

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

Parametrización de estructuras metamateriales mediante la aplicación de un algoritmo bioinspirado para filtros en comunicaciones a nivel de simulación

Realizado por

Katherin Gyssell Olivera Dimaté



Grupo de Investigación GED (Grupo de Estudio y Desarrollo en Robótica)
Facultad de Ingeniería Electrónica
División de Ingenierías

2024

Parametrización de estructuras metamateriales mediante la aplicación de un algoritmo bioinspirado para filtros en comunicaciones a nivel de simulación

Realizado por

Katherin Gyssell Olivera Dimaté

Proyecto de Grado presentado en cumplimiento del requisito parcial
para optar por el grado de Ingeniería Electrónica

Dirigido por

Armando Mateus Rojas

Codirigido por

Iván Eduardo Díaz Pardo

Gustavo Adolfo Higuera Castro

Grupo de Investigación GED (Grupo de Estudio y Desarrollo en Robótica)
Facultad de Ingeniería Electrónica
División de Ingenierías

2024

Autoridades de la Universidad

RECTOR GENERAL

R.P. FRAY ÁLVARO JOSÉ ARANGO RESTREPO, O.P.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL

R.P. FRAY HERNÁN YESID RIVERA ROBERTO, O.P.

VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL

R.P. FRAY MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P.

SECRETARIO GENERAL

Dra. INGRID LORENA CAMPOS VARGAS

DECANO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

R.P. FRAY JAVIER ANTONIO HINCAPIÉ ARDILA, O.P.

SECRETARIA DE DIVISIÓN

E.C. LUZ PATRICIA ROCHA CAICEDO

DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PHD. CARLOS ANDRÉS TORRES PINZÓN

Nota de aceptación

Firma del autor

Firma del jurado

Firma del jurado

Advertencia

La Universidad Santo Tomás no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados en el trabajo de grado, solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no tenga ataques personales y únicamente se vea el anhelo de buscar la verdad científica.

Capítulo III –Art. 46 del Reglamento de la Universidad Santo Tomás.

Dedicatoria

A mis padres y hermanos, por sembrar en mí el amor por el conocimiento, la tenacidad ante los desafíos y la búsqueda incesante de la superación. A ellos dedico este trabajo, como muestra de mi agradecimiento por su infinito apoyo, sacrificio y amor.

Katherin Gyssell Olivera Dimaté

Agradecimientos

A mi familia, quienes son mi pilar fundamental. Por su amor infinito, apoyo incondicional, por impulsarme a superar las adversidades, por celebrar cada logro conmigo con gran alegría y entusiasmo que me motivaba a seguir adelante. Este título no es solo mío, sino también de ustedes.

A mi pareja, quien ha sido mi compañero incondicional a lo largo del camino. Por su invaluable apoyo en las largas horas de estudio, su confianza en mis habilidades, por recordarme que soy capaz de hacer grandes cosas y por ser mi respaldo en los momentos difíciles.

A mi director de tesis, quien desde mi primer día en la universidad me enseñó la belleza de la ingeniería, me defendió ante las injusticias y quien emprendió conmigo la exploración de un nuevo campo científico.

A mis codirectores, por su orientación, apoyo y valiosos consejos. Agradezco su paciencia, dedicación y compromiso, que me han inspirado a superar cada desafío a lo largo de este proceso.

Katherin Gysell Olivera Dimaté

Índice general

Lista de Figuras	IX
Lista de Tablas	XI
Glosario	XII
1. Resumen	1
2. Abstract	3
3. Introducción	5
3.1. Planteamiento del Problema	6
3.2. Objetivos	7
3.2.1. Objetivo General	7
3.2.2. Objetivos Específicos	8
3.3. Justificación	8
3.4. Impacto Social	9
4. Estado del Arte	12
4.1. Filtros en Comunicaciones Inalámbricas	12
4.2. Metamateriales	13
4.3. Frequency Selective Surfaces (FSS)	15
4.4. Frequency Selective Surfaces (FSS) y técnicas metaheurísticas	16
4.5. Síntesis de Investigación	16
5. Marco Teórico	17
5.1. Filtros	17
5.1.1. Pasabandas RLC	18
5.1.2. Parámetros S	20
5.2. Metamateriales	21
5.2.1. <i>Epsilon-negative (ENG)</i>	22
5.2.1.1. <i>Complementary Split Ring Resonators (CSRR)</i>	22
5.2.2. <i>Mu-negative (MNG)</i>	22
5.2.3. <i>Double-positive (DPS)</i>	23
5.2.4. <i>Double-negative (DNG)</i>	23

5.2.5. Tipos de Metamateriales	24
5.3. <i>Frequency Selective Surfaces (FSS)</i>	24
5.3.1. Funcionamiento de celdas FSS	24
5.3.2. Clasificación de estructuras FSS	25
5.4. Inteligencia Artificial - IA	26
5.4.1. Algoritmos Bioinspirados	26
5.4.2. Clasificación de los Algoritmos Bioinspirados	26
5.4.3. Algoritmos basados en inteligencia de enjambre: Algoritmo Genético de Colonia de Abejas	27
6. Diseño Metodológico	30
6.1. Fases y Metodología	30
6.1.1. Fase 1: Obtención de modelos metamateriales	30
6.1.2. Fase 2: Implementación del algoritmo bioinspirado	30
6.1.3. Fase 3: Diseño de filtros	31
6.1.4. Fase 4: Evaluación de resultados	31
7. Desarrollo Conceptual	32
7.1. Fase 1	32
7.1.1. Selección de geometrías	32
7.1.2. Pruebas iniciales	33
7.1.3. Pruebas tipo espejo	35
7.2. Fase 2	35
7.2.1. Entrada de parámetros por parte del usuario	35
7.2.2. Cálculo del circuito ideal equivalente	36
7.2.3. Inicializar o actualizar parámetros de la geometría seleccionada	36
7.2.4. Obtención de parámetros de simulación en CST Studio Learning Edition	36
7.2.5. Cálculo del circuito equivalente RLC de la celda metamaterial	36
7.2.6. Optimizador bioinspirado	37
7.2.7. Mutación	37
7.3. Fase 3	37
7.3.1. Reevaluación	37
8. Resultados y Discusión	40
8.1. Fase 1: Normalización de Geometrías	40
8.1.1. Adaptación de geometrías a la guía de onda WR340	40
8.1.2. Pruebas tipo espejo	43
8.2. Fase 2: Desarrollo del algoritmo	46
8.2.1. Obtención de datos	46
8.2.2. Fase Inicial del Algoritmo	47
8.3. Fase 3: Ajuste de filtros en guía de onda	47
8.3.1. Selección de Geometría	47
8.3.2. Aplicación del Bioinspirado	49
8.4. Fase 4: Evaluación de resultados en escenarios de prueba	50

8.4.1. Evaluación por métricas de desempeño	50
8.4.2. Obtención de Resultados Finales	51
9. Conclusiones y Trabajos Futuros	55
9.1. Conclusiones	55
9.2. Trabajos Futuros	58
Bibliografía	59

Lista de Figuras

1.	Curva de respuesta pasabanda general [49].	18
2.	Circuito equivalente de filtro pasabanda	19
3.	Red de dos puertos [53].	20
4.	Diagrama de flujo de señal de dos puertos [55].	20
5.	Clasificación de los Metamateriales [6].	21
6.	a) Layout de un CSRR; b) Circuito equivalente [57].	22
7.	Clasificación profunda de los Metamateriales [4].	23
8.	Comportamiento de estructuras FSS [6].	25
9.	Clasificación FSS [6].	25
10.	Clasificación de algoritmos bioinspirados [65].	27
11.	Diagrama de bloques del algoritmo genético de colonia de abejas [67].	29
12.	Anillo CSRR [68]	33
13.	Cuadrado CSRR [69]	33
14.	Omega CSRR [35]	34
15.	Comportamiento frecuencial de parámetros S de geometría anillo sin sintonizar .	34
16.	Comportamiento frecuencial de parámetros S de geometría cuadrado sin sintonizar	34
17.	Desarrollo conceptual	35
18.	Diagrama de bloques del algoritmo ABC adaptado al bioinspirado desarrollado para el presente trabajo	39
19.	Celda unidad de geometría anillo	41
20.	Parámetros S de celda unidad geometría anillo	41
21.	Celda unidad de geometría cuadrada	42
22.	Parámetros S de celda unidad geometría cuadrada	42
23.	Celda unidad de geometría omega	42
24.	Parámetros S de celda unidad geometría omega	43
25.	Diferentes láminas de la geometría anillo	43
26.	Comportamiento de las diferentes láminas anillo	44
27.	Diferentes láminas de la geometría cuadrada	44
28.	Comportamiento de las diferentes láminas cuadradas	45
29.	Diferentes láminas de la geometría omega	45
30.	Comportamiento de las diferentes láminas omega	46
31.	Resultado inicial geometría anillo	48
32.	Resultado inicial geometría cuadrada	48

33.	Resultado inicial geometría omega	49
34.	Mejor error por geometría	49
35.	Aplicación del bioinspirado a la celda tipo anillo	50
36.	Acercamiento aproximado en 0.707 de la figura 35	51
37.	Resultado de capas en paralelo de geometría anillo	51
38.	Capas en paralelo y perspectiva con guía de onda y puertos	52
39.	Acercamiento aproximado en 0.707 de la figura 37	53
40.	Funcion de transferencia definitiva	53

Lista de Tablas

1.	Requerimientos de diseño para filtro pasabanda de la guía de onda WR340 . . .	38
2.	Resultados por etapa de las fases 3 y 4	54

Glosario

- **ABC:** Algoritmo de Colonia de Abejas Artificiales.
- **BW:** Bandwidth o Ancho de Banda.
- **CSRR:** Complementary Split Ring Resonators.
- **DPS:** Double-Positive Materials.
- **DNG:** Double-Negative Materials.
- **EGB:** Electromagnetic Bandgap - Clasificación especial de los metamateriales
- **EM:** Electromagnético.
- **fc:** Frecuencia de corte.
- **fo:** Frecuencia central.
- **FSS:** Frequency Selective Surfaces.
- **GA:** Algoritmos Genéticos.
- **GBC:** Algoritmo Genético de Colonia de Abejas.
- **GED:** Grupo de Estudio y Desarrollo en Robótica.
- **GPS:** Global Positioning System.
- **HVAC:** Heating Ventilation Air Conditioning.
- **IA:** Inteligencia Artificial.
- **IoT:** Internet of Things.
- **LHM:** Left-Handed Materials.

