

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica
y Telecomunicaciones**

TRABAJO DE TITULACIÓN

**“DISEÑO DE UNA METASUPERFICIE USANDO LA TEORÍA DE MODOS
CARACTERÍSTICOS PARA REDUCIR EL RADAR CROSS SECTION. ”**

Autor:

Juan Carlos González Cevallos

Tutor:

Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda

Riobamba – Ecuador

Año 2021

AUTORIA DE INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este proyecto de investigación titulado, **“DISEÑO DE UNA METASUPERFICIE USANDO LA TEORÍA DE MODOS CARACTERÍSTICOS PARA REDUCIR EL RADAR CROSS SECTION.”** corresponde exclusivamente a Juan Carlos Gonzalez Cevallos y Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



Juan Carlos González Cevallos

230047323-4

DECLARACIÓN EXPUESTA DE TUTORÍA

En calidad de tutor del tema de investigación: “**DISEÑO DE UNA METASUPERFICIE USANDO LA TEORÍA DE MODOS CARACTERÍSTICOS PARA REDUCIR EL RADAR CROSS SECTION.** ”. Realizado por la Sr. **Juan Carlos González Cevallos**, para optar por el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sustentada públicamente y evaluada por el jurado examinador que se designe.

Riobamba, septiembre de 2021

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Juan Carlos González Cevallos', written in a cursive style.

DOCENTE TUTOR

Los miembros del tribunal de graduación del proyecto de investigación de título: **“DISEÑO DE UNA METASUPERFICIE USANDO LA TEORÍA DE MODOS CARACTERÍSTICOS PARA REDUCIR EL RADAR CROSS SECTION. ”**, presentado por: **Juan Carlos González Cevallos**, y dirigida por el Docente **Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda**.

Una vez revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual consta el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman:



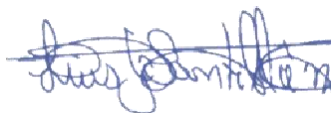
Ing. Carlos Peñafiel M.Eng.

Docente Tutor



Ing. Yesenia Cevallos PhD.

Miembro del Tribunal



Ing. Luis Santillán Ms.C

Miembro de Tribunal

CERTIFICACIÓN

Que, **GONZALEZ CEVALLOS JUAN CARLOS** con CC: **2300473234**, estudiante de la Carrera de **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **DISEÑO DE UNA METASUPERFICIE USANDO LA TEORÍA DE MODOS CARACTERÍSTICOS PARA REDUCIR EL RADAR CROSS SECTION.**", que corresponde al dominio científico **DESARROLLO TERRITORIAL, PRODUCTIVO Y DE HÁBITAT SUSTENTABLE PARA MEJORAR LA CALIDAD DE VIDA** y alineado a la línea de investigación **INGENIERÍA INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN**, cumple con el 6%, reportado en el sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 23 de agosto de 2021



Firmado electrónicamente por:
CARLOS RAMIRO
PENAFIEL OJEDA

CARLOS RAMIRO PEÑAFIEL OJEDA

TUTOR

DEDICATORIA

Este trabajo de tesis se la dedico a Juan y Yolanda por ser el motor de mi esfuerzo, por todas las virtudes y enseñanzas que han dejado en mí, que sin duda han formado a un hombre del cual ellos se pueden sentir orgullosos.

A Ezio, sin duda su partida dejo muchas trabas que superar, pero que despertó partes de mi ser que yacían dormidas antes de su llegada.

A Fabricio Toasa por la increíble amistad que me ha brindado, sin duda la persona con la que compartí las mejores vivencias de compañerismo en nuestra etapa universitaria.

Juan Carlos González Cevallos.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi profunda gratitud hacia la Universidad Nacional de Chimborazo y los docentes que durante el trayecto de mi formación académica me han aportado grados conocimientos que hicieron que pueda crecer día a día como profesional y ser humano, gracias por la dedicación, paciencia y compromiso.

También me gustaría agradecer al principal colaborador y amigo Carlos Peñafiel durante todo el proceso que conllevo esta investigación, quien con sus conocimientos, enseñanza y dirección permitió que este trabajo fuese concluido. Finalmente, a mi familia que siempre han demostrado estar dispuestos a contribuir con mi formación y felicidad. Muchas gracias por todo lo recibido.

Juan Carlos González Cevallos

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I.....	14
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2. OBJETIVOS	15
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	15
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
CAPÍTULO II.....	16
2.1. ESTADO DEL ARTE	16
2.2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	18
2.2.1. PARÁMETROS DE UNA ANTENA EN TRANSMISIÓN.....	18
2.2.2. PARÁMETROS DE UNA ANTENA EN RECEPCIÓN.....	20
2.2.3. TEORÍA DE MODOS CARACTERÍSTICOS.....	21
CAPÍTULO III	27
3. METODOLOGÍA.....	27
3.1. TIPO DE ESTUDIO	27
3.2. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	27
3.2.1. MÉTODO DESCRIPTIVO.	27
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	27
3.3.1. POBLACIÓN.....	27
3.4. FUENTES DE INFORMACIÓN	27
3.5. INSTRUMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
3.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	28
3.7. PROCEDIMIENTOS Y ANÁLISIS.....	29
3.7.1. PROPUESTA Y DISEÑO DE LA ANTENA.....	30
3.7.2. SIMULACIÓN DEL MODELO EN CST MICROWAVE STUDIO.....	31
CAPÍTULO IV.....	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA UNITARIA.....	33
4.3 ANÁLISIS DE LOS MODOS CARACTERÍSTICOS.....	38
4.4 CONTRASTE DE RESULTADOS DE METASUPERFICIES.....	41
CAPÍTULO V	43
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	43

<i>5.1. CONCLUSIONES</i>	43
<i>5.2. RECOMENDACIONES</i>	43
BIBLIOGRAFIA	45
ANEXOS	51

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Escenario típico del cálculo de los modos característicos en el sistema de coordenadas.	22
Figura 2. Fenómeno de acoplamiento en placas coplanares en un dipolo circular.	26
Figura 3. Procedimientos para la creación del proyecto de investigación.....	30
Figura 4. Placa de fibra de vidrio (FR4).....	30
Figura 5. Forma propuesta para la estructura unitaria de la metasuperficie.....	31
Figura 6. Vista 3D de la estructura unitaria propuesta (frontal y lateral).	32
Figura 7. Parámetros S11 de la estructura unitaria con y sin combinación de puertos ...	34
Figura 8. Parámetros Z de los puertos combinados.....	34
Figura 9. Parámetros S, antena en modo de recepción.....	36
Figura 10. Diagrama de radiación de la estructura unitaria, (a) 4 GHz (Vista frontal, plano XZ, plano YZ) y (b) 5.81 GHz (Vista frontal, plano XZ, plano YZ).....	37
Figura 11. Representación en graficas polares de, (a) ganancia a 3.98 GHz ($\Phi=0$, $\Phi=90$), y (b) ganancia a 5.81 GHz ($\Phi=0$, $\Phi=90$).	37
Figura 12. Valores de eficiencia de CST Studio de la estructura unitaria con puertos combinados.....	38
Figura 13. Ángulos característicos presentes en la estructura unitaria.	39
Figura 14. Distribución de corrientes de la estructura, a) modo J_1 a 3.7 GHz b) modo J_1' a 5.81 GHz (modo Antena), c) modo J_1' a 5.86 (modo línea transmisión), d) modo J_2' a 8.11GHz (modo antena)..	40
Figura 15. Aporte de potencia de los modos a la potencia total de la estructura.	41
Figura 16. RCS de la estructura propuesta.	41
Figura 17. Comparación del RCS.....	42

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo el diseño y simulación de una metasuperficie mediante la teoría de los modos característicos (TCM) que será utilizada para reducir el radar cross section (RCS).

La antena ha sido diseñada y evaluada en el simulador electromagnético CST Studio Suite, que opera en un rango de frecuencias que parte desde 3.41 GHz hasta los 6.77 GHz, se establece sobre un sustrato de permitividad dieléctrica $\epsilon_r=4.4$ (FR-4), posteriormente se utiliza Altair FEKO para describir el comportamiento de la antena empleando la Teoría de Modos Característicos, obteniendo así, los parámetros que describen el funcionamiento de la antena tanto en transmisión como recepción. Además, se evalúa la estructura mediante simulaciones de RCS monoestático para comprobar la reducción del Radar Cross Section. Una vez obtenida la información de los parámetros de la antena, se realiza una comparación con los resultados de metasuperficies desarrolladas por diversos autores.

El proyecto de investigación se compone de 5 capítulos. En el primer capítulo se aborda el planteamiento del problema y los objetivos a alcanzar con la realización de la investigación. Avanzando, en el segundo capítulo se contemplan el estado actual de los temas relacionados a la investigación, como el soporte teórico que fundamente los procesos realizados. Posteriormente, en el tercer capítulo se explica los procedimientos empleados para el diseño y simulación de la estructura. Luego, en el cuarto capítulo de la investigación se presentan los resultados y funcionamiento de la metasuperficie. Y finalmente, en el quinto capítulo se establecen las conclusiones y recomendaciones del proyecto de investigación.

Palabras clave: Metasuperficie, Radar Cross Section, Teoría de Modos Característicos.

ABSTRACT

The present research project aims at the design and simulation of a metasurface through the theory of characteristic modes (TCM) that will be used to reduce the radar cross section (RCS).

The antenna has been designed and evaluated in the electromagnetic simulator CST Studio Suite, which operates in a frequency range from 3.41 GHz to 6.77 GHz, it is established on a substrate with dielectric permittivity $\epsilon_r = 4.4$ (FR-4), subsequently AltairFEKO is used to describe the behavior of the antenna using the Theory of Characteristic Modes, thus obtaining the parameters that describe the operation of the antenna both in transmission and reception. In addition, the structure is evaluated using monostatic RCS simulations to check the reduction of the Radar Cross Section. Once the information on the antenna parameters has been obtained, a comparison is made with the meta-surface results developed by various authors.

The research project consists of 5 chapters. The first chapter addresses the statement of the problem and the objectives to be achieved by carrying out the research. Moving forward, in the second chapter, the current state of the topics related to the research is contemplated, as well as the theoretical support that bases the processes carried out. Later, in the third chapter, the procedures used for the design and simulation of the structure are explained. Then, in the fourth chapter of the investigation, the results and operation of the metasurface are presented. And finally, in the fifth chapter the conclusions and recommendations of the research project will be established.

Keywords: Characteristic Modes Theory, Metasurface, Radar Cross Section.



Firmado electrónicamente por:
JHON JAIRO
INCA

Reviewed by:

Lcdo. Jhon Inca Guerrero.

ENGLISH PROFESSOR C.C.

0604136572

INTRODUCCIÓN

Actualmente con el auge del mercado de las telecomunicaciones, el concepto de antena se ha vuelto común en la sociedad (Valdez, Miranda, Schlesinger, Chiozza, & Grela, 2018): Los Smartphones (Xu, Ding, Zhou, Sun, & Huang, 2019), ordenadores con conexión inalámbrica (Sharad Kulkarni, 2020), headsets, edificios inteligentes (O, y otros, 2018), dispositivos de aplicaciones médicas (Singh, Nikolic Stevanovic, & Kolundzija, 2019), entre otros dispositivos, son claros ejemplos de una realidad inalámbrica. En esta realidad, el punto más importante recae en las antenas, según el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) lo define como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñado específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas. (Mohamed, Abdalla, & Mitkees, 2019).

Los investigadores han logrado obtener altas velocidades de transmisión y gran capacidad del canal mediante el desarrollo y uso de las “Antenas de banda ultra ancha”(UWB), las cuales presentan ventajas considerables con respecto al tamaño y coste de fabricación, trabajando en el rango de frecuencias cercano a 3.1 GHz hasta los 10.6 GHz (Rahman, NagshvarianJahromi, Mirjavadi, & Hamouda, 2019).

Además, se implementan estructuras periódicas que generan un amplio margen de frecuencias de trabajo; una de las formas de obtener dicho objetivo es a través de las metasuperficies (Ma, y otros, 2021). Asimismo, son definidas como superficies no homogéneas, cuyo diseño permite la transformación de los campos electromagnéticos (Abdo Sánchez, Epstein, & Eleftheriades, 2018).

Con base en lo mencionado anteriormente, se ha demostrado que se puede controlar los parámetros de una antena a nuestra conveniencia, independiente de su forma(Li, Wang, Cai, Liang, & Gao, 2018). Logrando obtener características únicas en los modelos de las antenas, en este caso deseando obtener la propiedad de ultra ancho de banda y de igual manera la absorción de las señales electromagnéticas, puesto que en algunas prácticas el eco electromagnético es un efecto secundario no deseado (Costa, Genovesi, & Manara, 2020), el “Radar Cross Section (RCS)” posibilita la medida de que tan detectable es un objeto ante un radar (Yu, Yu, Wang, Zhang, & Luo, 2021), lo cual ha producido investigaciones a fin

de reducir de dicho fenómeno, disminuyendo su notoriedad ante sistemas de radares (Fang, y otros, 2018) y mejorando dispositivos de índole militar o de seguridad, lo cual es una característica imprescindible a la hora de su aplicación.

Se propone desarrollar mediante simulación el diseño de una metasuperficie que cuente con parámetros de ultra ancho de banda en transmisión y capacidad de absorción de las ondas electromagnéticas en recepción a fin de reducir el Radar Cross Section.

CAPÍTULO I

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el creciente mercado de las telecomunicaciones, se ha presenciado una mayor demanda en la tasa de transmisión para el intercambio de información, derivado de los múltiples servicios multimedia, comunicación, control de procesos, monitoreo de condiciones ambientales, aumento de abonados en redes de comunicación, entre otros. Por lo que, las antenas tradicionales han quedado a través del tiempo obsoletas para los nuevos estándares y exigencias de ancho de banda de las comunicaciones modernas, sin mencionar que, los diseños propuestos son producto de la aleatoriedad que se genera en un análisis empírico, resultado del conocimiento ya establecido y experiencia obtenida a lo largo de los años en el diseño por parte de los investigadores.

