring Frequency Selective Surfaces ” *IEEE*, 2018.
- [18] Deepak Sood y Chandra Charu Tripath, “ Wideband Wide-Angle Ultra-Thin Metamaterial Microwave Absorber” *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 44, 39–46, 2015.
- [19] Danpeng Xie, Xueguan Liu y Xinmi Yang, “A Wideband Absorber With a Multiresonant Gridded-Square FSS for Antenna RCS Reduction ” *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*, VOL. 16, 2017.
- [20] Donovan E. Brocker, Anastasios H. Panaretos y Douglas H. Werner, “Circuit Model for Single-Layer Single-Resonant Ultra-Thin FSS Absorbers with Wide Bandwidth” *IEEE*, 2017.
- [21] Link: <https://www.generalplastics.com/technical-papers/dielectric-materials-use-radomes>
- [22] Link: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wire-grid-polarizer.svg>
- [23] Link: <https://es.vecteezy.com/arte-vectorial/118266-etiquetas-rfid-negro-y-transparente>
- [24] Dhawan Singh y Viranjay M. Srivastava, “ Triple Band Regular Decagon Shaped Metamaterial Absorber for X-Band Applications” *International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI -2017)*, Jan. 05–07, 2017.
- [25] David M. Pozar, “ Microwave Engineering” *Prentice Hall (2007)*.

- [26] Yulin Zhao, Jiahui Fu, Zhiming Liang, Zhefei Wang, Zhiyi Zhang, Bo Lv, Wan Chen, “Reconfigurable active frequency selective surface for ultra wideband applications” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Volume30, Issue7 July 2020.
- [27] T.Maier, yH.Bruckl, “Wavelength-tunable microbolometers with metamaterial absorbers” *Opt.Lett.*, vol.34, no. 19, pp. 3012–3014, (2009).
- [28] F. Costa, A. Monorchio and G. Manara, ‘Analysis and Design of Ultra Thin Electromagnetic Absorbers Comprising Resistively Loaded High Impedance Surfaces” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*,, vol. 58, no. 5, pp. 1551-1558, May 2010.
- [29] ROGERS CORPORATION “RO3210™ Circuit Materials, high frequency circuit laminates” *Advanced connectivity solutions*
- [30] Marc J. Madou “Microfabrication and Nanotechnology Volume II” *CRC Press Taylor & Francis Group* 2011.
- [31] W. Emerson, “Electromagnetic wave absorbers and anechoic chambers through the years” *IEE trans. Antennas Propag.*, Vol.21, no. 4 pp484-490 jul. 1973.
- [32] W. W. Salisbury, “Absorbent body for electromagnetic waves” *US2599944 A*
- [33] W. Dallenbach and W. Kleinstueber, “Reflection and Absorption of Decimeter-Waves by Plane Dielectric Layers” *Hochfreq. u Elektroak*, pp. 152–156, 1938.
- [34] H.-K. Jang, J.-H. Shin, and C.-G. Kim, “Low RCS patch array antenna with electromagnetic bandgap using a conducting polymer” in *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, pp. 140–143..
- [35] S. Genovesi, F. Costa, and A. Monorchio, “Wideband Radar Cross Section Reduction of Slot Antennas Arrays” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 1, pp. 163–173, Jan. 2014.