- **MNG:** Mu-Negative Materials.
- **ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- **ONU:** Organización de las Naciones Unidas.
- **PEC:** Conductor Eléctrico Perfecto.
- **Q:** Factor de Calidad.
- **WR340:** Referencia de guía de onda.

Capítulo 1

Resumen

Este trabajo busca aprovechar el potencial de nuevas tecnologías como los metamateriales, los cuales son una propuesta innovadora de cara a los diferentes retos que se presentan en las áreas de la ingeniería moderna como: óptica, imágenes diagnósticas, ciencia de materiales, ingeniería eléctrica, sistemas embebidos, invisibilidad, comunicaciones inalámbricas, entre otros. Los metamateriales son una tecnología que aún sigue en fase de estudio y experimentación, pero se ha descubierto que es muy prometedora, dada su versatilidad y numerosas posibilidades de aplicación en el contexto de las ondas electromagnéticas.

Dado que el campo de estudio de los metamateriales aún enfrenta desafíos significativos en cuanto al diseño y fabricación de sus estructuras, se plantea la parametrización de celdas metamateriales tipo FSS (Frequency Selective Surfaces) mediante un algoritmo bioinspirado, en escenarios de filtrado pasabandas para guías de onda. Se optó por este método, ya que no requiere un modelo matemático de la situación, lo cual los hace adecuados para resolver problemas con una alta complejidad matemática, en este caso la teoría electromagnética propia de los metamateriales.

Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica para obtener modelos previos de estructuras FSS, específicamente de tipo anillo complementario (CSRR) y omega (Ω) con características de filtrado entre 1.7 GHz y 3.3 GHz. Posteriormente, se sintonizaron las geometrías seleccionadas a una frecuencia central de 2.4 GHz, obteniendo así los parámetros iniciales de cada una de estas estructuras, incluyendo radio, ancho y distancia, entre otros.

Con el objetivo de simplificar el proceso de diseño del filtro y adaptarlo a requerimientos específicos de funcionamiento, como el ancho de banda, se empleó un algoritmo bioinspirado.

Este algoritmo ajusta dinámicamente los parámetros geométricos de las estructuras metamateriales utilizando métricas de desempeño que evalúan si la respuesta obtenida en cada caso se aproxima a la solicitada.

Finalmente, los resultados son validados en escenarios de prueba simulados relacionados con procesos de filtrado pasabanda en la guía de onda WR340. Este proceso de validación permite asegurar la eficacia y precisión de los filtros diseñados, demostrando así la viabilidad y utilidad de la propuesta desarrollada.

Palabras clave: Metamateriales, Frequency Selective Surfaces, FSS, ondas electromagnéticas, filtros pasabandas, guías de onda, WR340, algoritmo bioinspirado, comunicaciones inalámbricas.

Capítulo 2

Abstract

This work takes advantage of the potential on emerging technologies such as metamaterials, which are an innovative proposal facing the different challenges presented in areas of modern engineering such as: optics, diagnosis images, material's science, electric engineering, embedded systems, invisibility, wireless communications, among others. Metamaterials are still on study and experimentation phase, but it has been discovered to be very promising due to its versatility and numerous possibilities of application in the context of electromagnetic waves.

Given that the field of study of metamaterials still faces significant challenges regarding the design and fabrication of their structures, the parameterization of Frequency Selective Surfaces (FSS) metamaterial cells is proposed using a bio-inspired algorithm, in passband filtering scenarios for waveguides. This method was selected, due to the lack of requirement of mathematical model for the situation, being appropriated for solving problems with high mathematical complexity, for this case the electromagnetic theory typical of metamaterials.

Initially, a literature review was performed to obtain previous models of FSS structures, specifically complementary split-ring resonators (CSRR) and omega (Ω) types with filtering characteristics between 1.7 GHz and 3.3 GHz. Subsequently, the selected geometries were tuned to a central frequency of 2.4 GHz, obtaining the initial parameters of each of these structures, including radius, width and distance, among others.

To simplify the filter design process to be adaptable to different operational settings, such as bandwidth, a bio-inspired algorithm was used. This algorithm dynamically adjusts the geometric parameters of the metamaterial structures using performance metrics that evaluate if the obtained response for each case approximates the requested one.

Finally, results are validated in simulated test scenarios related to passband filtering processes in the WR340 waveguide. This validation process ensures the effectiveness and accuracy of the designed filters, demonstrating the viability and usefulness of the developed proposal.

Keywords: Metamaterials, Frequency Selective Surfaces, FSS, electromagnetic waves, passband filters, waveguides, WR340, bio-inspired algorithm, wireless communications.

Capítulo 3

Introducción

Las comunicaciones inalámbricas han participado activamente en la transformación y avance de la sociedad moderna. Gracias a su conectividad, flexibilidad y accesibilidad ha revolucionado la manera en cómo nos comunicamos, accedemos a la información y nos relacionamos con el mundo que nos rodea. Desde las primeras transmisiones de radio a larga distancia, pasando por la telefonía móvil, luego incluyendo tecnologías como *Bluetooth*, estandarizando el Internet, proliferando dispositivos inteligentes y el Internet de las cosas (IoT) [1]. Las comunicaciones inalámbricas han ampliado los límites de la innovación y el desarrollo en la sociedad, ofreciendo posibilidades que previamente no se habían considerado. Ante esto, existe una demanda constante de mejora con el fin de perfeccionar propiedades como la velocidad, capacidad y confiabilidad de las comunicaciones. En este contexto dinámico y desafiante, es importante explorar nuevas soluciones, tecnologías, semiconductores y materiales para abordar los diferentes desafíos de la ingeniería y mantener el potencial de un mundo globalizado [2].

Gracias a los aportes pioneros presentados en [3] y [4] se desarrollaron artificialmente los metamateriales, estos han venido obteniendo mayor importancia dado su potencial para controlar las ondas electromagnéticas (EM), además de su versatilidad, aplicabilidad y variedad de diseños en diferentes campos de la ingeniería y la ciencia. Al ser los metamateriales una rama que sigue en fase de estudio, dado que en la academia y en el ámbito científico apenas se está empezando a reconocer, aún existen numerosos retos y obstáculos por resolver tanto en la aplicabilidad de conceptos y teoría, así como de métodos de ingeniería y diseño para su empleo en entornos reales. El presente trabajo propone parametrizar celdas metamateriales por medio de un algoritmo bioinspirado, para aplicaciones de filtrado pasabanda en la guía de onda WR340.

Para cumplir con el objetivo de este trabajo, inicialmente se revisan estudios y diseños previos de FSS, un tipo de metamaterial cuya aplicación se especializa en el área de las microondas, para seleccionar geometrías con características de filtrado en un rango específico de frecuencias.

Con el fin de ajustar dinámicamente los parámetros de dichas geometrías a un requerimiento de filtrado específico, por ejemplo, al ancho de banda, se desarrolla un algoritmo bioinspirado que, de acuerdo con métricas de desempeño, evalúa si el comportamiento de la celda corresponde al funcionamiento deseado.

Se comprueban los resultados obtenidos mediante procesos de simulación, en escenarios de prueba enfocados a la guía de onda WR340. Indicando que el diseño dinámico de los filtros por medio del algoritmo, presenta respuestas satisfactorias de los metamateriales al área de aplicación en cuestión, es decir, las comunicaciones inalámbricas.

Este documento presenta el diseño mediante la parametrización de metamateriales para procesos de filtrado por medio de un algoritmo bioinspirado. Inicialmente, se plantea la pregunta problema la cual es el eje central del proyecto y la que impulsa su desarrollo. Por medio de la justificación se expone la importancia de abordar la pregunta problema y su relevancia en el área de los metamateriales. Por otro lado, en los objetivos se establecen las metas específicas de la propuesta, estos son medibles, alcanzables y relevantes. Además, se incluyen antecedentes, definiciones, conceptos clave y autores relevantes en la sección de estado del arte y marco teórico. Así mismo, la metodología describe el conjunto de pasos y estrategias que se seguirán para alcanzar los objetivos. Por último, las conclusiones sintetizan los resultados obtenidos, se discuten limitaciones del proyecto y se proponen trabajos futuros.

3.1. Planteamiento del Problema

Los metamateriales tienen como característica principal controlar el comportamiento de las ondas EM ya sea para absorber, atenuar, amplificar, filtrar o refractar ondas e incluso rechazar interferencias de acuerdo con la estructura, dimensiones y tipo de aplicación para el cual se diseñe; esto sugiere un gran aporte para la demanda de conectividad global. No obstante, la falta de un estándar preciso de estructura metamaterial constituye una dificultad considerable en la elección de esta, en vista de la amplia aplicabilidad y gran variedad de opciones de diseño disponibles. Para realizar la mejor selección de estructura, con dimensiones y un material en específico se requiere de un estudio profundo de las ondas a controlar ya que hay varios factores que pueden hacer que el comportamiento no sea el esperado, y este estudio puede tomar demasiado tiempo en realizarse a cabalidad [5].

Las metasuperficies o FSS (Frequency Selective Surfaces, de acuerdo con sus siglas en inglés) son clasificadas como un tipo de metamaterial que se traducen como superficies de frecuencia selectiva, cuya aplicación se encuentra en el área de las microondas por sus cualidades de filtrado [6]. Sin embargo, existe una problemática en el diseño y fabricación de las metasuperficies por la alta tolerancia de error en su estructura milimétrica, por lo cual es necesario tener la mayor precisión posible. Podrían existir comportamientos indeseados por el tamaño de la pieza, rugosidad y porosidad del tipo de material empleado, la distancia entre capas o arreglos de dieléctricos, la forma o geometría de diseño, la simetría en algunos casos, la homogeneidad, sus impedancias capacitivas e inductivas, la distribución del campo eléctrico y magnético en la superficie, pérdidas por el material, por nombrar algunos factores [7] [3].