Debido a las razones expuestas anteriormente surge la pregunta, ¿Cómo diseñar una metasuperficie con gran ancho de banda que permita tener RCS bajo y que su diseño este alineado con nuevas tecnologías en el diseño de antenas?

El objetivo de este proyecto de investigación es innovar en el campo de sistemas radiantes enfocado en antenas, posibilitando el funcionamiento de una sola antena para que funcione en transmisión y recepción (como un absorbente), con la primicia de que posibiliten la transmisión de señales en un margen amplio de frecuencias y tener la capacidad de absorber las ondas electromagnéticas, el diseño y la descripción del comportamiento de la antena será establecido mediante el uso de la teoría de los modos característicos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar una metasuperficie con capacidad de banda ultra ancha (UWB) y reducción del Radar Cross Section usando la teoría de modos característicos.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular la metasuperficie en las mejores condiciones de modo transmisión y recepción, para obtener la estructura funcional en la implementación.
- Describir el funcionamiento de la antena usando la teoría de los modos característicos.
- Comparar los parámetros en transmisión y recepción con meta superficies que reducen el radar cross section.

CAPÍTULO II

2.1. ESTADO DEL ARTE

Desde hace tiempo atrás, se ha evidenciado la importancia de las comunicaciones inalámbricas alrededor del mundo (Sambasiva Nayak & Singh, 2018), lo cual ha enfrentado a los investigadores y expertos a fines al campo de las telecomunicaciones a realizar la mejora continua de las características tanto en transmisión como en recepción de las antenas. El propósito es de dotar de nuevas características a las actuales generaciones de comunicaciones, y proveer mayores velocidades de transferencia de datos mejorando la calidad de servicio para los usuarios finales (Balani, y otros, 2019).

Las antenas de ultra ancho de banda han sido foco de estudio debido a la gran capacidad del ancho de banda que estas obtienen, considerando que el rango de frecuencias a las que operan se extiende desde 3.55 GHz hasta 12.16 GHz (Raza Rizvi, Abbas Awan, & Hussain, 2021). En la investigación realizada por (Contreras & Urdaneta, 2018) se realiza una exhaustiva búsqueda de las características técnicas y estructuras de las antenas de banda ultra ancha (UWB), obtuvo conclusiones tales como: Las antenas PRMA (Printed Rectangular Monopole Antenna) han sido las más empleadas con su estructura convencional o modificada (Martínez Lozano, y otros, 2021), la obtención de altas velocidades de transmisión y gran capacidad del canal, además, de un nivel de consumo de poca potencia y de bajo costo de producción (Nejatijahromi, Naghshvarianjahromi, & Rahman, 2018).

No obstante, dicha investigación aclara las mayores desventajas, una de las más importantes y a considerar es el riesgo de interferencia con los diferentes servicios presentes en la banda de UWB (Salamin, Ali, & Zugari, 2019).

De igual forma, las metasuperficies son ampliamente detalladas en la revisión elaborada por (Wang, y otros, 2020), los autores dan a conocer que las metasuperficies son estructuras comprendidas por agrupaciones planares, cuya característica principal es la libertad que poseen al momento de manipular las ondas electromagnéticas. En el campo de las antenas, las llamadas metasuperficies pueden ser usadas para asistir a las propuestas de antenas (Imani, y otros, 2020), cuya aplicación presenta mejoras en el rendimiento de la directividad, reduce el RCS, suprime la interferencia entre elementos radiantes o potencia a las antenas con la capacidad de configuración (Bukhari, Vardaxoglou, & Whittow, 2019). Además de ello, con el uso las metasuperficies se pueden elaborar antenas de metasuperficies, las cuales

son fácilmente identificables por poseer uno o más puntos de alimentación y una metasuperficie (Li & Chen, 2019).

Por otra parte, la reducción del Radar Cross Section se ha presentado mediante diferentes métodos, en el trabajo realizado por (Zhang, Liu, Gong, Wang, & Jiang, 2018), se propuso una matriz de ranuras y se emplea el método de una metasuperficie de gradiente de fase para lograr la reducción del RCS en la banda de 7 GHz a 16,8 GHz, mientras que en la actualización de la investigación expuesta por (Liu, Jia, Zhang, & Li, 2020), para un modelo de matriz de ranuras se usó una metasuperficie híbrida con el objetivo de reducir del RCS en la banda de 6 a 18 GHz, pero con el hecho de que la ganancia decayó en 0.8 dB en comparación con la antena de referencia.

En cambio, en el artículo realizado por (Pazokian, Konjani, & Karimipour, 2018), se diseñó una superficie selectiva de frecuencia, la cual reemplaza el plano de tierra de la antena, consiguiendo así la reducción del RCS en el rango de frecuencia de 6,25 GHz hasta 12 GHz. Otro método practicado fue la implementación de conductores magnéticos artificiales (AMC), los autores (Sang, Chen, Ding, Guo, & Fu, 2019), ubicaron de forma estratégica los AMC para conseguir la reducción del RCS en aproximadamente el 91.5% de la banda de operación, la cual se determina desde 3.77 GHz a 10.14 GHz, con una incidencia normal en la onda.

Asimismo, en el desarrollo de una antena compacta de banda ancha, la cual está formada por dos resonadores en L fue propuesta por (Verma, Kumar, Meena, & Singh, 2020), la misma que presenta varias mejoras a comparación de la antena base sin superficie selectiva de frecuencia, observando una reducción de RCS promedio de 7.34 dB a lo largo del rango de frecuencia y su pico de reducción a la frecuencia de 1.2 GHz con un valor de 24 dB.

De la misma forma, han sido propuestas antenas con reducción del RCS mediante el uso de la teoría de los modos característicos, la investigación realizada por (Shi, Meng, Wei, Zheng, & Li, 2019), logra la reducción del RCS dentro y fuera de la banda de operación, la cual cubre el rango de frecuencias de 6.4 a 21.4 GHz, se usó dos sub arreglos que son diseñados a través de la teoría de los modos característicos, especificando que, las corrientes presentes en los sub arreglos fluyen de manera opuesta, provocando que los modos característicos sean cancelados y por ende se presente la reducción del RCS a lo largo del margen de frecuencias.

Es fundamental considerar que diversos trabajos dedicados al desarrollo de antenas fueron analizados a través de la teoría de los modos característicos para obtener pautas de diseño, con la observación de la distribución de las corrientes presentes en las estructuras, se logró predecir y validar el comportamiento en la fabricación de los modelos, un claro ejemplo de esta metodología es el trabajo presentado (Ramirez, Peñafiel, Araque, Cabedo, & Roemu, 2019), donde se presenta el análisis y la validación mediante la técnica de los modos característicos de dos antenas compactas que consta de dos puertos, donde obtienen conclusiones tales como: pueden ser usados en comunicaciones full-duplex, radio cognitivo y sistemas mimo. De igual manera, en la tesis doctoral de (Santillán Haro, 2020) se presenta el desarrollo de lentes metálicas con alta ganancia sobre un gran ancho de banda aplicando la teoría de los modos característicos para facilitar el diseño, optimización y el análisis de las lentes metálicas. Todo con base a la investigación de la significancia modal, el ángulo característico y la contribución de potencia de cada modo obtenido.

2.2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.2.1. Parámetros de una antena en transmisión.

Es pertinente conocer los parámetros que describen el comportamiento que manifiesta la antena, dichos parámetros son: Impedancia, intensidad de radiación, diagramas de radiación, directividad, polarización, ancho de banda y ganancia.

La impedancia se describe como la relación entre la tensión y la corriente presente en el puerto de entrada de la antena, se componen de una parte real y otra imaginaria, las cuales dependen de la frecuencia (Anguera & Pérez, 2008).

La antena es conectada al transmisor para lograr radiar la máxima potencia posible, las impedancias tanto del transmisor y la antena deberán estar acopladas.

La impedancia de entrada de la antena se la puede expresar mediante la ecuación (1):

$$\mathbf{Z}_A(\omega) = \mathbf{R}_A(\omega) + \mathbf{jX}_A(\omega) \quad (1)$$

De la misma forma que la impedancia de entrada, una de las características fundamentales de una antena, es su capacidad de irradiar ondas electromagnéticas a una dirección determinada, la intensidad de radiación es el parámetro que permite establecer una comparación con diferentes antenas, el mismo que se define como la potencia radiada por una antena por unidad de ángulo sólido (XueQing, 2014), se obtiene mediante la siguiente ecuación (2):

$$U = \frac{Pt}{\Omega} \quad (2)$$

Donde:

U = intensidad de radiación (W / ángulo sólido), Pt = potencia radiada, Ω = Angulo sólido. Producto de la radiación de la antena en diferentes direcciones del espacio, es necesario determinar este comportamiento mediante los diagramas de radiación, el cual no es más que la representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena basados en las diferentes direcciones del espacio en el sistema de coordenadas esféricas. Como el campo magnético se deriva directamente del campo eléctrico, la representación puede realizarse a partir de cualquiera de los dos, siendo norma habitual que los diagramas se refieran al campo eléctrico. En campo lejano, la densidad de potencia es proporcional al cuadrado del módulo del campo eléctrico, por lo que permite que la representación gráfica de un diagrama de potencia contenga la misma información que un diagrama de radiación de campo. (López, Díaz, & Sevilla, 2014)

Derivado de los diagramas de radiación, se puede establecer otra comparación, la cual define la relación existente entre la densidad de potencia radiada hacia una dirección a cierta distancia determinada y la densidad de potencia que radiaría a la misma distancia que una antena isotrópica, con la misma potencia que la antena transmisora (Huang & Boyle, 2008), a este parámetro se lo conoce como la directividad.

La directividad de una antena se puede medir a partir de la concentración de la potencia radiada a una dirección específica. También se lo logra entender como la capacidad de la antena para direccionar la energía radiada a un punto determinado, y se obtiene mediante la ecuación presentada a continuación:

$$D(\theta, \Phi) = \frac{P(\theta, \Phi)}{P_r/4\pi r^2} \quad (3)$$

Y si la dirección angular no es establecida, se sobreentenderá que la directividad obedece a la dirección de máxima radiación, siendo esta la directividad máxima de la antena. La máxima directividad se obtendrá mediante la ecuación (4):

$$D(\theta, \Phi) = \frac{P_{max}}{P_r/4\pi r^2} \quad (4)$$

El parámetro que es estrechamente relacionado con la directividad es la ganancia de la antena, el mismo que está ligado con la potencia que se le entrega a la antena. Teniendo en

cuenta que una antena real no irradia por completo la potencia que se le es suministrada, el porcentaje de pérdidas se dispersa en forma de calor.

En términos matemáticos la ganancia se expresa mediante la ecuación (5):

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{ent}} \quad (5)$$

Y, de la misma forma si G_0 es el valor de la ganancia de potencia en la misma dirección donde se encuentra la máxima radiación. Esta relación se describe por la ecuación (6).

$$G_0 = G(\theta, \varphi) \quad (6)$$

Por último, al intervalo de frecuencias dentro del cual el funcionamiento de la antena es óptimo, se lo conoce como ancho de banda, es siempre relativo y nunca suele hablarse en términos absolutos, la ecuación (7) describe la obtención en porcentaje dado la frecuencia central, máxima y mínima.

$$BW(\%) = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \times 100 \quad (7)$$

Se puede considerar que el ancho de banda es el rango de frecuencias alrededor de una frecuencia central (generalmente la frecuencia de resonancia), donde las características de la antena (como la impedancia de entrada, el patrón de radiación, la ganancia, la eficiencia, entre otros) se encuentran dentro de un margen aceptable.

2.2.2. Parámetros de una antena en recepción.

En recepción podemos proponer un modelo en donde la antena es una impedancia que es conectada directamente a un receptor, la impedancia de la antena receptora es directamente la transpuesta conjugada del generador, lo cual describe que la impedancia en una antena receptora será la misma impedancia de dicha antena si esta fuese representada como una antena transmisora.

Producto del frente de onda que incide en la antena receptora, la antena extrae potencia en un área de captación, el área y longitud efectiva describe la relación entre la potencia que la antena entrega a su carga y la densidad de la onda que incide, representa la porción física del frente de onda que la antena es capaz de interceptar y drenar la potencia hacia la carga. Mientras que la longitud efectiva de una antena se define como la relación entre la tensión en circuito abierto que aparece en los terminales de la antena y la intensidad del campo eléctrico en la dirección de la polarización de la antena.

2.2.3. Teoría de modos característicos.

La teoría de los modos característicos ayuda a definir un conjunto de características particulares de corrientes superficiales, estos modos son correspondientes a los autovectores de una autoecuación que tiene presente la matriz de impedancia generalizada del cuerpo conductor. La teoría fue desarrollada por Robert J. Garbacz (Garbacz R. , 1971). Estos modos presentan propiedades atractivas, puesto que no únicamente se enfocan en un análisis modal de objetos conductores, sino que también aportan información relevante para el diseño de antena, todo esto es derivado de la interpretación física de los fenómenos de radiación que tienen lugar en la antena (Mohamed-Hicho, Cabedo, Ferrando, & Antonino, 2018). Debido a que los modos característicos son independientes a cualquier tipo de excitación, el comportamiento se encuentra ligado principalmente a la forma y el tamaño del objeto conductor. Por consiguiente, el diseño de la antena mediante la aplicación de los modos característicos puede ser conformado en dos pasos: primero, se optimizan la forma y el tamaño del elemento radiante. Si se escala el tamaño del elemento, se modificará la frecuencia resonante de los modos; el segundo, mientras que, si varía la forma del elemento, no solo cambiará la frecuencia resonante, sino también alterará las propiedades de radiación de los modos. Se necesitan pocos modos para modelar cuerpos conductores eléctricamente pequeños.

Formulación matemática.