- [36] F. Williams, “Damping of the resonant modes of a rectangular metal package [MMICs],” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, vol. 37, no. 1, pp. 253–256, Jan. 1989.
- [37] P. Dixon, “Cavity-resonance dampening,” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 74–84, Jun. 2005.
- [38] R. Araneo, G. Lovat, and S. Celozzi, “Low-frequency intertwined spiral-aperture absorbers for Shielded enclosures” *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2013, pp. 456–461.
- [39] R. T. Ling, J. D. Scholler, and P.Y. Ufimtsev “The Propagation and Excitation of Surface Waves in an Absorbing Layer - Abstract,” *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 12, no. 7, pp. 883–884, Jan. 1998.
- [40] H.-Y. Chen, L.-J. Deng, P.-H. Zhou, J. Xie, and Z.-W. Zhu, “Improvement of Surface Electromagnetic Waves Attenuation with Resistive Loading,” *Prog. Electromagn. Res. Lett*, vol. 26, pp. 143–152, 2011.
- [41] C. Christopoulos “The transmission-line modeling method,” *Oxford University Press*, 1995.
- [42] G. T. Ruck, D. E. Barrick, W. D. Stuart, and C. K. Krichbaum, “Radar cross section handbook, vol. 1” *Plenum press New York*,, 1970.
- [43] Y. Naito and K. Suetake, “Application of Ferrite to Electromagnetic Wave Absorber and its Characteristics,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 19, no. 1, pp. 65–72, Jan. 1971. numero y pagina, año.
- [44] H. M. Musal and H. T. Hahn, “Thin-layer electromagnetic absorber design,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 25, no. 5, pp. 3851–3853, Sep. 1989..
- [45] A. Kazemzadeh “Nonmagnetic ultrawideband absorber with optimal thickness” *IEEE Trans. Antennas Propag*, vol. 59, no. 1, pp. 135–140, 2011.

- [46] F. Costa and A. Monorchio, “ “Closed-form analysis of reflection losses in microstrip reflectarray antennas” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 10, pp. 4650–4660, 2012..
- [47] F. Costa, S. Genovesi, A. Monorchio, and G. Manara, “ “A circuit-based model for the interpretation of perfect metamaterial absorbers,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 3, pp. 1201–1209, 2013.
- [48] B. Chambers “Optimum design of a Salisbury screen radar absorber” ” *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 16, pp. 1353–1354, Aug. 1994.
- [49] D. J. Kern and D. H. Werner, “A genetic algorithm approach to the design of ultra-thin electromagnetic bandgap absorbers” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 38, no. 1, pp. 61–64, Jul. 2003.
- [50] T. Kollatou and C. Christopoulos, “Use of High-Impedance Surfaces in Electromagnetic Compatibility Applications,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 3, pp. 1812–1815, Mar. 2009..
- [51] F. Costa, S. Genovesi, and A. Monorchio, ““On the bandwidth of high-impedance frequency selective surfaces ”, *Antennas Wirel. Propag. Lett. IEEE*, vol. 8, pp. 1341–1344, 2009.
- [52] F. Costa and A. Monorchio,, “Electromagnetic Absorbers based on High Impedance Surfaces: From ultra-narrowband to ultra-wideband absorption ”, *Adv. Electromagn.*, vol. 1, no. 3, pp. 7–12, 2012. .
- [53] H.-B. Zhang, P.-H. Zhou, H.-P. Lu, Y.-Q. Xu, D.-F. Liang, and L.-J. Deng,, “Resistance selection of high impedance surface absorbers for perfect and broadband absorption ”, *IEEE Trans. Antennas Propag.* , vol. 61, no. 2, pp. 976–979, 2013 .