Acorde con lo presentado previamente, tanto por el diseño como por la fabricación de las FSS no es posible saber su comportamiento definitivo hasta realizar pruebas ya sea mediante simuladores o de manera experimental. En otras palabras, la teoría no permite tener un conocimiento preciso de las características definitivas del metamaterial y su comportamiento. En [8] realizan una prueba del amplificador de pared resistivo o *Resistive Wall Amplifier* (RWA) respecto a un amplificador de este mismo tipo, pero mejorado con metamateriales, el cual según la teoría ofrece una alta ganancia a un ancho de banda módico. Sin embargo, hasta no haberlo diseñado y simulado no se conocieron sus alcances. Como consecuencia de lo anterior, no es posible obtener los parámetros mencionados de manera teórica, lo cual ocasiona que la metodología para probar las metasuperficies es aprendizaje por ensayo y error, esto apunta a la utilización de metaheurísticas.

En concordancia con lo anterior, las metasuperficies tienen gran aplicabilidad como filtros en las comunicaciones inalámbricas, pero presentan sus mayores desafíos en el diseño, fabricación y en la metodología de prueba de sus estructuras. Por lo anterior se plantea la siguiente pregunta problema:

¿Cómo pueden parametrizarse estructuras FSS para su utilización como filtros en comunicaciones mediante herramientas metaheurísticas a nivel de simulación?

3.2. Objetivos

3.2.1. Objetivo General

Parametrizar estructuras metamateriales de anillo complementario (CSRR) y omega (Ω) mediante la aplicación de un algoritmo bioinspirado, para filtros pasabandas en una guía de onda

a nivel de simulación.

3.2.2. Objetivos Específicos

- Obtener modelos previos de metamateriales y de sus estructuras anillo complementario (CSRR) y omega (Ω) mediante una revisión bibliográfica, para la determinación de los diseños aplicados en filtros pasabandas.
- Implementar un algoritmo bioinspirado para el ajuste dinámico de parámetros de metamateriales como distancia y numero de capas, en un entorno simulado referente a filtros pasabandas en una guía de onda.
- Diseñar los filtros basados en estructuras metamateriales mediante la obtención de parámetros bajo unas condiciones específicas.
- Validar los resultados obtenidos mediante métricas de desempeño aplicadas a escenarios de prueba simulados relacionados con procesos de filtrado pasabandas en guías de onda.

3.3. Justificación

Las ondas EM son un pilar fundamental en la ingeniería moderna, su impacto en el día a día del ser humano es significativo; la radio, el GPS, la televisión, los sensores, los hornos microondas, el *Bluetooth*, las imágenes de diagnóstico médico y el IoT [9], son algunas de las tecnologías que son parte de la sociedad actual tanto a nivel cotidiano, como industrial. Una de las herramientas más importantes es el Internet, esta es indispensable para la conectividad global, el acceso a la información, el comercio electrónico, educación, entretenimiento, investigación, entre otros. De acuerdo con la ONU la conexión a Internet es una necesidad global [10]; por otro lado, en Colombia es catalogado como un servicio público esencial y universal [11].

Con base a lo anterior, es evidente que controlar y aprovechar el espectro electromagnético de forma eficiente, es necesario para garantizar el correcto funcionamiento de todos los dispositivos y sistemas, y también que estos no interfieran entre sí. De acuerdo con esto, para cumplir con la demanda tecnológica actual se requiere realizar avances y desarrollar herramientas, dispositivos, materiales y semiconductores que permitan trascender limitaciones físicas y expandir posibilidades de mejora [9].

Por medios artificiales se ha desarrollado una nueva estructura, cuyas propiedades electromagnéticas permiten controlar el comportamiento de las ondas [12], puesto que no existe nada en la

naturaleza que tenga estas características y eso precisamente es lo que hace a los metamateriales tan únicos y excepcionales [6][13]. Los metamateriales son catalogados como los materiales del futuro [9] y según lo desarrollado en el estado del arte del actual documento, estos tienen un gran potencial por su versatilidad, dado que aún estando en fase de estudio y experimentación se han aplicado en diversas áreas de estudio como la óptica, imágenes diagnósticas, ciencia de materiales, ingeniería eléctrica, sistemas embebidos, invisibilidad, comunicaciones inalámbricas y demás.

El presente trabajo pretende estudiar diferentes estructuras FSS que son un tipo de metamaterial con cualidades de filtrado de tipo pasabandas y rechaza banda, para evaluar su comportamiento como filtros en comunicaciones inalámbricas. Se realizarán pruebas mediante simulación obteniendo así los datos iniciales; posteriormente, a través de herramientas metaheurísticas se busca mejorar el proceso de filtrado con el fin de obtener el máximo potencial de las metasuperficies. De acuerdo con los resultados obtenidos con el desarrollo de este proyecto, en un futuro estas metasuperficies pueden ser fabricadas e implementadas en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás con el fin de filtrar todas aquellas interferencias electromagnéticas que debilitan la red inalámbrica y así garantizar una conectividad de calidad.

Por otro lado, ante la demanda tecnológica mundial, el país debe validar la importancia de la ciencia, tecnología e innovación para contribuir significativamente al desarrollo social y productivo, sin dejar de lado la apropiación social del conocimiento, con el fin de cumplir con la “Política nacional de desarrollo productivo” establecida en 2016 para evitar el rezago de Colombia en materia de innovación [14]. Acorde con lo anterior, este trabajo aporta a la bibliografía colombiana en el tema de metamateriales ya que las investigaciones realizadas son escasas, y en el entorno académico son muy pocas las instituciones que tienen una línea de investigación del área de estudio en cuestión.

Respecto a la Facultad de Ingeniería Electrónica, se busca aportar al Grupo de Estudio y Desarrollo en Robótica GED puesto que en las líneas de investigación nunca se han estudiado los metamateriales y por tanto este trabajo fortalece al grupo con una contribución innovadora, moderna y de alto impacto en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas y la inteligencia computacional.

3.4. Impacto Social

De acuerdo con la Hoja de Ruta para la Cooperación Digital publicada en 2020 por la ONU, se establecen las pautas a tener en cuenta por la población mundial para garantizar la conexión,

respeto y protección en la era digital. Durante la pandemia del Covid-19, los medios digitales permitieron que parte de la sociedad se mantuviera conectada y siguiera en funcionamiento, sin embargo, quedó al descubierto la brecha digital tan grande que hay en ciertos países y regiones, lo cual no permite la conectividad global [15]. Para el año 2019 el 53.6 % de la población mundial tenía acceso a Internet, en los países desarrollados corresponde al 86.6 % mientras que en los países en desarrollo sólo el 47 % de las personas contaban con Internet; esto indica en primer lugar, que el 46.4 % de la población mundial es decir 3600 millones de personas, no tenían acceso a Internet; en segundo lugar, que la brecha entre los países desarrollados y subdesarrollados es bastante significativa [16]. Vencer la brecha digital es clave para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS (específicamente el objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura), por lo tanto, la Hoja de Ruta para la Cooperación Digital establece como uno de sus objetivos “Lograr el acceso universal, seguro, inclusivo y asequible a Internet para el año 2030” [17].

Por lo anterior, es imperativo mejorar el proceso de filtrado en las comunicaciones inalámbricas para cumplir con los objetivos mencionados y permitir la conectividad universal a Internet. Para que este servicio sea confiable, seguro y de calidad, es necesario realizar ajustes en la red para evitar interferencias que ocasionen pérdidas de conexión; por tal razón, la aplicación de los metamateriales como filtros en comunicaciones es un gran aporte para la atenuación de las interrupciones en la red y así contribuir a la conectividad global.

Por lo tanto, el impacto social que tendría el presente proyecto es muy favorable ya que contribuye a los ODS de la ONU, además a la Ley 2108 del año 2021, estipulada por el Congreso de la República de Colombia denominada como “Ley de Internet como servicio público esencial y universal” [11]. Así mismo, permitirá que las compañías de telecomunicaciones en el país conozcan métodos novedosos e innovadores para mejorar la calidad de las redes inalámbricas y por consiguiente también beneficiaría a la comunidad Tomasina, considerando que en un futuro este trabajo tenga la posibilidad de implementarse en las instalaciones de la Universidad, logrando de esta manera estar a la vanguardia en soluciones tecnológicas.

Con relación a la política de Proyección Social de la Universidad Santo Tomás [18], el presente trabajo va en línea con la misión y la visión ya que aporta a la transformación social por medio de la innovación, la apropiación de conocimiento, la gestión del desarrollo y la incidencia en el bien común, los cuales demuestran la formación integral de los estudiantes tomasinos. Por otro lado, siguiendo la estrategia de desarrollo comunitario para los procesos de proyección social y extensión universitaria, se plantea una solución alternativa a un problema comunitario como lo son las interferencias en comunicaciones inalámbricas, problema que no permite una conectividad de calidad en la era digital. Con esto se llevan a cabo modelos prácticos de los trabajos

académicos ante los desafíos del sector externo y la construcción de alternativas para un mejor país, con el fin de mejorar la calidad de vida de la comunidad local, regional y nacional.

Capítulo 4

Estado del Arte

4.1. Filtros en Comunicaciones Inalámbricas

En las comunicaciones inalámbricas las señales se transmiten a través de ondas electromagnéticas, las cuales se propagan por medio del aire y permiten transmitir cantidades de datos dependiendo del ancho de banda empleado. Actualmente, existe variedad de tecnologías que utilizan simultáneamente la zona de radiofrecuencias del espectro EM. Por consiguiente, es importante gestionar eficientemente el canal de comunicaciones para garantizar un desempeño adecuado de los sistemas, lo cual es posible por medio de filtros que se integran a dichos enlaces de comunicación [19]. Estos tienen como función permitir el paso de un rango de frecuencias específicas, con pérdidas mínimas y bajo nivel de distorsión. Su aplicación es fundamental para suprimir interferencias causadas por diferentes fuentes externas, así como aparatos inalámbricos con tecnología *Bluetooth* (*smartwatch*, sistemas con audio y video, e.g.), controladores de juegos inalámbricos (*Xbox* y *Wii*), teléfonos inteligentes o computadoras portátiles de usuarios conectados a una red de Internet, dispositivos *ZigBee* y controles HVAC, electrodomésticos (hornos, microondas o neveras), sistemas inalámbricos (LTE, radiodifusión, e.g.), distorsión por hardware de los mismos dispositivos que conforman las redes, e igualmente interferencia por redes wifi cercanas [1] [20].