Según la tesis Doctoral descrita por (Cabedo Fabrés, 2007), la formulación matemática de la Teoría de los modos característicos para cuerpos conductores, inicia con la definición de una ecuación de un operador que relaciona la corriente J en la superficie S de un cuerpo conductor con el campo eléctrico incidente tangencial E^i .

$$[L(J) - E^i]_{tan} = \mathbf{0} \quad (8)$$

Donde el subíndice “tan” simboliza la componente tangencial de la superficie y $L(J)$ define el campo eléctrico que tiende a dispersarse debido a la corriente inducida J .

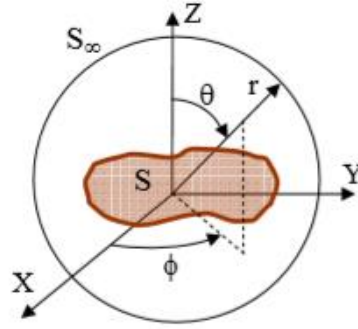


Figura 1. Escenario típico del cálculo de los modos característicos en el sistema de coordenadas.

Fuente: (Cabedo Fabrés, 2007)

Asociado a cada uno de los modos característicos definidos por \mathbf{J}_n existe un autovalor λ_n , el cual es un valor real. Para el desarrollo mediante el cálculo de las corrientes modales, es necesario comenzar definiendo la matriz de la impedancia generalizada de la estructura (Z), que posteriormente resuelta proporcionará un conjunto de auto funciones, que serán las corrientes modales (\mathbf{J}_n). Las mismas que podrán ser obtenidas mediante la ecuación (9).

$$\mathbf{X}(\vec{\mathbf{J}}_n) = \lambda_n \mathbf{R}(\vec{\mathbf{J}}_n) \quad (9)$$

R y X son las partes reales e imaginarias pertenecientes al operador de impedancia.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j\mathbf{X} \quad (10)$$

Este operador de impedancia se obtiene después de formular una ecuación integro diferencial. Se entiende por el teorema de reciprocidad que si Z es un operador lineal simétrico, entonces sus partes hermitianas R y X se proyectarán a ser operadores reales y simétricos. De esto se logra deducir que todos los autovalores λ_n son reales, y todas las autofunciones $\vec{\mathbf{J}}_n$ pueden definirse como reales o equiphasales (una constante compleja multiplicada por una función real) sobre la superficie en la que están definidas. Además, la elección de R como operador de ponderación en la ecuación (9) es responsable de las propiedades de ortogonalidad de los modos característicos, que se pueden resumir mediante las ecuaciones (11) y (12) respectivamente:

$$\langle \vec{\mathbf{J}}_m^*, \mathbf{R}(\vec{\mathbf{J}}_n) \rangle = \delta_{mn} \quad (11)$$

$$\langle \vec{\mathbf{J}}_m^*, \mathbf{X}(\vec{\mathbf{J}}_n) \rangle = \lambda_n \delta_{mn} \quad (12)$$

Donde δ_{mn} es el delta de Kronecker (0 si $mn \neq n$ y 1 si $m = n$).

Los modos característicos $\vec{\mathbf{J}}_n$ son principalmente caracterizados como las corrientes reales en la superficie de un cuerpo conductor, que solo dependen de la forma y el tamaño que

presenten, y son independientes de cualquier fuente de excitación específica. En la práctica para calcular los modos característicos de un cuerpo conductor en particular, este debe reducirse a su forma matricial, utilizando una formulación de Galerkin, la cual se expresa mediante la ecuación (13).

$$[\mathbf{X}]\vec{J}_n = \lambda_n[\mathbf{R}]\vec{J}_n \quad (13)$$

Interpretación física de los modos característicos.

Los modos característicos \vec{J}_n son principalmente caracterizados como las corrientes reales en la superficie de un cuerpo conductor, que solo dependen de la forma y el tamaño que presenten, y son independientes de cualquier fuente de excitación específica. En la práctica para calcular los modos característicos de un cuerpo conductor en particular, este debe reducirse a su forma matricial, utilizando una formulación de Galerkin, la cual se expresa mediante la ecuación (13).

Autovalores.

Basado en las definiciones expuestas en la tesis doctoral de (Wang S. , 2015) mismo que estuvo fuertemente influenciado de la investigación realizada por (Cabedo Fabrés, 2007), explica que el término λ_n corresponde al valor propio asociado al número del modo. Y a su vez expone que este término es importante debido a que la magnitud provee información respecto a la asociación de los modos radiantes. Se deduce que la potencia radiada por los modos es normalizada hacia la unidad del valor.

En comparación, la potencia que es considerada como reactiva es proporcional a la magnitud del valor propio, interpretando que un modo se encuentra en resonancia cuando su valor propio sea asociado al cero ($\lambda_n = 0$), infiriendo que entre más pequeñas sean las magnitudes del valor propio, mayor será la eficiencia de radiación del modo resonador cuando este se encuentre excitado. Por último, el autor explica que el signo del valor propio determina cuando un modo contribuye a guardar la energía de forma magnética como modos de inductancia ($\lambda_n > 0$); o contribuye guardando energía eléctrica como modos capacitivos ($\lambda_n < 0$).

Significancia modal.

Retomando el trabajo de (Cabedo Fabrés, 2007) se deduce que el desarrollo de un análisis de la variación del valor propio con la frecuencia, es de gran utilidad para el diseño de la antena, debido a la información de la frecuencia de resonancia de los modos.

$$MS_n = \left| \frac{1}{1 + j\lambda_n} \right| \quad (14)$$

La ecuación (14) figura la amplitud normalizada de los modos de corriente. Esta amplitud normalizada únicamente depende de la forma y tamaño del objeto conductor, sin la necesidad que intervenga una fuente de excitación. Derivando del valor propio, podemos establecer el dominio de la significación modal, dicho dominio es representado mediante la ecuación (15).

$$0 < Ms \leq 1 \quad (15)$$

Directamente un modo se puede interpretar que se encuentra en un estado de resonancia cuando la significancia modal asociada comprende un próximo valor de 1. Consecuentemente cuanto más cercano sea la significancia modal a 1, el modo se comportará con mayor eficiencia. Sin embargo, el signo de la significancia modal no puede determinar si el modo contribuye a almacenar energía magnética como modo de inductancia o energía eléctrica como modo de capacitancia.

El ancho de banda de un modo se puede establecer de acuerdo con el ancho de la curva de su significancia modal cerca del punto máximo. Podemos definir el ancho de banda radiante de un modo (BW_n) como el rango de frecuencias en las que la potencia irradiada por el modo no es inferior a la mitad de la potencia irradiada en la resonancia. Analizando las curvas de significancia modal, la media potencia (Half-Power) en resonancia corresponde a una reducción de la corriente normalizada en un factor 2. Esta relación se expresa mediante la ecuación (16).

$$MS_{HP-n} = \left[\frac{1}{1 + j\lambda_n} \right] = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707 \quad (16)$$

Por lo que, el ancho de banda de radiación de un modo BW_n puede entenderse como la fracción de la diferencia de frecuencia (superior menos inferior) sobre frecuencia de resonancia del modo. Es expresada mediante la ecuación (17).

$$BW_n = \frac{f_U - f_L}{f_{res}} \quad (17)$$

Ángulo Característico.

Desde un punto de vista que considere la interpretación física, el ángulo característico indicará la diferencia entre las fases de las corrientes características J_n y los campos característicos asociados E_n . Los ángulos característicos están definidos por la ecuación (18)

$$\alpha_n = 180^\circ - \tan^{-1}(\lambda_n) \quad (18)$$

Un modo resuena cuando su ángulo característico es igual a 180° . Por lo tanto, cuando el ángulo característico es cercano a 180° , el modo es un buen radiador, a su vez el ancho de banda radiante de un modo se puede obtener a partir de la pendiente en 180° de la curva descrita por el ángulo característico frente al eje de frecuencias.

Cuando el ángulo característico es cercano a 90° o 270° , el modo almacena principalmente energía. Además, a diferencia de la significancia modal, el valor del ángulo característico puede indicar si el modo contribuye a almacenar la energía magnética como modos de inductancia, en el caso de $90^\circ < \alpha_n < 180^\circ$, o la energía eléctrica como modo de capacitancia si, $180^\circ < \alpha_n < 270^\circ$.

A su vez, de la obtención de las gráficas del ángulo característico, podemos obtener el ancho de banda asociado al modo, el cual corresponde a los valores comprendidos entre 135 y 225 grados.

Fenómenos de acoplamiento en placas coplanares.

Otra perspectiva del análisis respecto a los modos característicos presentados en las antenas, es la identificación de las corrientes de los planos resonantes existentes en la estructura. Extrayendo las interpretaciones con base en la tesis de máster realizada por (Bayo, 2017), se define que los modos característicos presentes en dos planos que se colocan una al lado de otra, la diferencia de fase entre las corrientes determinara si la estructura a cierta frecuencia trabaja en modo antena o como modo línea de transmisión (Peñañiel Ojeda, Cabedo-Fabrés, Antonino-Daviu, & Ferrando-Bataller, 2017).

Cuando la dirección de las corrientes entre el plano superior e inferior están en sentido inverso, la estructura se establece que es un modo línea de transmisión, mientras que, si las corrientes entre los planos separados presentan la misma fase se determina que está trabajando en modo antena. La distribución puede darse tanto de forma vertical como horizontal. En la figura 2, se presenta los modos característicos de corriente en un dipolo

circular, diferenciados si la distribución de corriente de las placas está en fase o contrapuestas una de la otra. De la misma figura se puede observar que existe un punto de alimentación en medio de los dos planos resonantes, cuatro modos son expuestos, el modo J_1 presenta un nulo de corriente en la posición de alimentación y las corrientes de los planos se encuentran en fase, de igual forma 3 modos más son presentados, pero a diferencia del primero, los nulos de corrientes son desplazados hacia otras direcciones, además que la distribución de corriente comienza a presentar comportamientos irregulares.

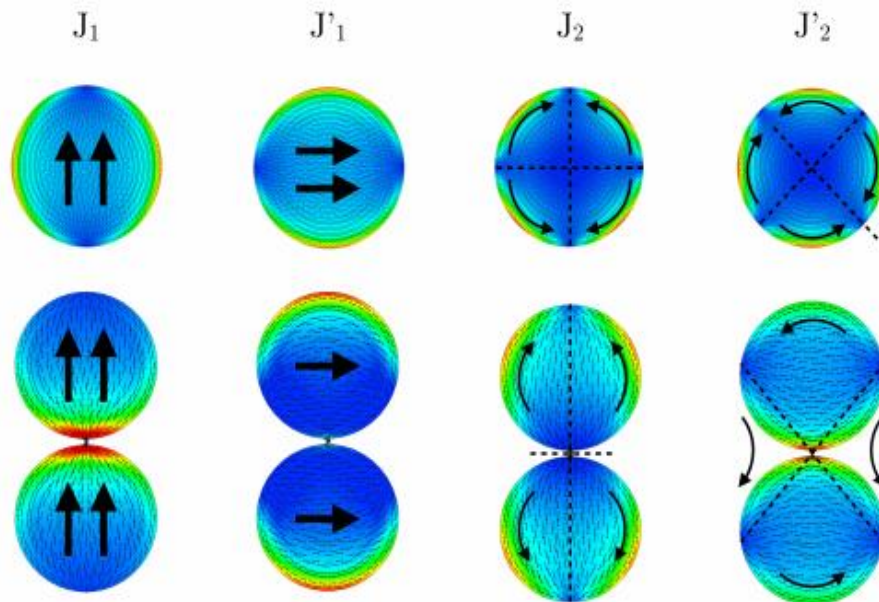


Figura 2. Fenómeno de acoplamiento en placas coplanares en un dipolo circular.

Fuente: (Bayo, 2017)

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. TIPO DE ESTUDIO

3.2. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

3.2.1. Método Descriptivo.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1. POBLACIÓN.

La población como objeto de estudio serán los valores de las mediciones obtenidas a través de los simuladores electromagnéticos de los parámetros S_{11} menores a -10dB, medidas de RCS menores a -10dB y ángulos característicos iguales a 180°.

3.4. FUENTES DE INFORMACIÓN

Se ha realizado una revisión sistemática de documentos de varias bases de datos científicas, tales como Scopus, IEEE Xplore en donde se puede acceder a información de investigadores que han aportado trabajos en la formación de metasuperficies, diseños de antenas de ultra ancho banda ancha, entre otros. También se ha consultado revisiones y estudios con base a los resultados que respaldan la viabilidad del proyecto, incluyendo información relevante de absorbedores electromagnéticos en varias áreas de estudio, páginas de fabricantes de dispositivos embebidos, videos que den la posibilidad de conocer el posible diseño de la metasuperficie final.

3.5. INSTRUMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los instrumentos de investigación aplicados en la elaboración del presente proyecto de investigación, hacen referencia al uso de tres categorías: Observación directa, procedimientos experimentales y análisis de documentos.

- Observación directa: Básicamente es la selección explícita de aquello que se desea analizar por medio de la visualización a detalle de una o varias situaciones que permitan llegar a cumplir los objetivos propuestos inicialmente.
- Procedimientos experimentales: Basa su concepto en el uso del contexto, prueba y error para definir un resultado que nos permite identificar su correcto funcionamiento.

- Análisis de documentos: En su mayoría publicaciones científicas, revistas, papers y manuales de dispositivos electrónicos, a fin de fundamentar la viabilidad de proyecto.

Los instrumentos para el desarrollo de este proyecto son:

- Software Matlab
- Software CST Studio Suite 2018
- Software Altair FEKO

3.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Variables Independientes			
Variables	Concepto	Indicadores	Técnicas e instrumentos
Rango de frecuencias	Frecuencias de trabajos	<ul style="list-style-type: none"> • Frecuencias entre 2-10 GHz • Coeficiente de reflexión inferiores a -10 dBm 	Comparación de parámetros.
Diseño de la antena.	Con base a los modelos de las antenas de ultra ancho de banda UWB	<ul style="list-style-type: none"> • Antenas planas • Modelos de patches • Métodos de alimentación 	Software CST Studio Suite
Variables Dependientes			
Variables	Concepto	Indicadores	Técnicas e instrumentos
Parámetros en transmisión	Parámetros de grado de funcionalidad de la antena en modo de transmisión.	<ul style="list-style-type: none"> • Ancho de banda • Eficiencia • Directividad • Ganancia • Acoplamiento de impedancias 	Simulador electromagnético.
Parámetros en Recepción	Parámetros de grado de funcionalidad de la	<ul style="list-style-type: none"> • Parámetros S • Reflexión 	Simulador electromagnético.

	antena en modo de recepción		
--	-----------------------------	--	--

Tabla 1.Operacionalización de variables

Fuente:(Autor)

3.7. PROCEDIMIENTOS Y ANÁLISIS

Para el diseño de la metasuperficie con reducción del radar cross section se realizó una serie ordenada de procesos, que en armonía cumplirán con los objetivos propuestos.