- [54] Yan, M.; Qu, S.; Wang, J.; Zhang, J.; Zhang, A.; Xia, S.; Wang, W., “ A novel miniaturized frequency selective surface with stable resonance. ”, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett*, 2014, 13, 639–64 .
- [55] Syed, I.S.; Ranga, Y.; Matekovits, L.; Esselle, K.P.; Hay, S.G., “A single-layer frequency-selective surface for ultrawideband electromagnetic shielding”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat*, 2014, 56, 1404–1411.
- [56] Gao, M.; Abadi, S.M.A.M.H.; Behdad, N., “A dual-band, inductively coupled miniaturized-element frequency selective surface with higher order bandpass response ”, *IEEE Trans. Antennas Propag*, 2016, 64, 3729–3734.
- [57] Li, Y.; Li, L.; Zhang, Y.; Zhao, C., “ Design and synthesis of multilayer frequency selective surface based on antenna-filter-antenna using Minkowski fractal structures”, *IEEE Trans. Antennas Propag*, 2015, 63, 133–141.
- [58] H. Li, Q. Cao and Y. Wang, “A Novel 2-B Multifunctional Active Frequency Selective Surface for LTE-2.1 GHz ”, *IEEE Trans. Antennas Propag*, *IEEE Trans. Antennas Propag*.
- [59] Yuka Shinozaki and Hiroyuki Arai, “ A Single Layer Microwave Absorber using FSS of Notched Circular Patch”, *IEEE Trans. Antennas Propag*, 2017 .
- [60] Pranati Sharma, Sanjeev Yadav<sup>2</sup>, “ Review Paper on Microwave Absorber Using FSS ”, *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC and ENGINEERING RESEARCH*, VOLUME 6, ISSUE 10, OCTOBER-2015.
- [61] Donovan E. Brocker, Anastasios H. Panaretos, Douglas H. Werner , “Circuit Model for Single-Layer Single-Resonant Ultra-Thin FSS Absorbers with Wide Bandwidth”, *IEEE*, 2017 .
- [62] LiangKui Sun, HaiFeng Cheng, YongJiang Zhou, and Jun Wang, “ Broadband metamaterial absorber based on coupling resistive frequency selective surface”, *OPTICS EXPRESS* , Vol. 20, No. 4. 13 February 2012



- [63] A.E. Martynyuk and J.I. Martinez Lopez , “ Frequency-selective surfaces based on shorted ring slots”, *ELECTRONICS LETTERS*, 7st March 2007 Vol. 37 No. 5 .
- [64] Threswar Beeharry, Riad Yahiaoui, Zhirun Hu, Kamardine Selemani, Habiba Hafdallah Ouslimani, “ Broadband Radar Absorbers Based on Periodic Structures ”, *IEEE*, 2018.
- [65] Danpeng Xie, Xueguan Liu, Huiping Guo, Xinmi Yang, Changrong Liu, “ A Wideband Absorber With a Multiresonant Gridded-Square FSS for Antenna RCS Reduction”, *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*, VOL. 16, 2017.
- [66] Furkan Dincer, Muharrem Karaaslan, Emin Unal, Kemal Delihacioglu, Cumali Sabah, “ Design of Polarization and Incident Angle Insensitive Dual-Band Metamaterial Absorber Based on Isotropic Resonator”, *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 144, 123–132, 2014.
- [67] F. Che Seman, R. Cahill, “ PERFORMANCE ENHANCEMENT OF SALISBURY SCREEN ABSORBER USING RESISTIVELY LOADED SPIRAL FSS”, *MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS*, Vol. 53, No. 7, July 2011.
- [68] Pramod K. Singh, Shideh Kabiri Ameri, Liu Chao, Mohammed N. Afsar, Sameer Sonkusale, “ BROADBAND MILLIMETERWAVE METAMATERIAL ABSORBER BASED ON EMBEDDING OF DUAL RESONATORS”, *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 142, 625–638, 2013.
- [69] Huanhuan Yang, Xiangyu Cao, Jun Gao, Wenqiang Li, Zidong Yuan, and Kai Shang. “ LOW RCS METAMATERIAL ABSORBER AND EXTENDING BANDWIDTH BASED ON ELECTROMAGNETIC RESONANCES”, *Progress In Electromagnetics Research M.*, Vol. 33, 31–44, 2013.

- [70] Mohamed Edries, Mohamed A. El-morsy, Hesham A. Mohamed, Sherif S. Hekal and Hala A. Mansour “ Literature Review on Radar Absorbers using Metamaterials”, *URSI EM Theory Symposium, EMTS 2019, San Diego, CA*, 27–31 May 2019.
- [71] William H. Hayt, Jr., John A. Buck “Engineering Electromagnetics” *Mc Graw Hill*, Eighth edition, 2012.