Actualmente los sistemas de comunicaciones tienden a ser más eficientes, adaptables y miniaturizados, lo cual incide en mejorar el proceso de filtrado de las señales bajo las características señaladas previamente. Se han desarrollado diferentes estudios que presentan avances significativos como en [21] con filtros reconfigurables de respuesta elíptica, los cuales cambian su frecuencia de corte según la necesidad del usuario. En [22] analizan la implementación de filtros

FIR en varios lenguajes de programación para sistemas microprocesados, así como de descripción de hardware para FPGA; de la misma forma, se analiza el diseño de filtros transversales para la síntesis de pulsos de banda ultra-ancha (UWB) en [23]. Como propuesta para las comunicaciones 5G se plantea el GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*) como esquema de transmisión multiportadora para las futuras redes inalámbricas, como ejemplo de esto, en [24] el objetivo principal del estudio es determinar el impacto de la cantidad de coeficientes del filtro en las subportadoras del sistema.

Con el fin de mitigar los efectos mencionados previamente y satisfacer la demanda de dispositivos y tecnologías emergentes que hacen uso del espectro electromagnético, se requieren materiales, técnicas o estructuras que permitan controlar las ondas en el espectro con el fin de mejorar el proceso de filtrado en las redes inalámbricas.

4.2. Metamateriales

Aún no existe con exactitud una definición que abarque todo el término, sin embargo, en [12] y [25] exponen que un metamaterial es la disposición de pequeñas células artificiales distribuidas en un arreglo o matriz, cuya característica principal es controlar el comportamiento de las ondas EM gracias a que poseen permitividad y permeabilidad negativas; esta propiedad es algo que no se encuentra en materiales de la naturaleza.

El primer acercamiento a los metamateriales fue en 1968 cuando el físico Víctor Veselago propuso teóricamente que la propagación de una onda en un material cuya permitividad y permeabilidad se asuman simultáneamente negativas, pueden cambiar la dinámica de esta en el espectro EM; los denominó LHM (*Left-handed materials*). Sin embargo, no fue hasta años después que se dieron las dos grandes revoluciones de los metamateriales: la primera revolución cuando Sir John Pendry en 1999 propuso teóricamente los materiales SNG (*Single negative materials*) los cuales poseen una de las dos características principales (permitividad eléctrica (ϵ) o permeabilidad magnética (μ) negativa). La segunda revolución llegó en el 2005 cuando Smith et al. desarrollaron los primeros prototipos de LHM y descubrieron que el gradiente de índice de refracción medio podía darles curvatura a las ondas electromagnéticas; lo cual llevó a la propuesta de transformar totalmente la ciencia controlando la propagación de las ondas usando lo que se denomina “Metamaterial” [3] [4].

Con el transcurso del tiempo, el estudio y experimentación de los metamateriales ha crecido de manera exponencial, teniendo gran variedad de aplicaciones en áreas como la óptica, como

en [26] en el que por medio de “*Soft optical metamaterials*” es posible aportar a los campos de la optoelectrónica, imágenes, sensado y biofotónica; también en ciencia de materiales se explica en [27] el diseño de metamateriales térmicos y mecánicos con herramientas computacionales. En el campo de la ingeniería eléctrica en [28] se habla sobre la aplicación de una superficie metamaterial para distribución del campo eléctrico ante protección contra rayos; finalmente el área de *cloaking* es una de las más novedosas en el ámbito de los metamateriales ya que busca la manera de lograr la invisibilidad; en [29] presentan una técnica de diseño para capas de invisibilidad sobre objetos en el espacio vacío, cuyos resultados son satisfactorios bajo unas estrictas condiciones de polarización e iluminación aunque existen aún muchos desafíos por abordar en este campo de estudio. De acuerdo con todo lo anterior los metamateriales tienen como ventaja la versatilidad, incluso estando aún en fase de estudio y experimentación.

A nivel de procesos de filtrado en comunicaciones inalámbricas, se han realizado trabajos académicos con metamateriales como por ejemplo el diseño y la simulación de un filtro de banda doble, el cual gracias al metamaterial implementado tuvo pocas pérdidas de inserción, los coeficientes de reflexión fueron los máximos en las bandas 2.4 GHz y 5.8 GHz que lo convierte en excelente candidato en la tecnología wifi 6, y además sus dimensiones permiten que sea ideal para inserción en circuitos [30]. Por otro lado, en [31] se resaltó el diseño y parametrización de filtros pasa bajas con metamateriales para antenas *microstrip*, el cual permitió que las pérdidas fueran limitadas y además mejoraran las características generales del filtro (frecuencias de corte, ondulación y ganancia). Igualmente, en [32] se desarrolla con el simulador ANSYS HFSS 14.0 un modelo metamaterial el cual es un filtro pasabanda, cuyas características de diseño son favorables incluso para aplicaciones en comunicaciones móviles y servicios satelitales.

En cuanto a guías de onda (*waveguides*), en [33] se plantea una guía de onda con un metamaterial embebido para una antena, cuyas características de diseño permiten actuar como filtro para suprimir ondas EM en la cavidad de la guía de onda y además rechaza señales de interferencia. Por otro lado, en [34], se presenta un nuevo diseño de antena la cual se compone de una guía de onda rectangular, ranuras longitudinales cortadas en su pared ancha superior y una superficie de metamaterial en lugar de la pared ancha inferior; la función de filtrado se obtiene utilizando la propiedad de banda prohibida de la superficie del metamaterial, que está incrustada en la pared inferior de la cavidad de la guía de ondas. Igualmente, en [35], se investigan filtros para guías de ondas monomodo rectangulares teniendo en cuenta varios diseños de filtros pasabandas que utilizan ranuras resonantes de sublongitud de onda. En este estudio se comprueba mediante simulaciones numéricas, una mejora significativa de sus prestaciones con sólo introducir varios resonadores en la sección transversal y cierta simetría especular que evita el desdoblamiento de la frecuencia de resonancia cuando los elementos se apilan verticalmente.

4.3. Frequency Selective Surfaces (FSS)

Existen diferentes tipos de metamateriales, y uno de ellos se denomina “*Frequency Selective Surfaces*” (FSS) el cual según el artículo [6] es un arreglo bidimensional de superficies periódicas sobre un sustrato dieléctrico, cuya aplicación se encuentra en el área de las microondas. Estas tienen propiedades de filtrado, debido a que su mayor cualidad es el diseño periódico y regular, permitiendo así que pueda operar como un filtro pasa bandas o elimina bandas. Además, tiene la capacidad de aumentar el ancho de banda, actuar como filtro en antenas, reconfigurar frecuencias de resonancia y polarización.

De acuerdo con lo estipulado en [36], se han diseñado y probado estructuras FSS mediante simulación (por medio del software ANSYS HFSS) e implementación; su objetivo era lograr un pasabanda insensible a la polarización con transición aguda en la banda Ka. Los resultados fueron bastante satisfactorios ya que al desarrollar una FSS ultra delgada con una celda unitaria cuadrada cargada, se comprobó que su ancho de banda medido es de 3 dB entre 33 GHz y 37.5 GHz, el diseño permitió que fuera insensible a la polarización y además puede ser un excelente candidato para aplicaciones en comunicaciones por radar en la banda Ka. Por otro lado, en University of Electronic Science and Technology of China en la ciudad de Chengdu, diseñaron una MFSS (*Multiband Frequency Selective Surface*) con un dispositivo de estructura electromagnética irregular que posee cinco picos resonantes en el régimen de los terahertz (THz). La simulación realizada indica que cada uno de los picos tiene características diferentes en cuanto al campo eléctrico y la corriente de superficie; lo cual ofrece la alternativa de diseñar filtros multi banda en THz, moduladores, o también como medio para absorber frecuencias [37]. Igualmente, en [38] analizan una FSS como filtro pasa bandas usando el software CST Studio, que demostró que con una capa 2D plana de frecuencia de resonancia de 3.5 GHz el filtro es adecuado para reducir interferencias y radiación no deseada en dicha banda, lo cual lo hace una elección ideal para reducción de interferencias EM en aplicaciones inalámbricas 5G.

En cuanto a geometrías específicas de FSS para aplicaciones de filtrado en comunicaciones, se encontró que en la mayoría de investigaciones utilizan el resonador de anillo complementario (*Complementary Split Ring Resonator CSRR*), como en [39], que miniaturizan dicho resonador para integrarlo a una guía de onda, obteniendo como resultado un factor de calidad alto y bajas pérdidas de inserción. Así mismo en [40], diseñan y fabrican un filtro pasabandas compacto de guía de onda combinando CSRR y fractal de Koch, usando el simulador CST Microwave Studio. Sin embargo, hay otras topologías de resonadores de ranura como los hemisféricos [41], de cavidad de modo triple [42], en forma de U [43], y de tipo omega [35]; es de destacar que, en este último artículo, realizan una comparativa del comportamiento entre estructuras CSRR

y ranuras tipo omega . No solo teniendo en cuenta la celda unidad, sino variaciones en cuanto a la cantidad de capas y la simetría de estas.

4.4. Frequency Selective Surfaces (FSS) y técnicas metaheurísticas

Cabe resaltar que la tecnología actual facilita realizar procesos eficientes que permitan mejorar parámetros específicos sin restringir sus límites. Los algoritmos de optimización de población implican varias opciones procesadas en simultáneo de manera estocástica con el fin de determinar la solución óptima al problema. Este tipo de algoritmos son aplicados en el área de los metamateriales para definir estructuras, capas, y dimensiones de diseño, también para procesar datos de diferentes test realizados en alguna metasuperficie, para evaluar su frecuencia de resonancia adecuada, identificar bajo qué frecuencia tiene mejores características de ganancia, pérdidas, ancho de banda , entre otros. Algunos autores han hecho uso de estos algoritmos para comprobar su utilidad en el área de estudio en cuestión, por ejemplo algoritmos genéticos (GA), PSO (*Particle Swarm Optimization*) [44], MOPSO (*Multi-Objective Particle Swarm Optimization*) [45], deep learning combinada con MOO (*Multi Objective Optimization*) [5], también *Coot optimization algorithm* [46] y algunas técnicas bioinspiradas como *General Regression Neural Network* (GRNN) y *Cuckoo Search algorithm* (GRNN - CS) [47].