A continuación, se menciona los procesos a seguir para la investigación propuesta:

1. Proponer y modificar un modelo para la antena microstrip.
2. Simulación y optimización del modelo microstrip en CST Studio.
3. Evaluación de la antena en transmisión y recepción en CST Studio con condiciones de borde.
4. Traspasar la antena con el mejor rendimiento en cuanto a resultados a Altair Feko.
5. Configurar el solucionador de Altair Feko para la obtención de los modos característicos.
6. Recopilar los resultados obtenidos durante las simulaciones y contrastar con resultados logrados por otros investigadores con propósitos similares.

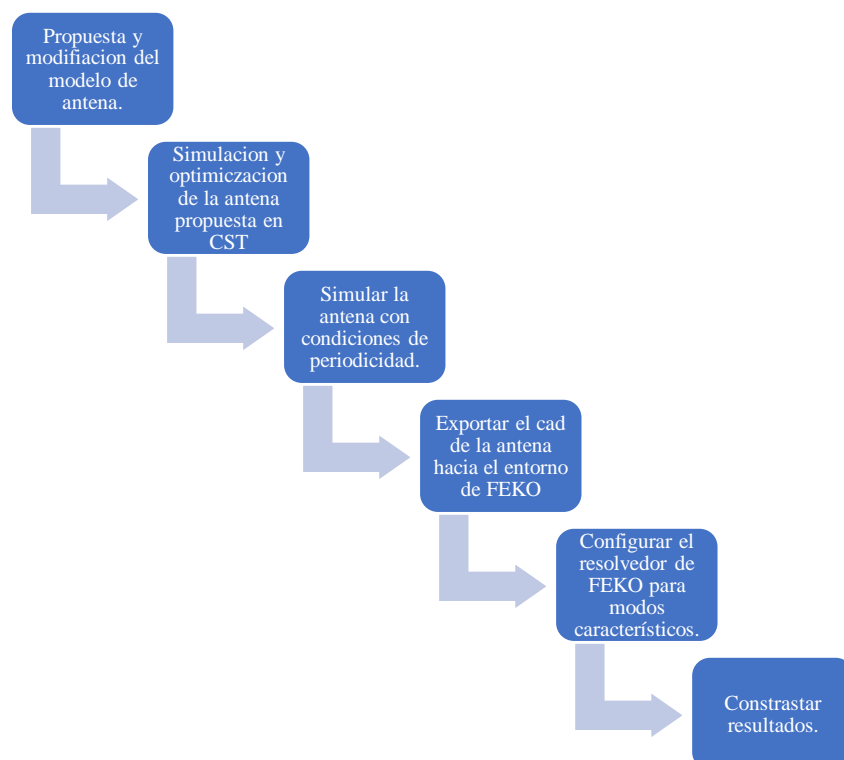


Figura 3. Procedimientos para la creación del proyecto de investigación

Fuente: (Autor)

3.7.1. Propuesta y diseño de la antena.

Para la propuesta de la metasuperficie, se eligió que la estructura unitaria sea conformada con base en la geometría circular de una antena microstrip, cuya frecuencia de resonancia fue establecida a 2.9 GHz.

El sustrato elegido para conformar la antena es FR4, el cual cumple con las siguientes especificaciones en los simuladores.



Figura 4. Placa de fibra de vidrio (FR4)

Fuente: (Autor)

- Constante dieléctrica (ϵ_r): 4,4
- Tangente de pérdidas: 0.02
- Espesor del cobre: 0.035 mm
- Espesor del sustrato: 1.6 mm

Para la obtención del radio de forma matemática de la antena microstrip nos basamos en las fórmulas empleadas en (Vijayalakshmi, Dinesh, & Rubasri, 2020), tal y como se presenta a continuación:

$$F = \frac{8.791 \cdot 10^9}{f_r \cdot (\sqrt{\epsilon_r})} = 1.445 \quad (19)$$

$$R = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi \cdot \epsilon_r \cdot F} \left[\ln \left[\frac{\pi F}{2h} \right] + 1.7726 \right] \right\}^2} \approx 12 \text{ mm} \quad (20)$$

Donde:

- F = Representa a un valor constante.
- f_r = Frecuencia de resonancia (GHz).
- ϵ_r = Constante dieléctrica del material.
- h = Altura del sustrato (cm).
- R = Radio del círculo (mm).

Teniendo en cuenta estas especificaciones técnicas de diseño, debemos modificar la geometría base, esto se logra tomando en cuenta las consideraciones del modelo para que sea optimizado en respuesta a los valores que deseamos obtener.

Debido a la naturaleza del proyecto de investigación, el modelo final propuesto a elegir se basó en la experiencia y comparación de geometrías aplicadas por distintos investigadores y de forma personal. Por lo se decidió usar la siguiente forma de la estructura unitaria para la composición de la metasuperficie.

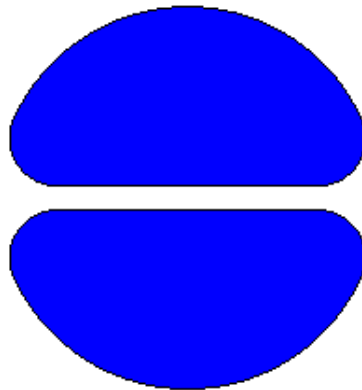


Figura 5. Forma propuesta para la estructura unitaria de la metasuperficie

Fuente: (Autor)

La alimentación de la estructura unitaria propuesta ha sido simulada y optimizada mediante un sistema multipuerto para una impedancia de entrada de $50 \Omega + 0 j$ a lo largo del rango de frecuencias requeridas.

3.7.2. Simulación del modelo en CST Microwave Studio.

Después de tomar en cuenta las condiciones iniciales de la geometría y materiales de composición de la estructura unitaria, procedemos a la simulación de nuestro modelo en el software CST Microwave Studio:

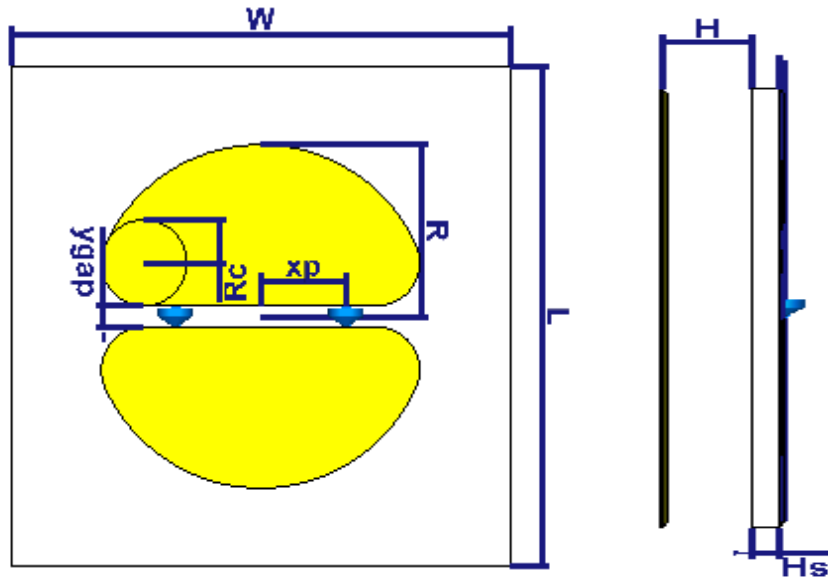


Figura 6. Vista 3D de la estructura unitaria propuesta (frontal y lateral).

Fuente:(Autor)

Variables	Valor [mm]
W	35
L	35
R	12
H	5
H_s	1.6
H_c	0.035
y_{gap}	1.5
X_p	6
R_c	3

Tabla 2. Parámetros optimizados de la antena propuesta.

Fuente: (Autor)

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los simuladores fueron configurados y adaptados para cumplir con los requisitos de periodicidad de la estructura unitaria propuesta y a su vez logren los criterios de Ultra ancho de banda.

Para establecer los criterios de funcionalidad y definir el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos en el proyecto de investigación, los resultados obtenidos son analizados mediante las simulaciones en lo que se refiere a parámetros de dispersión, gráficas de impedancias de entrada, diagramas de radiación, ganancias, directividad, eficiencia y RCS.

4.1. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA UNITARIA.

En la figura 7, se presenta el coeficiente de reflexión de la estructura unitaria sin combinación de puertos, además, del comportamiento del coeficiente de reflexión de la misma estructura cuando existe la combinación de los dos puertos propuestos.

Para la estructura sin combinación de puertos, los parámetros de dispersión presentan un acoplamiento menor a -10 dB en el rango de frecuencias de 2.42 a 3.32 GHz, el que a su vez representa un ancho de banda característicamente estrecho, definido por la ecuación (6) se estima el valor del 31.03% para el ancho de banda, asimismo, se identifica que la frecuencia de resonancia es de 2.9GHz a un nivel de -13.15 dB. Paralelamente, la estructura con combinación de puertos refleja acoplamientos menores a -10 dB en el margen de frecuencias que comprenden los valores correspondientes a 3.39 GHz y 6.83 GHz, además el ancho de banda calculado comprende un valor de 67.31 %, también destacan dos puntos de resonancia a través del rango de evaluación de frecuencias, siendo estas a 3.98 GHz y 5.81 GHz, con valores próximos a -19.08 dB y de -20.38 dB respectivamente.

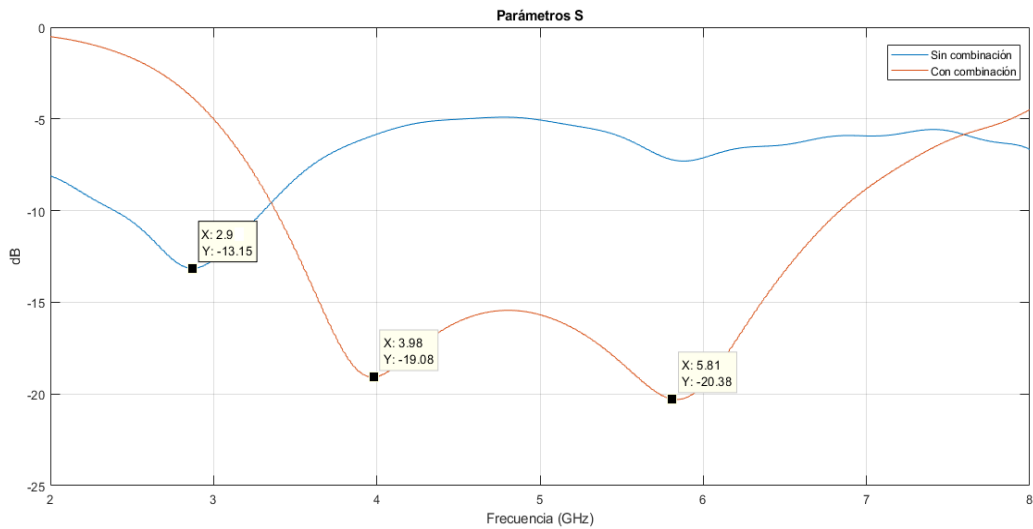


Figura 7. Parámetros S11 de la estructura unitaria con y sin combinación de puertos

Fuente: (Autor)

En la figura 8, se ilustra el comportamiento de la impedancia que toma la estructura propuesta, las componentes reales e imaginarias para las frecuencias de 3.98 GHz y 5.81 GHz adjudican valores de $50 + 10.56j \Omega$ y $45.97 - 7.96j \Omega$ respectivamente. En vista de que los valores obtenidos son próximos a 50Ω , se deduce que la antena se encuentra acoplada.

Por otro lado, se evidencia que las componentes imaginarias de la impedancia asocian valores que oscilan entre 10.56Ω y -7.96Ω para las frecuencias donde existen resonancia.

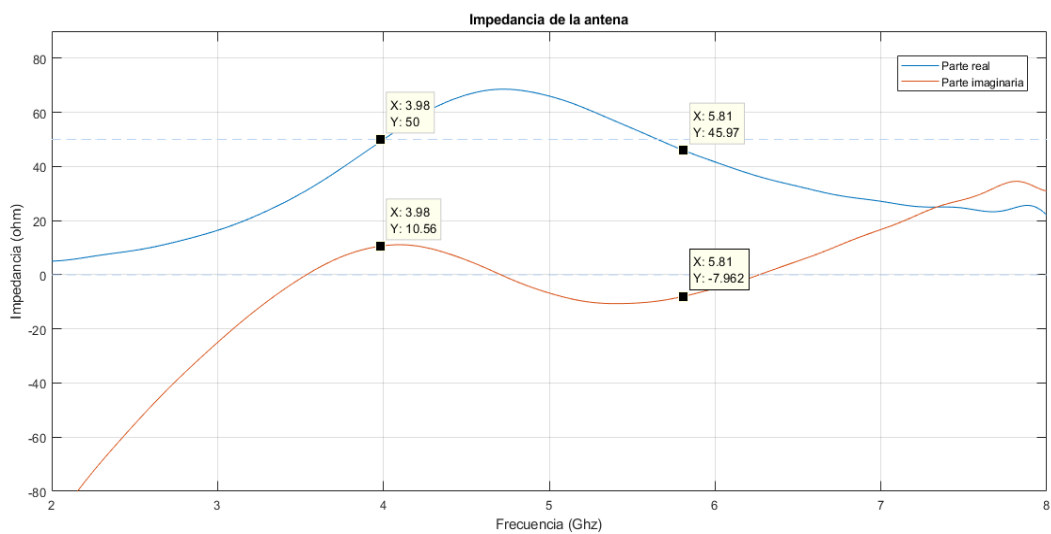


Figura 8. Parámetros Z de los puertos combinados.