4.5. Síntesis de Investigación

De acuerdo con los subíndices anteriores la versatilidad de los metamateriales es de resaltar; incluso en una sola área de estudio (filtros para comunicaciones) se han analizado diferentes estructuras y diseños con características únicas para cada aplicación. Asimismo, la investigación destacó que el uso de la inteligencia computacional en la metodología de diseño permite configurar las estructuras de manera adecuada sin emplear demasiado tiempo y recursos. Además, las herramientas de simulación como ANSYS HFSS o CST Studio facilitan considerablemente validar los resultados obtenidos ante un escenario de prueba, como lo sería por ejemplo con guías de onda, antenas, entre otros.

Capítulo 5

Marco Teórico

Para el desarrollo del proyecto es necesario partir de unas bases de conocimiento, por lo cual se realizará una breve conceptualización de los principales temas a trabajar para comprender el proceso realizado.

5.1. Filtros

Según [48], un filtro es un elemento que discrimina determinada gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él. El propósito de estos es separar la información de interferencias, ruido y distorsión indeseada. Además, tienen la capacidad de permitir el paso a señales con cierta selección de frecuencia al mismo tiempo que rechazan otras, esta propiedad se determina como “selectividad” [49].

Existen filtros activos y pasivos, los primeros hacen uso de elementos como transistores o amplificadores operacionales combinados con resistencias y capacitores, cuya característica principal es proporcionar ganancia en voltaje. Sin embargo, estos filtros activos son menos estables para frecuencias mayores a 100KHz [50].

Por otro lado, los filtros pasivos emplean inductancias, capacitancias y resistencias para su desarrollo, es decir circuitos RLC que no inyectan energía a la red. Este tipo de filtros garantizan una mayor selectividad en aplicaciones de altas frecuencias [50] [51].

Existen cuatro tipos de filtros: Pasabajas, pasaaltas, pasabandas y rechazabandas. Para el desarrollo del presente trabajo, se hará énfasis en el filtro pasabandas.

5.1.1. Pasabandas RLC

Un filtro pasabanda permite el paso de señales situadas entre un límite inferior y superior de frecuencia, estas se denominan frecuencias críticas o de corte y son los puntos donde la respuesta es el 70.7 % del valor máximo o en términos de decibelios, donde su valor es equivalente a -3dB [49]. Su comportamiento se muestra en la figura 1.

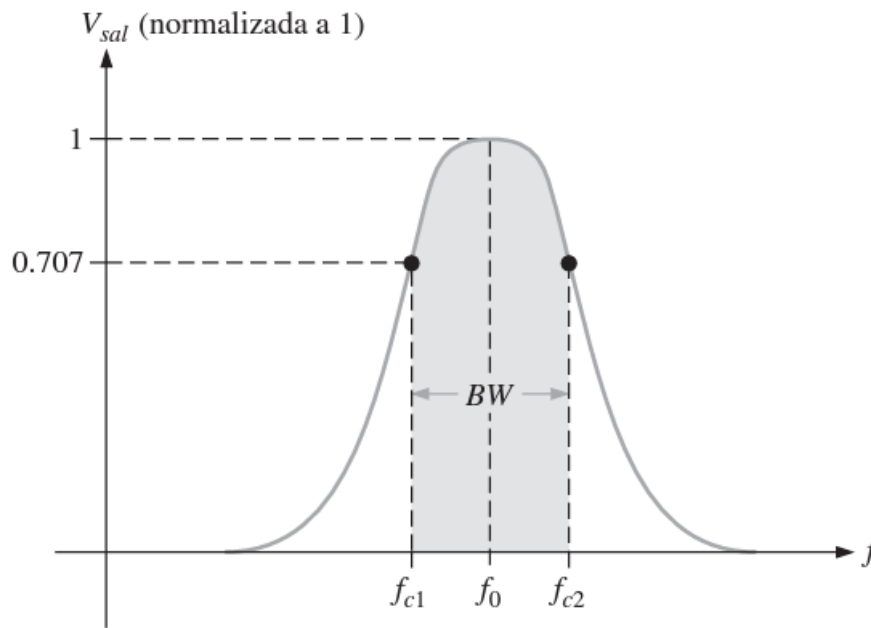


FIGURA 1: Curva de respuesta pasabanda general [49].

La diferencia entre la frecuencia de corte superior y la inferior se denomina como ancho de banda (*bandwidth* BW), según lo establecido en la ecuación (5.1).

$$BW = f_{c2} - f_{c1} \quad (5.1)$$

Por otro lado, la frecuencia central del filtro pasabandas se define como la media geométrica de las frecuencias de corte, y se obtiene mediante la ecuación (5.2).

$$f_o = \sqrt{f_{c1} * f_{c2}} \quad (5.2)$$

Así mismo, el factor de calidad Q indica la selectividad del filtro, ya que es la relación de la frecuencia central y el ancho de banda, a partir de lo descrito en la ecuación (5.3). En consecuencia, si el valor Q es alto entonces el ancho de banda es más pequeño y por tanto más selectivo es el filtro.

$$Q = \frac{f_o}{BW} \quad (5.3)$$

Según [52], el modelo circuital de un filtro pasabanda es el resultado de la conexión en cascada de un pasaaltas y un pasabandas, tal como se muestra en la figura 2. Adicionalmente su función de transferencia se destaca en la ecuación (5.4).

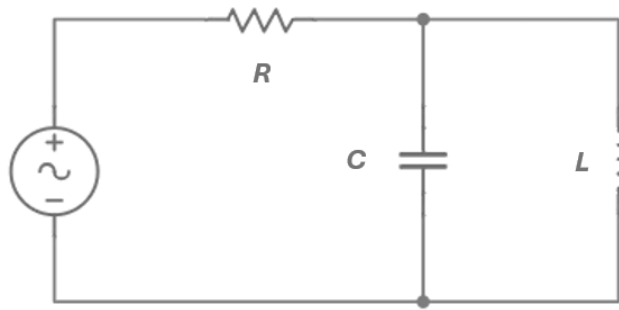


FIGURA 2: Circuito equivalente de filtro pasabanda

$$Tf(S) = \frac{S \frac{1}{CR}}{S^2 + S \frac{1}{CR} + \frac{1}{LC}} \quad (5.4)$$

Para el diseño de filtros pasabandas se debe tener en cuenta el valor capacitivo e inductivo de este para cumplir con los requerimientos estipulados; mediante las ecuaciones (5.5) y (5.6) es posible encontrar dichos valores y verificar el correcto planteamiento del filtro.

$$C = \frac{Q}{2\pi f_o R} \quad (5.5)$$

$$L = \frac{R}{2\pi f_o Q} \quad (5.6)$$

5.1.2. Parámetros S

Los filtros se pueden caracterizar como una red de dos puertos (figura 3) ya que tienen dos accesos (una entrada y una salida). Estos se pueden caracterizar mediante parámetros de impedancia (parámetros Z), de admitancia (parámetros Y), híbridos (parámetros H), de transmisión inversa (parámetros ABCD) y de dispersión (parámetros S) [53].

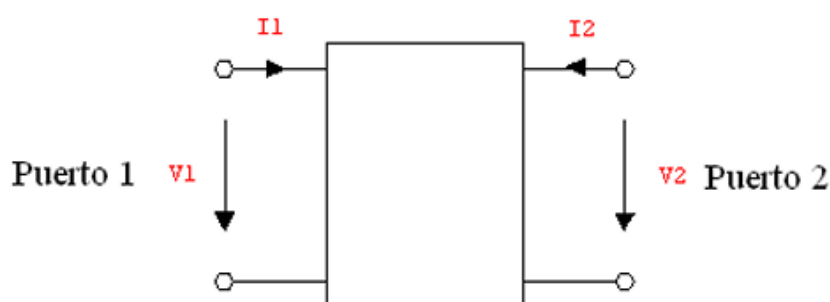


FIGURA 3: Red de dos puertos [53].

Dada su importancia en este trabajo se hace énfasis en los parámetros S, debido a que relacionan las ondas de tensión en ambos puertos de la red, es decir, relacionan las ondas de tensión incidentes con las reflejadas en un puerto y también relacionan las ondas incidentes con las transmitidas al otro puerto [54].

Los parámetros de dispersión son cuatro [53], y de acuerdo con lo estipulado en la figura 4 se destaca visualmente su funcionamiento. Se debe tener en cuenta, mientras no se diga lo contrario que los filtros son recíprocos, es decir ($S_{12} = S_{21}$) [48].

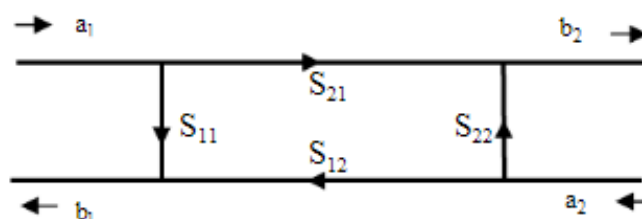


FIGURA 4: Diagrama de flujo de señal de dos puertos [55].

– S_{11} : Coeficiente de reflexión de puerto de entrada. Este parámetro mide la cantidad de potencia reflejada en comparación con la aplicada en el puerto 1.

– S_{12} : Coeficiente de transmisión inversa. Mide la potencia recibida en el puerto 1 en comparación con la enviada en el puerto 2.

$-S_{21}$: Coeficiente de transmisión directa. Parámetro que mide la potencia recibida en el puerto 2 comparada con la enviada por el puerto 1.

$-S_{22}$: Coeficiente de reflexión de puerto de salida. Este mide la potencia reflejada comparada con la potencia enviada del puerto 2.