Fuente: (Autor)

No obstante, en modo de recepción a fin de que la antena presente el mayor ancho de banda fue necesario el cálculo de los valores de inductancia y capacitancia que permitan crear un puerto agrupado para disminuir la reactancia presente en el modelo propuesto. Se establece dos valores de reactancia, las cuales pertenecen a las resonancias percibidas anteriormente, siendo estas a 3.98 GHz y 5.81 GHz, estos valores serán obtenidos mediante la ecuación (21).

$$Y_{in} = \frac{1}{Z_{in}} \quad (21)$$

$$Y_{in_{3.98GHz}} = \frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{50+j10.56} = \mathbf{0.01914 - j0.00404}$$

$$Y_{in_{5.81GHz}} = \frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{45.97-j7.96} = \mathbf{0.02112 + j0.00365}$$

Consecuentemente, luego de obtener la reactancia, podemos obtener el cálculo de los valores del capacitor mediante la ecuación (22) y la impedancia con la ecuación (23).

$$C_p = \frac{-imag(Y_{in})}{w} = \mathbf{0.1616pF} \quad (22)$$

$$Z_{in} || Z_c = \frac{1}{Y_{in_{4GHz}} + Y_{c_{4GHz}}} = \mathbf{52.24 \Omega} \quad (23)$$

Por consiguiente, se puede obtener la figura 10, la cual describe el comportamiento en parámetros S de la estructura en modo de recepción, a su vez este recibe un puerto agrupado en la entrada, siendo estos los valores calculados en las ecuaciones (22) y (23).

Es pertinente recalcar que en la estructura el parámetro de dispersión presenta un acoplamiento menor a -10 dB en el rango aproximado de frecuencias que comprende 3.1 GHz hasta 6.5 GHz. La estructura fue excitada mediante una onda plana con ángulos de incidencia de $\Theta=0$ y $\Phi=0$, además, está condicionada a contornos de periodicidad y en el plano de Z_{min} coincide con una pantalla de plano de masa y será establecido como $E_t=0$, el cual es considerada como un plano infinito.

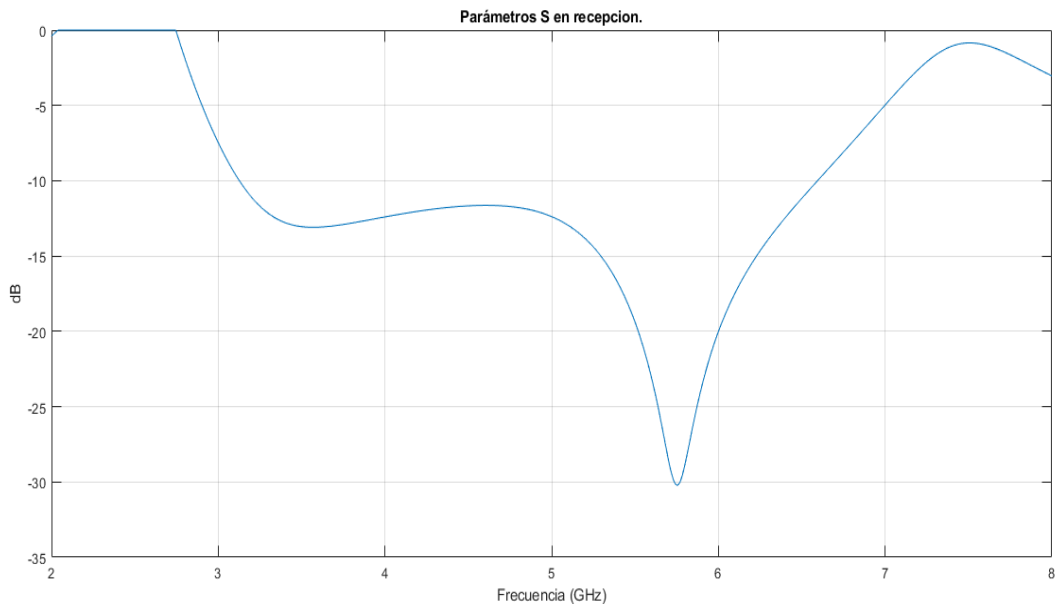
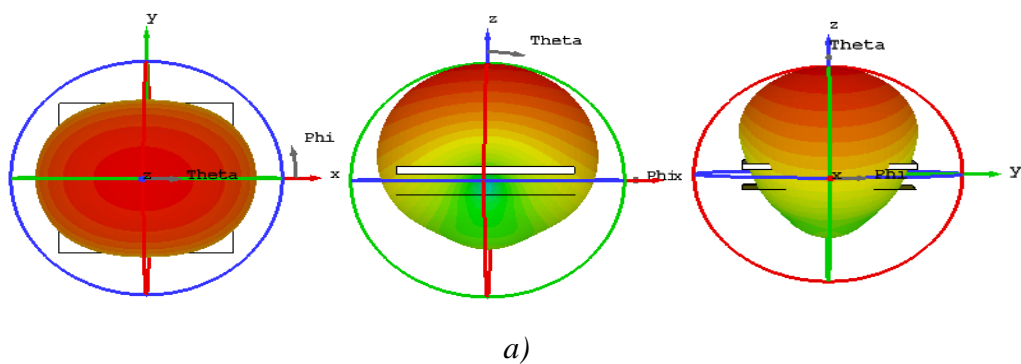


Figura 9. Parámetros S, antena en modo de recepción

Fuente: (Autor)

Luego de haber realizado el análisis de las gráficas de los parámetros de reflexión y valores de impedancias fue necesario interpretar la forma en la que la estructura está irradiando, para ello nos basamos en los diagramas de radiación. CST Studio nos permite visualizar los comportamientos en forma de 3D y en coordenadas polares.

Analizando la figura 10 podemos afirmar que el diagrama de radiación en 3 dimensiones es similar a las dos frecuencias de evaluación e irradia en el eje z, el cual se entiende como la dirección contraria de la cara frontal de la antena. No obstante, el valor de la ganancia a la frecuencia de 3.98 GHz es 4,33 dB, mientras que, la frecuencia de 5.81 GHz la ganancia alcanza el valor de 6.57 dB.



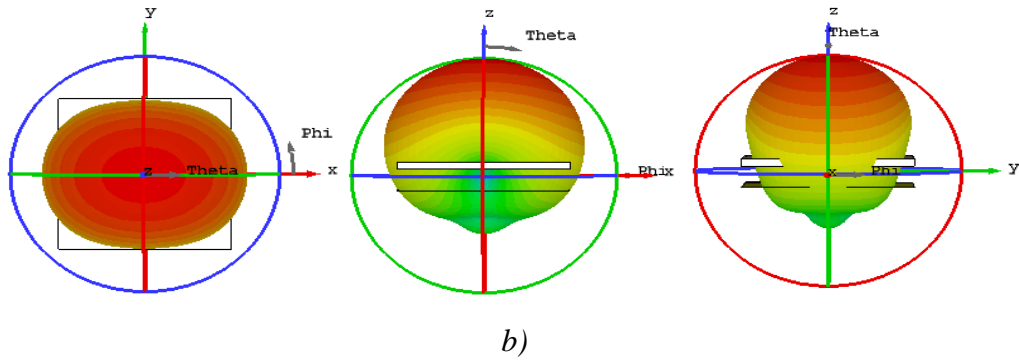


Figura 10. Diagrama de radiación de la estructura unitaria, (a) 4 GHz (Vista frontal, plano XZ, plano YZ) y (b) 5.81 GHz (Vista frontal, plano XZ, plano YZ)

Fuente: (Autor)

En la figura 11, se observa los patrones de radiación en coordenadas polares perteneciente a la estructura unitaria con los puertos combinados a la frecuencia de 3.98 GHz y 5.81 GHz, donde se asevera que la antena presenta los valores de ganancia mencionados con anterioridad.

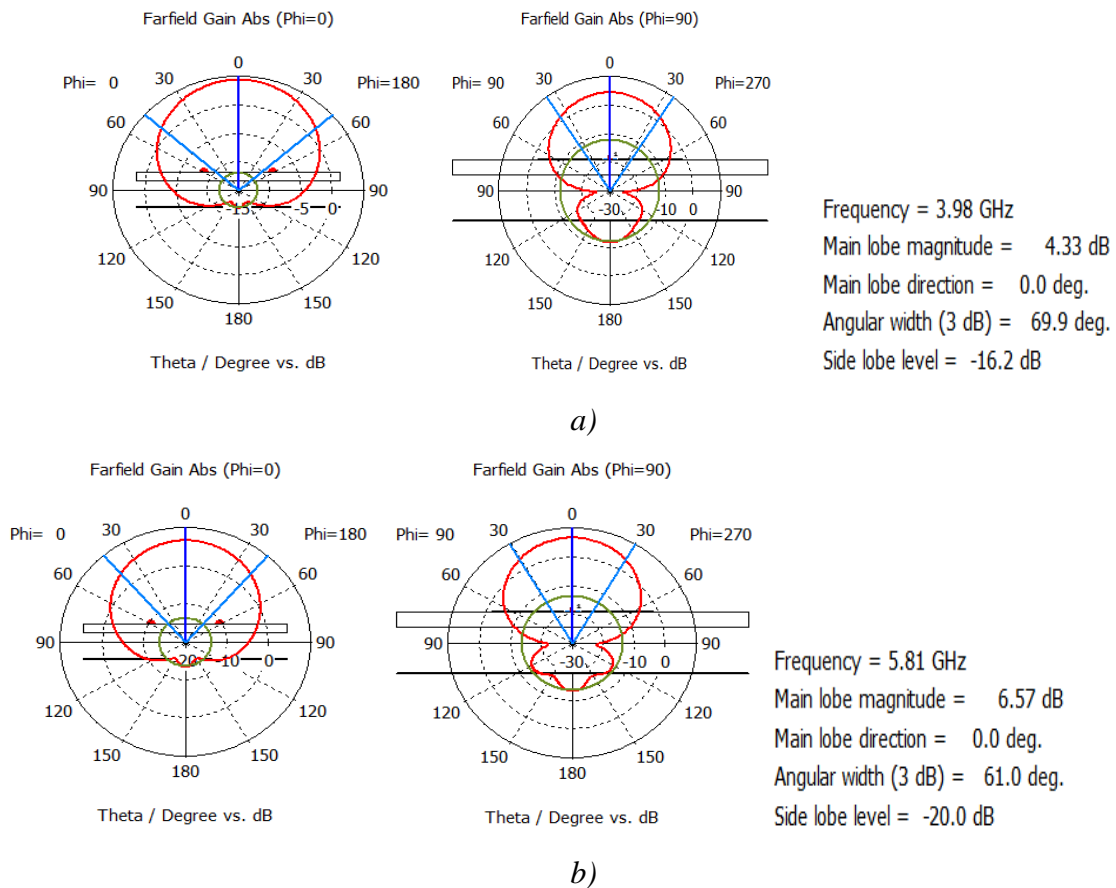


Figura 11. Representación en graficas polares de, (a) ganancia a 3.98 GHz ($\Phi=0$, $\Phi=90$), y (b) ganancia a 5.81 GHz ($\Phi=0$, $\Phi=90$).

Fuente: (Autor)

Posteriormente, con base en los resultados podemos calcular el valor de la eficiencia de radiación, la cual describe la relación entre la ganancia y directividad de nuestra antena a las frecuencias de 3.98 GHz y 5.81 GHz. Tal y como se muestra en la ecuación (24):

$$\eta = \frac{G}{D} \quad (24)$$

$$\eta_{3.98\text{GHz}} = \frac{G}{D} = 0.9$$

$$\eta_{5.81\text{GHz}} = \frac{G}{D} = 1$$

Verificando los valores de eficiencia obtenidos mediante la simulación, se procede a comparar el resultado obtenido del cálculo matemático siendo estos para las dos frecuencias de resonancia valores muy cercanos a 1. Como se puede observar en la figura 12, la frecuencia de 3.98 GHz presenta una eficiencia de 0.983, mientras que en el caso de la frecuencia de 5.81 GHz obtiene un valor de 0.985, estos valores de eficiencia son muy próximos a 1, partiendo esta información, se corrobora que tanto los valores simulados y calculados matemáticamente concuerdan.

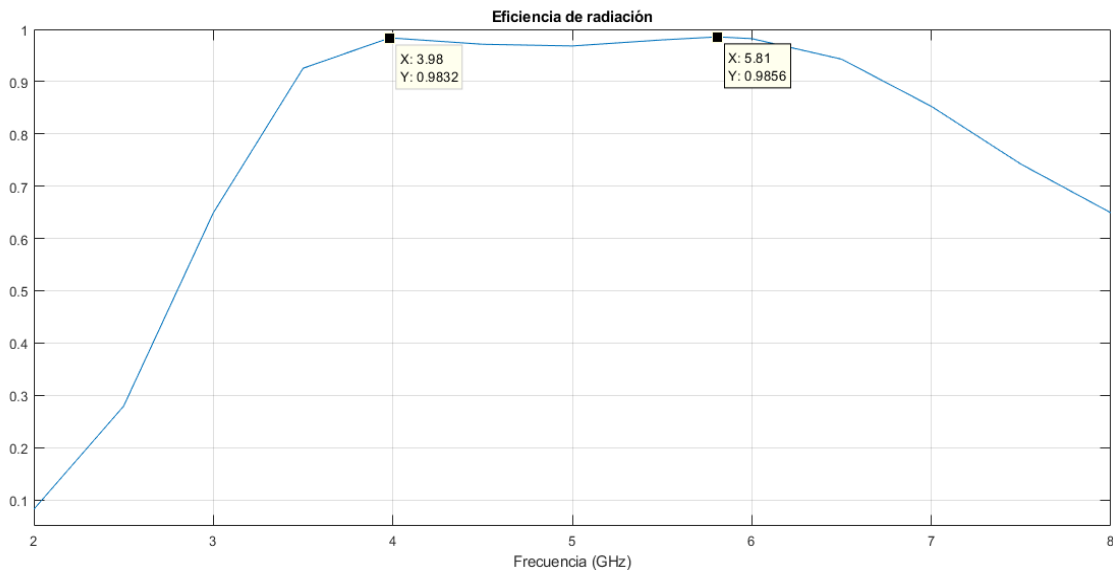


Figura 12. Valores de eficiencia de CST Studio de la estructura unitaria con puertos combinados

Fuente: (Autor)

4.2 ANÁLISIS DE LOS MODOS CARACTERÍSTICOS.

Para la evaluación de los resultados de los modos característicos presentes en la estructura unitaria fue necesario seleccionar los modos más significativos con base en la interpretación

física de los ángulos característicos. Se puede apreciar en la figura 13, que 5 modos fueron los seleccionados por la información que estos proveen a través del rango de frecuencia de 2 GHz a 12 GHz. Los 5 modos presentan una convergencia en el eje del ángulo característico con un valor de 180° . El primer ángulo característico se presenta a 3.68 GHz, el segundo a 5.81 GHz, el tercero a 5.89 GHz, el cuarto a 8.11 GHz y el último a 8.71 GHz.

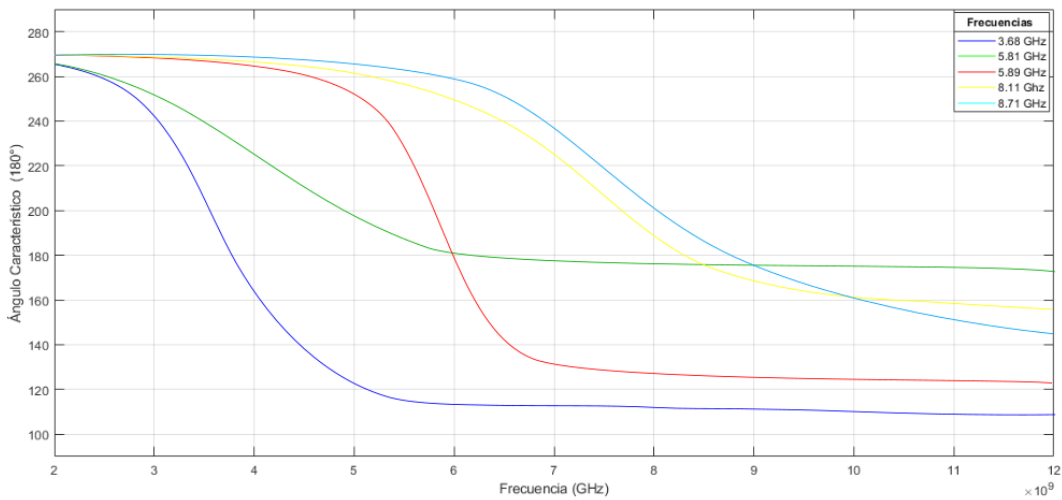
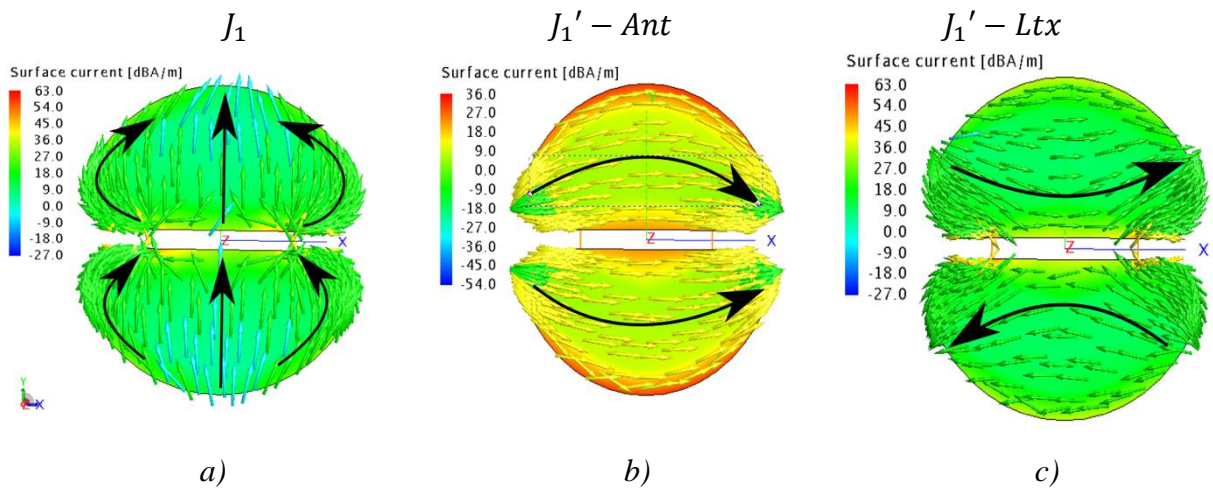


Figura 13. Ángulos característicos presentes en la estructura unitaria.

Fuente: (Autor)

En la figura 14 se aprecia los modos característicos de corriente pertenecientes a la estructura a la frecuencia de conjunción de 180° , en vista de la distribución de las corrientes características sabemos que los modos J_1' horizontal y J_2' se encuentran en modo antena, mientras que el modo J_1' vertical encuentran en modo línea de transmisión.



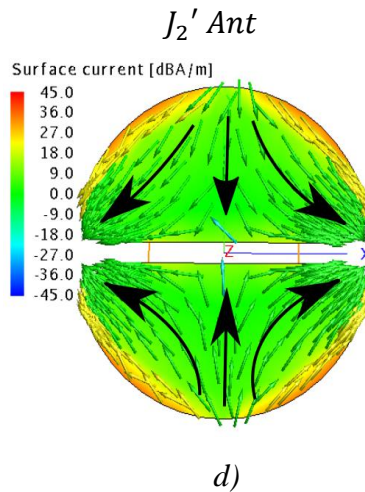


Figura 14. Distribución de corrientes de la estructura, a) modo J_1 a 3.7 GHz b) modo J_1' a 5.81 GHz (modo Antena), c) modo J_1' a 5.86 (modo línea transmisión), d) modo J_2' a 8.11GHz (modo antena)..

Fuente (Autor)

Para comprobar lo anteriormente descrito, es posible visualizar mediante la figura 15 el aporte de potencia de los modos característicos en relación con la potencia total existente en la estructura excitada, siendo la mayor contribución a través del rango de frecuencias la potencia otorgada por el modo J_1 . También se logra apreciar la contribución de potencia del modo J_1 a 8.78 GHz (conforme aumenta la frecuencia, los campos y la distribución de corrientes tienden a comportarse de manera más compleja, por lo que algún modo existente en frecuencias más altas tiende a acoplarse con el punto de excitación), el cual también contribuyen en menor medida a la potencia total de la estructura en el rango de frecuencias de evaluación.

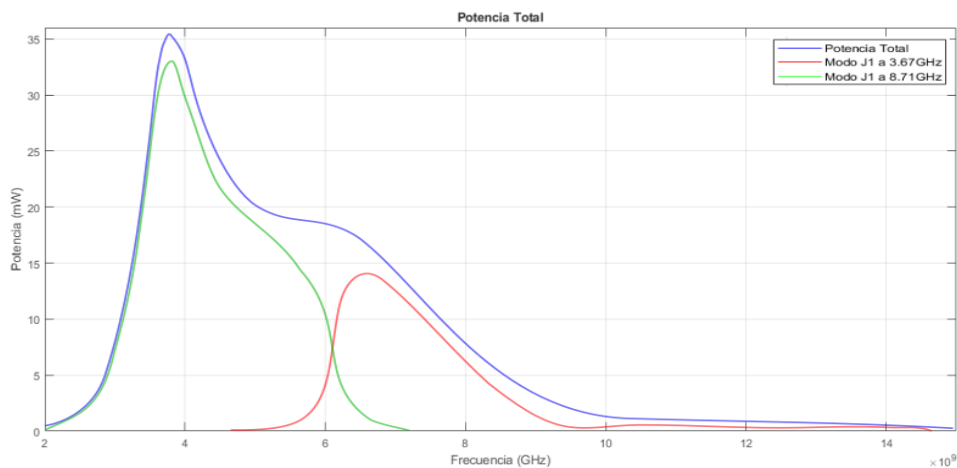


Figura 15. Aporte de potencia de los modos a la potencia total de la estructura.

Fuente: (Autor)

4.3 CONTRASTE DE RESULTADOS DE METASUPERFICIES.

En última instancia, para verificar que la estructura presenta un bajo RCS entre el rango de frecuencias de evaluación, se obtiene la gráfica 16, la cual a su vez representa el RCS en términos de dB. Además, en la presente figura se observa que la estructura presenta niveles satisfactorios de RCS, considerando que las estructuras con valores por debajo de -10 dBsm se expresan como estructuras con RCS bajos. Además, se logra apreciar un valor de -17.31 dBsm en la frecuencia de 3.98 Ghz y -23.42 dBsm para la frecuencia de 5.81 Ghz cuando en la estructura presenta una onda que incide con ángulos de Theta=0 y Phi=0.

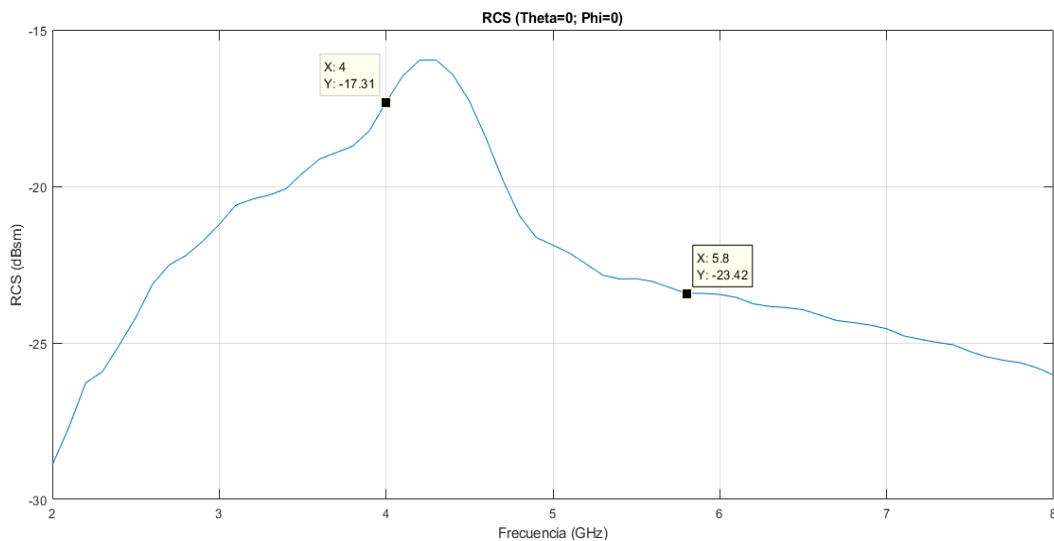


Figura 16. RCS de la estructura propuesta.

Fuente: (Autor)

Lo anteriormente expuesto en la Figura 18 nos permite realizar un contraste entre antenas que presentan una disminución de sus valores de RCS, las antenas fueron escogidas con base en la frecuencia de operación de la antenna propuesta, las cuales cumplen en trabajar en porciones o banda completa del rango de frecuencias logrado, con la observación de la Figura 17 podemos concluir que la antenna propuesta mantiene un comportamiento estable de bajo RCS a lo largo del margen de frecuencias de evaluación, siendo estos dentro y fuera de la banda de operación.

Por otro lado, la antenna denominada en esta investigación como “antena 1” propuesta por (Huang, Shen, & Omar, 2017) presenta valores inferiores al de nuestra estructura a la frecuencia de 4 Ghz, teniendo una diferencia de aproximadamente de 6.25 dBsm. No

obstante, en la segunda frecuencia de resonancia a 5.81 GHz nuestro diseño refleja un valor próximo a -24 dBsm, conformándose como el valor de menor RCS en comparación al resto de las antenas.