5.2. Metamateriales

Aún no existe una definición que abarque la totalidad del término, sin embargo, en [12] y [56] establecen que un metamaterial es la disposición de pequeñas células artificiales distribuidas en un arreglo o matriz cuya característica principal es obtener propiedades ópticas o electromagnéticas controladas; estas se definen macroscópicamente como parámetros de permitividad eléctrica (ϵ) y/o permeabilidad magnética (μ).

A través de dichas características se obtiene la clasificación de los metamateriales tal como se demuestra en la figura 5.

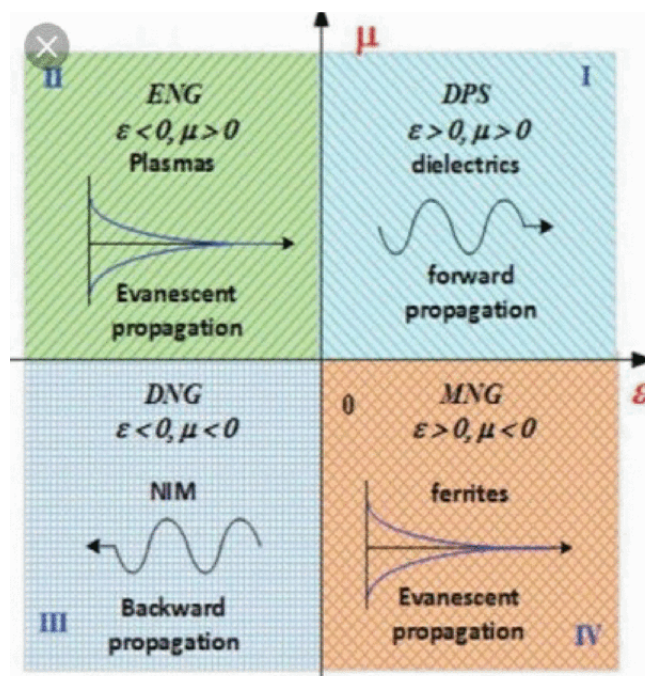


FIGURA 5: Clasificación de los Metamateriales [6].

5.2.1. *Epsilon-negative (ENG)*

Los medios con permitividad menor a cero y permeabilidad mayor a cero ($\epsilon < 0$, $\mu > 0$) se denominan ENG (por sus siglas en inglés). En este grupo se encuentran varios tipos de estructuras como las de triple enlace, ultradelgadas y las CSRR, estas últimas serán tratadas a continuación.

5.2.1.1. *Complementary Split Ring Resonators (CSRR)*

Son resonadores planares eléctricamente pequeños que se excitan mediante campos eléctricos o magnéticos polarizados [56]. Su modelo equivalente se puede realizar mediante un tanque LC en paralelo y su topología (Figura 6) está conformada por dos anillos abiertos y concéntricos con una abertura en cada uno, pero ubicadas de manera opuesta. Se dice que son eléctricamente pequeños porque la longitud de onda guiada es mayor que el diámetro del resonador [57]. Cabe resaltar que en la figura 6, el color gris representa el metal y el blanco representa las zonas donde fue extraído el metal.

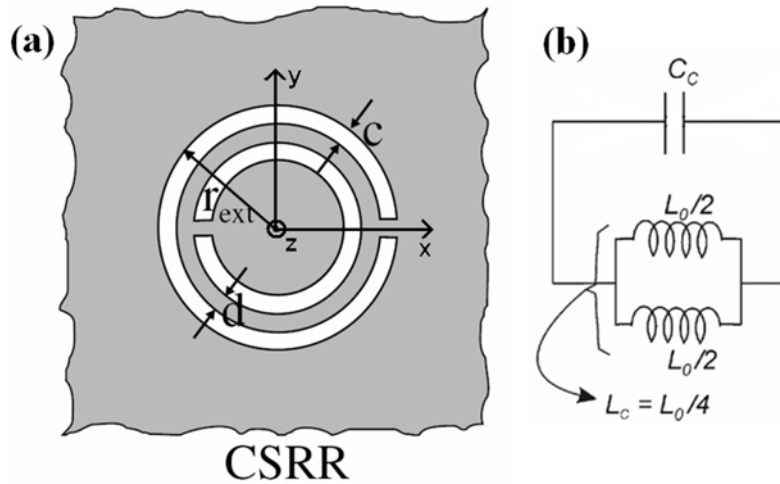


FIGURA 6: a) Layout de un CSRR; b) Circuito equivalente [57].

5.2.2. *Mu-negative (MNG)*

Las estructuras con permitividad mayor a cero y permeabilidad menor a cero ($\epsilon > 0$, $\mu < 0$) se denominan MNG. En este apartado es común encontrar modelos SRR o de quiral.

5.2.3. *Double-positive (DPS)*

Son medios con permitividad y permeabilidad mayores a cero ($\epsilon > 0$, $\mu > 0$) se denominan DPS. Los materiales dieléctricos son los más comunes en este grupo.

5.2.4. *Double-negative (DNG)*

Estos medios se caracterizan porque tanto la permitividad como la permeabilidad son menores a cero ($\epsilon < 0$, $\mu < 0$). Es de destacar que esta clase de metamateriales solo se pueden obtener a través de medios artificiales.

En la figura 7 se aprecia una clasificación más profunda referente a cada uno de los tipos de metamaterial de acuerdo con su comportamiento electromagnético. Es necesario tener en cuenta, que las estructuras de tipo EGB (*Electromagnetic Bandgap*) hacen parte una clasificación especial de los metamateriales.

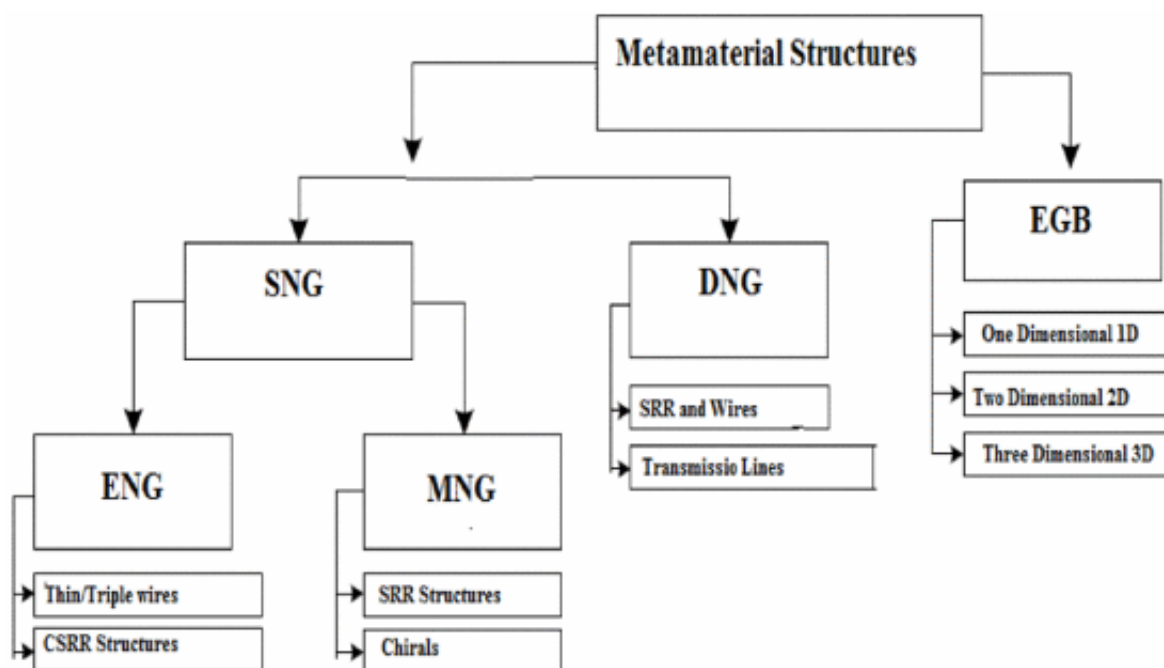


FIGURA 7: Clasificación profunda de los Metamateriales [4].

5.2.5. Tipos de Metamateriales

Los tipos de metamateriales se clasifican según la aplicación para los cuales serán empleados. Estos pueden ser de quirál, de banda prohibida, bi-isotropicos, hiperbólicos y FSS [58]. En la siguiente sección se encuentra una descripción detalla de esta última topología.

5.3. *Frequency Selective Surfaces (FSS)*

Según [59] las FSS se refieren a superficies selectivas de frecuencia; es un arreglo bidimensional de superficies periódicas sobre un sustrato dieléctrico, cuya aplicación se encuentra en el área de las microondas. Estas tienen propiedades de filtrado, debido a que su mayor cualidad es el diseño periódico y regular, permitiendo así que pueda operar como un filtro pasabandas o rechazabandas. Además, tiene la capacidad de aumentar el ancho de banda, actuar como filtro en antenas, reconfigurar frecuencias de resonancia y polarización, además de presentar una alta selectividad de frecuencias.

5.3.1. Funcionamiento de celdas FSS

Teniendo en cuenta la teoría de circuitos, las estructuras FSS poseen características capacitivas e inductivas que emulan un comportamiento similar a los filtros en microondas. Sin embargo, su comportamiento de filtrado dependerá del arreglo de celdas, las dimensiones, el sustrato de los materiales y la geometría del filtro.

Así mismo, las aperturas o ranuras de la celda se comportan como filtro pasabanda, esto quiere decir que permite el paso de la onda electromagnética a través del arreglo en determinada frecuencia de resonancia. En contraste, el resto de la estructura actúa como filtro rechazabanda, de esta manera se garantiza la selectividad del filtro [60]. Referente al circuito resonante equivalente, el parche conductor de la celda muestra respuestas de tipo capacitivo actuando como filtro pasa bajas, mientras que las ranuras o cuadrícula se comportan como filtro pasa altas mediante una respuesta inductiva. En la figura 8, se expresa en detalle el funcionamiento como filtro de la celda FSS.