Sin embargo, cabe mencionar que la antena propuesta por (Modi, Balanis, Birtcher, & Shaman, 2017) el cual lo identificaremos como “antena 2”, presenta dos picos de reducción de RCS dentro de banda a la frecuencia de 4.74 GHz con un valor igual a -30.05 dBsm y el otro pico a la frecuencia de 6.7 GHz con un valor de -31.02 dBsm. Simultáneamente, la “antena 3”, fue desarrollada en la investigación de (Zhu, y otros, 2018), la misma presenta un RCS semi estable a lo largo del rango de evaluación de frecuencias, pero manteniéndose siempre con valores superiores a los presentados por nuestra estructura

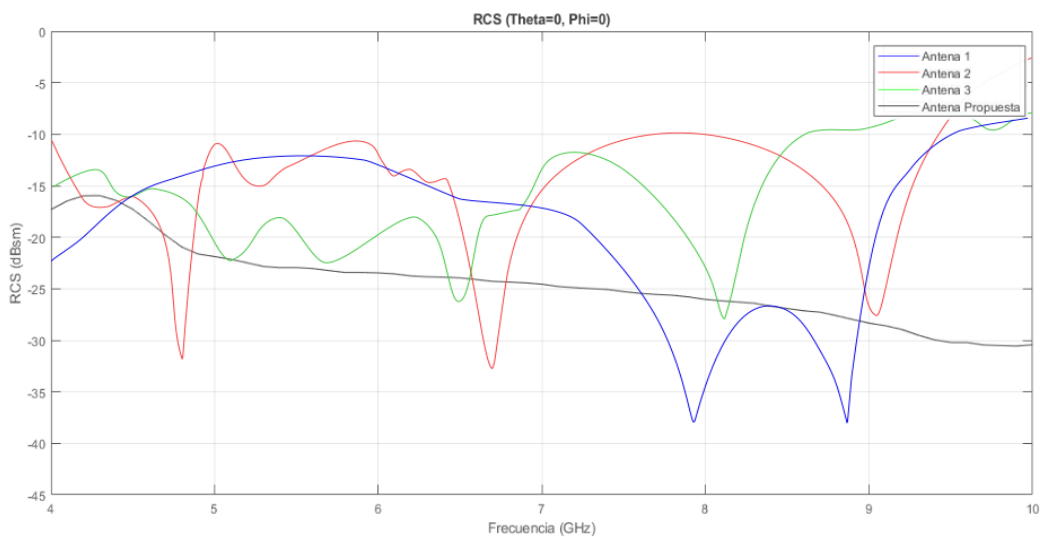


Figura 17. Comparación del RCS

Fuente:(Autor)

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- En la presente investigación se ha diseñado una antena microstrip mediante el uso de los softwares: CST Studio y Altair Feko, la cual hace las veces de estructura unitaria de una metasuperficie que presenta un acoplamiento menor a -10 dB en el rango de frecuencias de 3.41 a 6.77 GHz.
- Se observó que la implementación de los modos característicos en conjunto con el software de simulación FEKO permite la descripción del comportamiento de la estructura unitaria de la metasuperficie, dentro de un rango de frecuencias definido y demostrando así, la capacidad de la estructura para irradiar y el desempeño en absorción.
- La aplicación de los modos característicos al diseño de las antenas presenta una gran ventaja de análisis frente a los fenómenos de distribución de corrientes característicos que se presentan en las estructuras independientemente de su forma de excitación, además el uso de los modos característicos para la optimización de absorbedores electromagnéticos resulta ser innovativa y funcional
- Las metasuperficies con las cuales se contrastaron los resultados fueron escogidas en función a los niveles de RCS que presentaban sus antenas, las cuales pueden ser contrastadas y servir como prueba fehaciente de la reducción del radar cross section en el rango de frecuencias operativo de la estructura propuesta en esta investigación.
- La estructura presenta un nivel satisfactorio en cuanto a valores de RCS a través del espectro de frecuencias que van desde 2 GHz a 8 GHz, presentándose una curva variante referente a los valores menores a -15 dBsm.
- La estructura presenta bajo RCS también en la banda de frecuencias de 3GHz a 4GHz, siendo esta una ventaja debido a que en otros estudios no representan resultados.

5.2. RECOMENDACIONES

- Para las estructuras multipuerto es indispensable la combinación de los puertos para obtener las gráficas de los parámetros S de la antena, además de ello se debe considerar las condiciones de contorno en la que la antena estará evaluada.

- Se recomienda considerar que el simulador electromagnético Altair FEKO no permite establecer sustratos con pérdidas para la obtención de los modos característicos.
- Se debe establecer el correcto número de modos y saltos de frecuencias a evaluar en FEKO, puesto que determinan la suavidad con la que las curvas de los modos característicos son presentadas en los resultados.
- Para obtener los modos característicos de cualquier estructura, se debe considerar la combinación de los modos a fin de formar una curva completa a través del margen de frecuencias establecidas para la revisión.
- En la distribución de corrientes obtenidas por los modos característicos, se debe considerar la existencia de ceros absolutos, para así tener una perspectiva clara de cuál es el patrón de comportamiento y dirección que las corrientes pertenecientes a la estructura obedecen.
- Para la obtención de la curva del RCS, se debe considerar una evaluación de radar monoestático y además que los ángulos de la onda que incide a la estructura tanto Theta como Phi, deben tener un valor igual 0.

BIBLIOGRAFIA

- Costa, F., Genovesi, S., & Manara, G. (2020). Reader Antennas Requirements in Chipless RFID Systems with Linear and Circular Polarization. *2020 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*. doi:10.1109/iWAT48004.2020.1570609801
- Nejatijahromi, M., Naghshvarianjahromi, M., & Rahman, M. (2018). Compact CPW Fed Switchable UWB Antenna as an Antenna Filter at Narrow-Frequency Bands. *Progress In Electromagnetics Research C*. doi:10.2528/PIERC18010818
- Abdo Sánchez, E., Epstein, A., & Eleftheriades, G. (2018). *Implementación de antena leaky-wave basada en metasuperficie de Huygens*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10630/16412>
- AL-Amoudi, M. A. (2021). STUDY, DESIGN, AND SIMULATION FOR MICROSTRIP PATCH ANTENNA. *International Journal of Applied Science and Engineering Review*. doi:10.52267/IJASER.2021.2201
- Anguera, J., & Pérez, A. (2008). *Teoría de antenas*. (L. Vicent, Ed.) Barcelona.
- Babu, K. J., Sai, L. S., Divya, G., Mohammed, Y. T., & Hussaini, M. A. (2020). DESIGN OF A KEY SHAPED UWB ANTENNA AND ANALYSIS USING CHARACTERISTIC MODES. *Telecommunications and Radio Engineering*, 1129-1139. doi:0.1615/TelecomRadEng.v79.i13.30
- Balani, W., Sarvagya, M., Ali, T., Manohara Pai M. M, Jaume Anguera, & Das, S. (2019). Design Techniques of Super-Wideband Antenna—Existing and Future Prospective. *IEEE Access* . doi:10.1109/ACCESS.2019.2943655
- Balanis, C. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design* (4th Edition ed.). John Wiley & Sons, Inc. Obtenido de <https://www.wiley.com/en-ir/Antenna+Theory%3A+Analysis+and+Design%2C+4th+Edition-p-9781118642061>
- Balanis, C. A., & Modi, A. Y. (2019). Metasurfaces for Radar Cross-Section Reduction. *IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems*.
- Bayo, L. M. (2017). *Diseño de antenas de banda ancha para aplicaciones de microondas*. Universitat Politècnica de Valencia.
- Bukhari, S., Vardaxoglou, J., & Whittow, W. (2019). A Metasurfaces Review: Definitions and Applications. *State-of-the-Art Frequency Selective Surfaces (FSSs)*, 9 - 13.
- C, D., & M, I. (1993). *Antennas for Medical Applications*. Boston: Springer, Boston, MA. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2638-4_8
- Cabedo Fabrés, M. (2007). *SYSTEMATIC DESIGN OF ANTENNAS USING THE THEORY OF CHARACTERISTIC MODES*. Valencia.
- Chimborazo Pujos, L. (2017). *Diseño de una antena microstrip con polarización circular para el laboratorio de antenas*. Quito.
- Choi, S., Park, J., Kim, S., & Park, J. (2014). A new ultra-wideband antenna for UWB applications. *Microwave and optical technology letters*, 399-401. doi:<https://doi.org/10.1002/mop.11392>
- Contreras, A., & Urdaneta, M. (2018). Antenas de banda ultra ancha para sistemas de comunicaciones en las bandas de microondas: Una revisión. *Revista INGENIERÍA UC*, 25(2).
- Dey, S. (2011). *Design and Performance Analysis of Narrow Band Textile Antenna for Three Different Substrate Permittivity Materials and Bending Consequence*. Loughborough, UK: 1978-1-4577-1016.
- Dickmen, C., Cimen, S., & Cakir, G. (2014). Planar octagonal-shaped UWB antenna with reduced radar cross section. *IET Microwaves Antennas and Propagation*, 2946-2953.

- Dikmen, C., Cimen, S., & Cakir, G. (2013). Design of double-sided aze-shaped ultra-wideband antenna with reduced radar cross-section. *IET Microwaves Antennas and Propagation*, 571-579.
- Fang, C., Tan, H., Liu, Q.-F., Tao, L., Xiao, L., Chen, Y., & Hua, L. (2018). The Calculation and Analysis of the Bistatic Quantum Radar Cross Section for the Typical 2-D Plate. *IEEE Photonics Journal*. doi:10.1109/JPHOT.2018.2818819
- Garbacz, R. (1971). A generalized expansion for radiated and scattered fields. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. doi:10.1109/TAP.1971.1139935
- Garbacz, R. J. (s.f.). A generalized expansion for radiated and scattered fields. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. doi:10.1109/TAP.1971.1139935
- Genovesi, S., Costa, F., & Monorchio, A. (2012). Low-profile array with reduced radar cross section by using hybrid frequency selectice surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2327-2335.
- Genovesi, S., Costa, F., & Monorchio, A. (2014). Wideband radar cross section reduction of slot antennas arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 163-173.
- Genovesi, S., Filippo, C., & Monorchio, A. (2014). Wideband Radar Cross Section Reduction of Slot Antennas Arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation (Volume: 62 , Issue: 1 , Jan. 2014)*, 163 - 173. doi: 10.1109/TAP.2013.2287888
- González, E. L. (2016). *Diseño de una antena parche circular dualband con polarización circular para sistemas de telemetría y telecomando de satélites*. Pamplona.
- Guital Mansilla, C., Muñoz Brandau, E., & Fierro Morineau, N. (2017). *Antenas inteligentes y su desempeño en redes wireless*. Valdivia.
- Harrington, R., & Mautz, J. (1971). Theory of characteristic modes for conducting bodies. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. doi:10.1109/TAP.1971.1139999
- HAVKAR. (s.f.). *Havkar*. Obtenido de <http://www.havkar.com/en/blog/view/microstrip-patch-antennas/85>
- Holloway, C. L., DeLyser, R. R., German, R. F., McKenna, P., & Kanda, M. (1997). Comparison of electromagnetic absorber used in anechoic and semi-anechoic chambers for emissions and immunity testing of digital devices. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (Volume: 39 , Issue: 1 , Feb 1997)*, 33 - 47. doi: 10.1109/15.554693
- Huang, C., Pan, W., Xiaoliang, M., & Xiangang, L. (2015). Wideband Radar Cross Section Reduction of a Stacked Patch Array Antenna Using Metasurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*.
- Huang, H., Shen, Z., & Omar, A. (2017). 3-D Absorptive Frequency Selective Reflector for Antenna Radar Cross Section Reduction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 5908 - 5917. doi:10.1109/TAP.2017.2751670
- Huang, Y., & Boyle, K. (2008). *ANTENNAS, from theory to practice*. Wiley.
- IEEE. (6 de Marzo de 2013). 145-2013 - IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas. (IEEE, Ed.) doi:10.1109/IEEESTD.2014.6758443
- Imani, M., Gollub, J., Yurduseven, O., Diebold, A., Boyarsky, M., Fromenteze, T., . . . Smith, D. (2020). Review of Metasurface Antennas for Computational Microwave Imaging. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1860 - 1875. doi:10.1109/TAP.2020.2968795
- Jiang, H., Xue, Z., Weiming, L., Ren, W., & Cao, M. (2016). Low-RCS High-Gain Patially Reflecting Surface Antenna With Metamaterial Ground Plane. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* , 4127-4132.
- Jiang, W., Gong, Q., Gong, S.-x., Hong, T., & Qiao, Z.-z. (2011). Novel ultrawideband monopole antenna with miniaturized size. *Microwave and optical technology letters*.

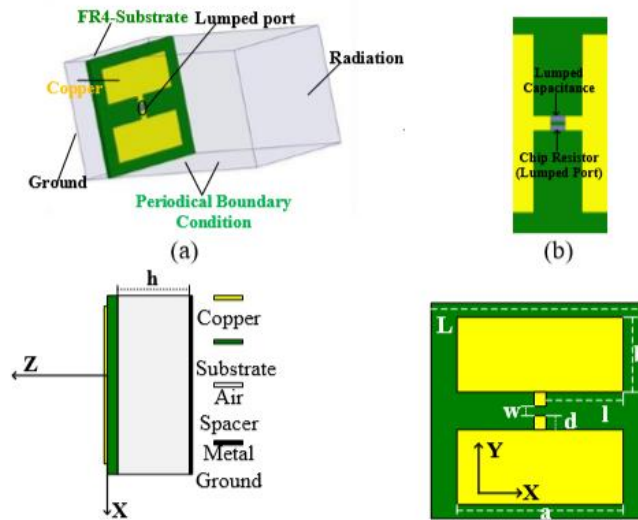
- Jiménez, C. A. (2011). *Dipolo impreso para aplicaciones Wi-i y caracterización de la ganancia por medio de la celda TEM*. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.
- Jung, J., Choi, W., & Choi, J. (2005). A small wideband microstrip-fed monopole antenna. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* (Volume: 15 , Issue: 10 , Oct. 2005), 703 - 705. doi:10.1109/LMWC.2005.856834
- Li, H.-P., Wang, G., Cai, T., Liang, J.-G., & Gao, X. (2018). Phase- and Amplitude-Control Metasurfaces for Antenna Main-Lobe and Sidelobe Manipulations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 5121 - 5129. doi:10.1109/TAP.2018.2858181
- Li, S.-J., Gao, J., Cao, X.-y., Zhao, Y., Zhang, Z., & Liu, H.-X. (2015). Loading metamaterial perfect absorber method for in-band radar cross section reduction based on the surface current distribution of array antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation* (Volume: 9 , Issue: 5 , 4 13 2015), 399 - 406. doi:10.1049/iet-map.2014.0490
- Li, T., & Chen, Z. N. (2019). State-of-the-Art Frequency Selective Surfaces (FSSs). Granda, Spain: IEEE. doi:10.1109/APWC.2019.8870430
- Liu, Y., Jia, Y., Zhang, W., & Li, F. (2020). Wideband RCS Reduction of a Slot Array Antenna Using a Hybrid Metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68, 3644 - 3652. doi:10.1109/TAP.2019.2963575
- López, J., Díaz, I., & Sevilla, A. (2014). Introducción al análisis y diseño de. *Revista de la escuela de Física*, 17. doi:10.5377/ref.v2i2.8285
- Ma, Y., Wang, J., Shi, L., Xue, S., Ran, Y., Li, J., & Liu, Y. (2021). Ultra-wideband, optically transparent, and flexible microwave metasurface absorber. *Optical Materials Express*, 2206-2218. doi:10.1364/OME.426685
- Martínez Lozano, A., Blanco Angulo, C., García Martínez, H., Gutiérrez Mazón, R., Torregrosa Penalva, G., Ávila Navarro, E., & Sabater Navarro, J. M. (2021). UWB-Printed Rectangular-Based Monopole Antenna for Biological Tissue Analysis. *Numerical Methods and Measurements in Antennas and Propagation*. doi:10.3390/electronics10030304
- Martínez Vázquez, M., Sánchez Hernández, D., & Balbastre Tejedor, J. V. (2003). *Antenas integradas para terminales móviles de tercera generación*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Modi, A., Balanis, C., Birtcher, C., & Shaman, H. (2017). Novel Design of Ultrabroadband Radar Cross Section Reduction Surfaces Using Artificial Magnetic Conductors. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 5406 - 5417. doi: 10.1109/TAP.2017.2734069
- Mohamed, I., Abdalla, M., & Mitkees, A.-a. (2019). TX/RX radar array antennas with small correlation. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. doi:https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.02.001
- Mohamed-Hicho, N. M., Cabedo, M., Ferrando, M., & Antonino, E. (2018). Designing Slot Antennas in Finite Platforms Using Characteristic Modes. *IEEE Access*. doi:10.1109/ACCESS.2018.2847726
- Mohanty, A., & Ranjan Beherab, B. (2021). Insights on radiation modes and pattern diversity of two element UWB fractal MIMO antenna using theory of characteristics modes analysis. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. doi:10.1016/j.aeue.2021.153726
- Muñoz, M., Brizzi, A., & Hao, Y. (2012). *Antennas and Propagation for Body-Centric Wireless Communications: Current Status, Applications and Future Trend*. London : iWem .