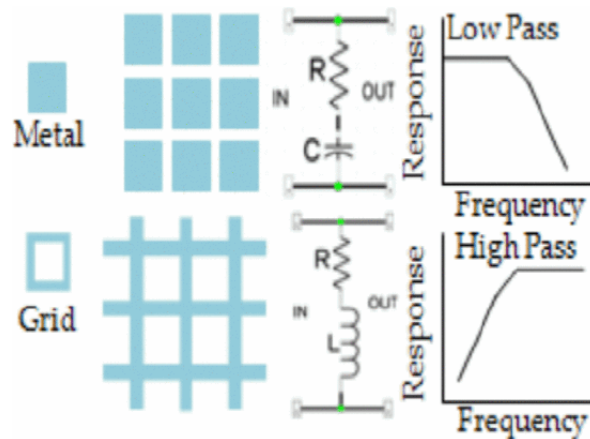


FIGURA 8: Comportamiento de estructuras FSS [6].

5.3.2. Clasificación de estructuras FSS

La clasificación de las superficies selectivas en frecuencia se divide en tres grupos fundamentales: Basado en arreglos de elementos, basado en estructura y basado en la aplicación. En la figura 9, se destacan de una manera más profunda y precisa las diferentes topologías de las FSS.

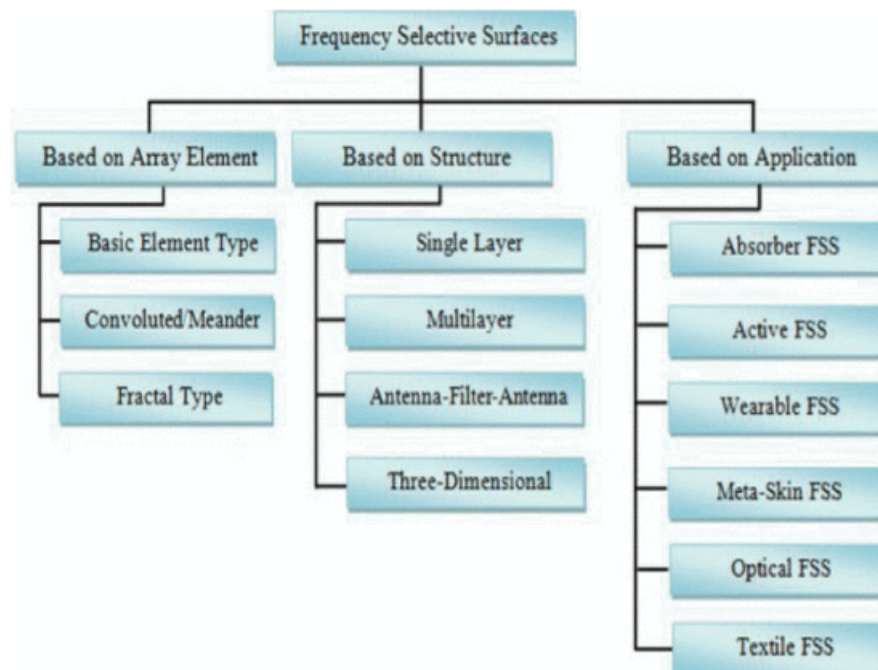


FIGURA 9: Clasificación FSS [6].

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, se utilizarán estructuras selectivas en frecuencia (FSS) basadas en su estructura, específicamente como filtro pasabandas para la guía de onda

WR340 con frecuencia de resonancia aproximada a los 2.4GHz.

5.4. Inteligencia Artificial - IA

Es una de las ramas de la ciencia de la computación con mayor interés en la actualidad, debido a su gran cantidad de aplicaciones tanto en el ámbito ingenieril como en la vida cotidiana. La IA permite emular comportamientos, habilidades y acciones realizadas por el cerebro [61].

La IA tiene diferentes campos de aplicación como el procesamiento de lenguaje natural, visión artificial, aprendizaje automático, robótica, optimización, entre otros [62].

5.4.1. Algoritmos Bioinspirados

Debido a que los algoritmos tradicionales no siempre eran los más indicados para la solución de ciertas problemáticas donde las condiciones de búsqueda o el número de soluciones no es única; se comenzaron a abstraer fenómenos naturales como inspiración para los nuevos modelos matemáticos y posteriormente computacionales, que podrían dar respuesta al tipo de problemáticas previamente mencionadas; se le conoce con el nombre de "Técnicas Bioinspiradas"[63].

El objetivo de estos algoritmos es realizar procedimientos similares a los biológicos realizando una selección, reproducción, mutación y evaluación, para lograr la mejor solución posible a un problema determinado, ya sea de búsqueda, aprendizaje, reconocimiento, optimización, simulación o caracterización.

La metodología consiste en generar una población inicial con el fin de evaluar y escoger a los mejores individuos. Posteriormente, se genera una nueva población a partir de lo seleccionado anteriormente, pero con algunas modificaciones; se realiza el mismo procedimiento de evaluación y este finalizaría cuando todos los individuos cumplan con los criterios establecidos dando así la resolución a la problemática establecida [64].

5.4.2. Clasificación de los Algoritmos Bioinspirados

La clasificación de los algoritmos bioinspirados se divide en cuatro grupos fundamentales: algoritmos evolutivos, algoritmos basados en inteligencia de enjambre, basados en ecología y los de múltiple objetivo. Esta clasificación se presenta en la figura 10.

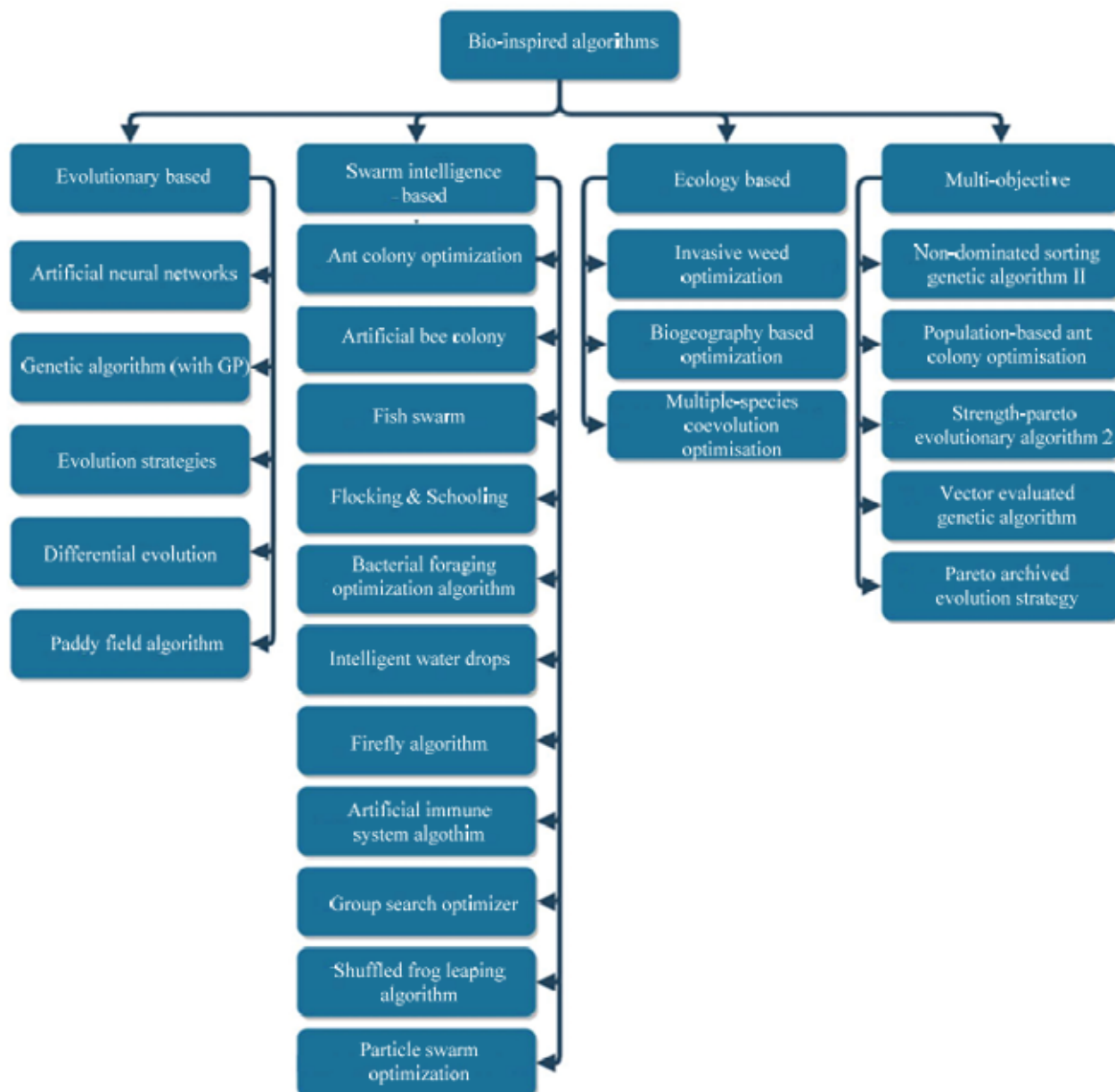


FIGURA 10: Clasificación de algoritmos bioinspirados [65].

5.4.3. Algoritmos basados en inteligencia de enjambre: Algoritmo Genético de Colonia de Abejas

Para el presente trabajo se empleó el algoritmo genético de colonia de abejas (GBC), este integra las cualidades de los algoritmos genéticos (GA) y el de colonia de abejas artificiales (ABC). El GBC se basa en como las colonias de abejas buscan fuentes de comida y se comunican entre sí. En términos artificiales, las abejas se dividen en tres tipos: empleadas (*employed*), espectadoras

(*onlookers*) y exploradoras (*scouts*) [65]. Las mejores soluciones para el problema de optimización se basan en las fuentes de alimento, y modelando la función de fitness haciendo referencia a la cantidad de néctar encontrado.