- Muñoz, M., Yilmaz, T., & Hao, Y. (2013). *Wearable Wireless Sensors for Healthcare Applications*. London: Publicaciones Crown.
- Nieto Escribano, J. M. (10 de enero de 2018). Diseño de un array de antenas parche con alimentacion en serie a 60 GHz. Pamplona.
- O, B., O, D., G, S., Christos, K., O, Q.-T., & B.L.G, J. (2018). Wireless Sensor Network Utilizing Radio-Frequency Energy Harvesting for Smart Building Applications [Education Corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine (Volume: 60 , Issue: 5 , Oct. 2018)*, 13. doi:10.1109/MAP.2018.2859196
- Olan Nuñez, K. (2019). *Diseño, Modelado y Caracterización de arreglo de antenas microstrip para aplicaciones del internet de las cosas*.
- Panda, P., & Ghosh, D. (2013). Mushroom-like EBG structures for reducing RCS of patch antenna arrays. *2013 International Conference on Microwave and Photonics(ICMAP)*.
- Pazokian, M., Konjani, N., & Karimipour, M. (2018). Broadband RCS Reduction of Microstrip Antenna Using Coding Frequency Selective Surface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 1382 - 1385. doi:10.1109/LAWP.2018.2846613
- Peñafiel Ojeda, C. R., Cabedo-Fabrés, M., Antonino-Daviu, E., & Ferrando-Bataller, M. (2017). Design of an Unidirectional UWB Cavity Backed Antenna. *2017 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications (NEMO)*. doi:10.1109/NEMO.2017.7964176
- Rahman , M., NagshvarianJahromi , M., Mirjavadi, S., & Hamouda, A. (2019). Compact UWB Band-Notched Antenna with Integrated Bluetooth for Personal Wireless Communication and UWB Applications. *Electronics*. doi:https://doi.org/10.3390/electronics8020158
- Raithatha, U., & Sreenath Kashyap, S. (Abril de 2015). Microstrip Patch Antenna Parameters, Feeding Techniques & Shapes of the Patch - A survey. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6.
- Rajesh, N., Malathi, K., Raju, S., Kumar, V., Prasath, S., & Alsath, M. (2017). Design of Vivaldi antenna with wideband radar cross section reduction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2102-2105.
- Raza Rizvi, S. N., Abbas Awan, W., & Hussain, N. (2021). Design and Characterization of Miniaturized Printed Antenna for UWB Communication Systems. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 1003-1010. doi:10.1007/s42835-020-00630-3
- Roig, F. J. (2015). *DISEÑO DE UNA ANTENA DE PARCHE DE*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Roudjane, M., Khalil, M., Miled, A., & Messaddeq, Y. (October 2018). *New Generation Wearable Antenna Bases on Multimaterial Fiber for Wireless Communication and Real-Time Breath Detection*. Canada: Photonics.
- S.Hall, P., Hao, Y., & Alomainy, A. (June 2007). *Antennas and Propagation for On-Body Communication Systems*. Pisa, Italy: Via G. Caruso 16,56122.
- Salamin, M. A., Ali, W. A., & Zugari, A. (2019). A novel UWB antenna using capacitively-loaded fork-shaped resonator and modified fork-shaped DMS for interference mitigation with WiMAX and WLAN applications. *Journal of Instrumentation*. doi:10.1088/1748-0221/14/03/P03008
- Sambasiva Nayak, R., & Singh, R. P. (2018). Performance and Improvement of Various Antennas in Modern Wireless Communication System. *Global Journal Of Computer Science and Technology: Network , Web & Security*.

- Sang, D., Chen, Q., Ding, L., Guo, M., & Fu, Y. (2019). Design of Checkerboard AMC Structure for Wideband RCS Reduction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2604 - 2612. doi:10.1109/TAP.2019.2891657
- Sharad Kulkarni, J. (2020). An ultra-thin, dual band, Sub 6 GHz, 5G and WLAN antenna for next generation laptop computers. *Circuit World*. doi:https://doi.org/10.1108/CW-07-2019-0076
- Shi, Y., Meng, Z. K., Wei, W. Y., Zheng, W., & Li, L. (2019). Characteristic Mode Cancellation Method and Its Application for Antenna RCS Reduction. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 1784 - 1788. doi:10.1109/LAWP.2019.2929834
- Singh, T., Nikolic Stevanovic, M., & Kolundzija, B. (2019). Survey and Classification of Antennas for Medical Applications. *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*.
- Ur Rahman, S., Cao, Q., Gil, I., Sajjad, M., & Wang, Y. (2020). Design of Wideband Beamforming Metasurface with Alternate Absorption. *IEEE Access*.
- Valdez, A., Miranda, C., Schlesinger, P., Chiozza, J., & Grela, A. (2018). Calidad de servicio en redes de telecomunicaciones. doi: http://dx.doi.org/10.30972/eitt.402894
- Vázquez, M. M. (2003). *Antenas integradas para terminales móviles de tercera generación*. Valencia.
- Verma, H., Kumar, M., Meena, R., & Singh, S. (2020). A low RCS wideband high gain CP slot antenna loaded with frequency selective surface. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 940-959. doi:10.1080/09205071.2020.1761459
- Vernieri, J., & Gross, P. (2016). Aplicación de la teoría de modos característicos al estudio de absorbedores. *2016 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, (pág. 2016). La Plata. doi:10.1109/ARGENCON.2016.7585321
- Vijayalakshmi, J., Dinesh, V., & Rubasri, s. (2020). Design And Analysis Of High Gain 2x1, 4x1, 8x1 and 8x8 Circular Patch Antenna Arrays For 2.4Ghz Applications. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*.
- Wang, C., Chen, Y., & Yang, S. (2019). In-Band RCS Reduction of a U-Slot Microstrip Patch Antenna. *2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES)*. doi:10.23919/ACES48530.2019.9060515
- Wang, J., Li, Y., Jiang, Z. H., Shi, T., Tang, M.-C., Zhou, Z., . . . Qiu, C.-W. (2020). Metantenna: When Metasurface Meets Antenna Again. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1332 - 1347. doi:10.1109/TAP.2020.2969246
- Wang, S. (2015). *Characteristic modes analysis for antenna parameters optimization*. Yokohama.
- Xian Qi, L., Peng, M., Zhang, P., Chen, Z., & Fan, Y. (2016). Development of a Resistor-Loaded Ultrawideband Absorber With Antenna Reciprocity. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation (Volume: 64 , Issue: 11 , Nov. 2016)*, 4910 - 4913. doi:10.1109/TAP.2016.2598202
- Xie, D., Liu, X., Guo, H., Yang, X., Liu, C., & Zhu, L. (2017). A wideband abdorber with a multiresonant gridded-square FSS for antenna RCS reduction. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 629-632.
- Xu, Z., Ding, C., Zhou, Q., Sun, Y., & Huang, S. (2019). A Dual-Band Dual-Antenna System with Common-Metal Rim for Smartphone Applications. *Microwave and Wireless Communications*. doi:https://doi.org/10.3390/electronics8030348
- Xue, J., Jiang, W., & Gong, S. (2017). Wideband RCS Reduction of Microstrip Array Antenna Based on Absorptive Frequency Selective Surface Microstrip Resonator. *International Journal of Antennas and Propagation*.

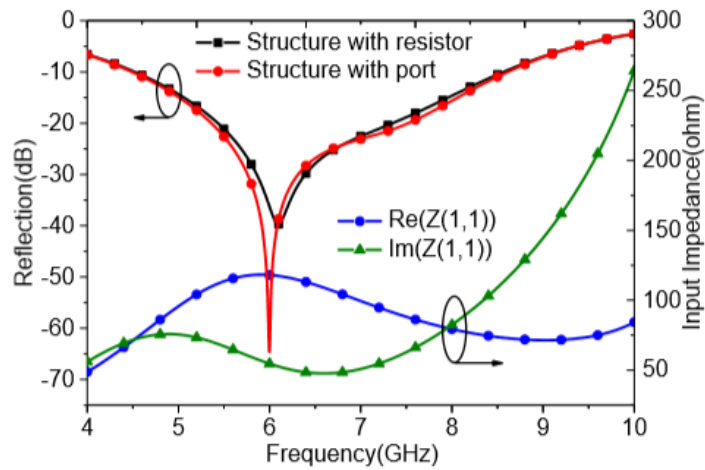
- XueQing, Y. (2014). *Diseño de antenas de tipo parche para un transceptor WiMAX basado en el chip MAX2838*. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- Y. Zheng, J. G.-1. (s.f.).
- Yi, Z., Jun, G., Xu, Y., Tao, L., Wenqiang, L., & Sijia, L. (2016). Broadband Low-RCS Metasurface and Its application on Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.
- Yu, W., Yu, Y., Wang, W., Zhang, X. H., & Luo, G. Q. (2021). Low-RCS and Gain-Enhanced Antenna Using Absorptive/Transmissive Frequency Selective Structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1-1. doi:10.1109/TAP.2021.3083756
- Zhang, W., Liu, Y., Gong, S., Wang, J., & Jiang, Y. (2018). Wideband RCS Reduction of a Slot Array Antenna Using Phase Gradient Metasurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17, 2193-2197. doi:10.1109/LAWP.2018.2870863
- Zhao, Y., Gao, J., XY, C., T, L., & LM, X. (2017). In-band RCS reduction of waveguide slot array using metasurface bars. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 943-947.
- Zhu, X., Gao, J., Zhu, B., Wang, J., Tang, Y., Yu, H., & Wang, S. (2018). A low-RCS, wideband and circularly polarized metasurface antenna. *2018 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*. doi:10.1109/IEEE-IWS.2018.8400892

ANEXOS



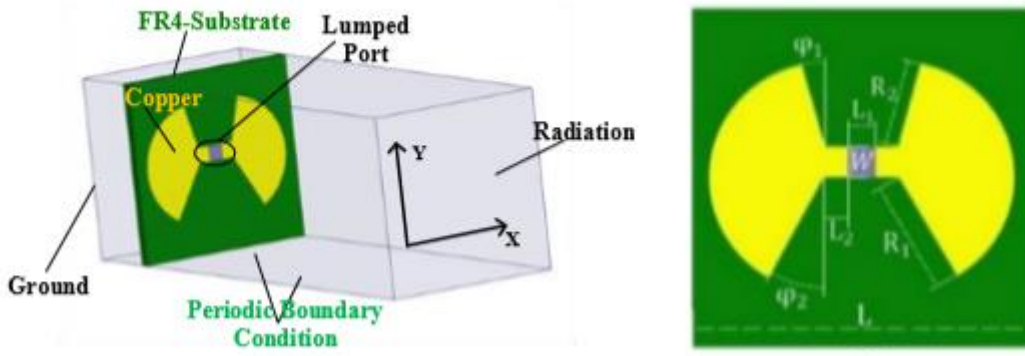
Anexo 1. Modelo de una metasuperficie con gran ancho de banda

Fuente: (Xian Qi, Peng, Zhang, Chen, & Fan, 2016)



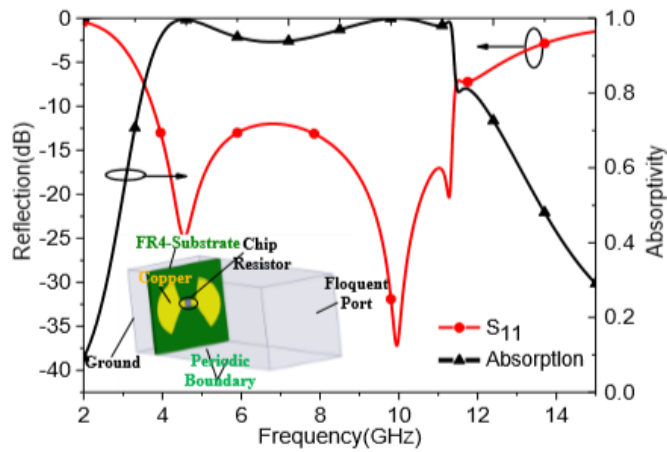
Anexo 2. Impedancia de entrada del conjunto de antenas dipolo y la comparación del coeficiente de reflexión de la antenna aleatoria con puerto y resistencia, respectivamente.

Fuente: (Xian Qi, Peng, Zhang, Chen, & Fan, 2016)



Anexo 3. Geometría de una metasuperficie con forma de abanico con gran ancho de banda y absorción de señales electromagnéticas.

Fuente: (Xian Qi, Peng, Zhang, Chen, & Fan, 2016)



Anexo 4. La reflexión y transmisión de la estructura de absorción mencionada anteriormente.

Fuente: (Xian Qi, Peng, Zhang, Chen, & Fan, 2016)