En primer lugar, se genera una población inicial de abejas tomando en cuenta la ecuación (5.7). La cual establece que i es el índice de solución, j la variable de decisión, y finalmente $rand[0,1]$ genera un valor aleatorio entre $u_{ij}^{máx}$ y $u_{ij}^{mín}$.

$$u = u_{ij}^{mín} + rand[0, 1](u_{ij}^{máx} - u_{ij}^{mín}) \quad (5.7)$$

Las abejas exploradoras identifican las fuentes de alimento disponibles. Las abejas observadoras monitorean todo el proceso de búsqueda, por medio de los valores *fit* que pueden ser aprovechados para seleccionar las soluciones con la ecuación (5.8). Donde PS es *population size* o tamaño de la población.

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{j=1}^{PS} fit_j} \quad (5.8)$$

Finalmente, las abejas empleadas utilizan la información obtenida de las abejas espectadoras para buscar soluciones vecinas y seleccionar las mejores soluciones, es decir, las que más cantidad de néctar tengan y se encuentren cerca, serían las soluciones más precisas. Si la cantidad de néctar detectado actualmente es mayor que la cantidad obtenida de la fuente, entonces el valor actual es almacenado. A partir de lo anterior, se compara la cantidad de alimento obtenido con los vecinos cercanos para verificar que soluciones se descartan y cuales se almacenan, para esto se utiliza la ecuación (5.9).

$$V_{ij} = u_{ij} + \theta_{ij}(u_{ij} - u_{kj}) \quad (5.9)$$

Donde k es una solución aleatoria del tamaño de la población y θ es un valor entre $[-1,1]$ [66].

En la figura 11, se destaca el diagrama de bloques correspondiente al algoritmo ABC.

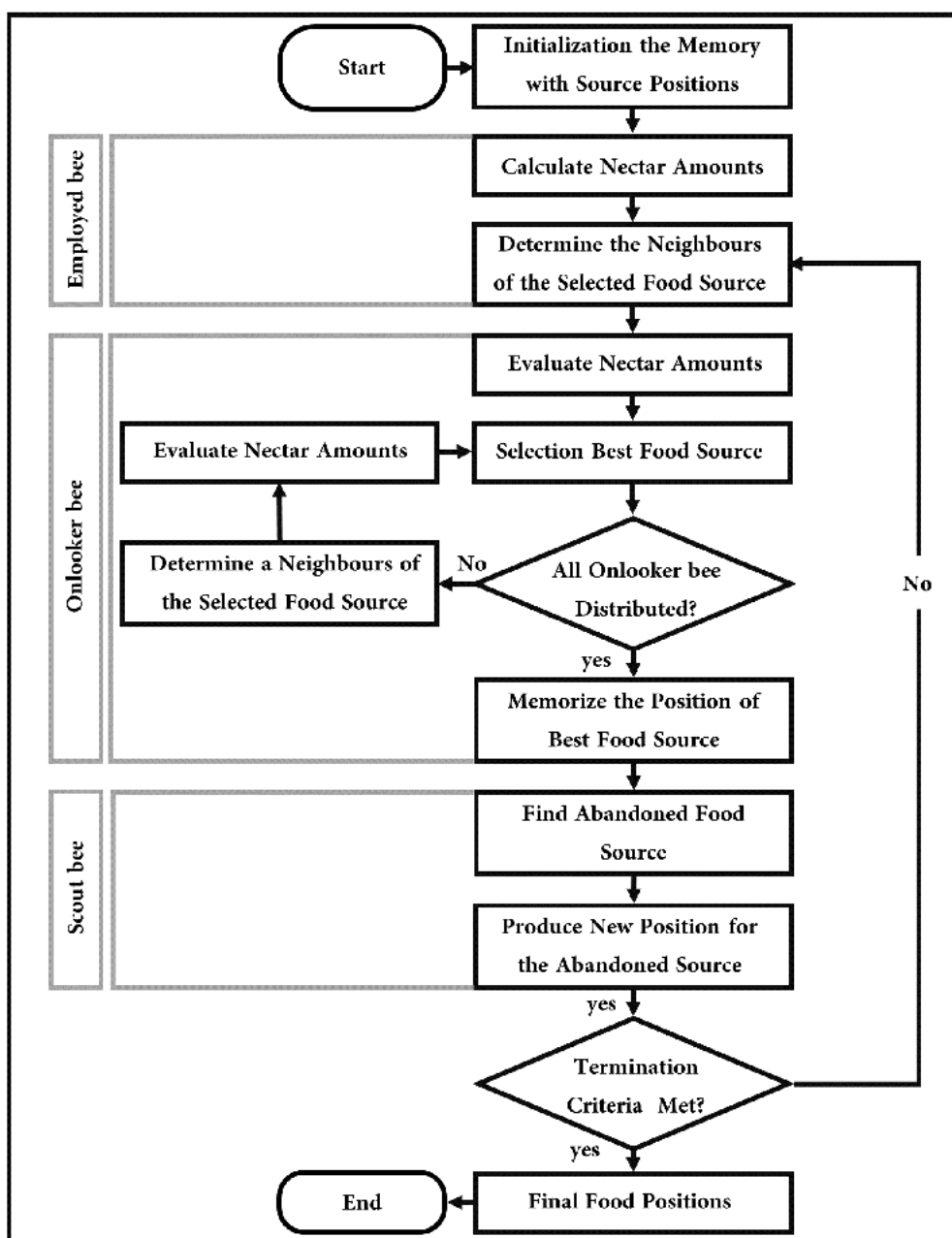


FIGURA 11: Diagrama de bloques del algoritmo genético de colonia de abejas [67].

Capítulo 6

Diseño Metodológico

6.1. Fases y Metodología

Para el desarrollo del presente proyecto y cumplir con los objetivos planteados, se propone llevar a cabo cinco etapas las cuales se explican a continuación.

6.1.1. Fase 1: Obtención de modelos metamateriales

En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica empleando los recursos del CRAI, revistas científicas, publicaciones en conferencias y documentos de investigación, cuyo contenido esté relacionado con modelos o diseños de estructuras metamateriales de tipo FSS, específicamente CSRR y Ω con aplicaciones o características de filtrado en comunicaciones. Se seleccionan máximo tres de estos modelos, y por medio de herramientas de análisis de onda completa, se verifica su comportamiento como filtros analizando factores como ancho de banda, frecuencias de corte y factor de calidad, por mencionar algunos.

6.1.2. Fase 2: Implementación del algoritmo bioinspirado

Luego, se selecciona una técnica bioinspirada teniendo en cuenta parámetros de diseño de filtros metamateriales como las frecuencias de corte seleccionadas por el usuario, para el posterior desarrollo del algoritmo en Matlab. Este tiene como fin ajustar dinámicamente los parámetros de las estructuras metamateriales para procesos de filtrado en guías de onda, teniendo en cuenta los requerimientos de diseño estipulados.

6.1.3. Fase 3: Diseño de filtros

Igualmente, se diseñan los filtros FSS de acuerdo con el ajuste de parámetros realizado por el algoritmo bioinspirado, tales como la cantidad de láminas y función de transferencia para el circuito RLC equivalente del arreglo de celdas metamateriales que harán parte de la FSS; así mismo las dimensiones de las diversas figuras para las ranuras de la celda unidad (largo, ancho, grosor).

6.1.4. Fase 4: Evaluación de resultados

Posteriormente, por medio de escenarios de prueba en entornos de simulación como la guía de onda WR340, se validan los resultados obtenidos mediante las métricas de desempeño para aplicaciones de filtrado en comunicación. Estos se comparan con las métricas de filtrado realizadas inicialmente, para así comprobar que el proceso de diseño por medio de algoritmos bioinspirados cumple los requerimientos estipulados.

Capítulo 7

Desarrollo Conceptual

7.1. Fase 1

7.1.1. Selección de geometrías

Como primera medida, se realiza una revisión bibliográfica empleando los recursos del CRAI, revistas científicas, publicaciones en conferencias y documentos de investigación, cuyo contenido esté relacionado con modelos o diseños de estructuras metamateriales de tipo FSS.

Se busca específicamente que su estructura sea de tipo CSRR, ya sea anillo u Ω , cuya aplicación corresponda a procesos de filtrado de ondas EM (preferiblemente pasabanda) y que su región de trabajo esté entre 1.7GHz y 3.3GHz. De acuerdo con las características mencionadas anteriormente, se seleccionaron tres modelos de celdas FSS que se encuentran relacionados a continuación junto con sus dimensiones, las cuales se obtuvieron de [68], [69] y [35].

– Modelo 1: Anillo CSRR

En la figura 12 se destaca una estructura tipo anillo de dimensiones $r = 6.7\text{mm}$, $d = 2\text{mm}$, $s = 0.8\text{mm}$ y $w = 1\text{mm}$; el material de la lámina empleada es un conductor eléctrico perfecto (PEC) y su comportamiento es de tipo rechaza banda a frecuencia de 2.4GHz. Se seleccionó este modelo para evaluar su desempeño y posteriormente convertirlo a un filtro pasabanda.

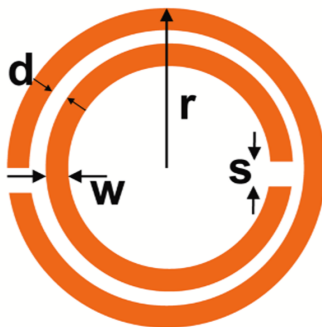


FIGURA 12: Anillo CSRR [68]

– Modelo 2 : Cuadrado CSRR

Este modelo corresponde a una geometría de doble cuadrado para una antena metálica microstrip que actúa como filtro pasabanda a una frecuencia de 3.18GHz con los siguientes parámetros: $a = 5.9\text{mm}$, $b = 0.3\text{mm}$, $c = 0.5\text{mm}$ y $d = 0.6\text{mm}$; esta estructura se destaca en la figura 13.

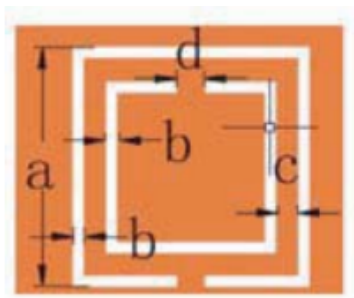


FIGURA 13: Cuadrado CSRR [69]

– Modelo 3: Omega

Según [35], se obtienen mejores resultados de transmisión usando una estructura tipo Ω como la de la figura 14, ya que permite un mejor control del ancho de banda del filtro en comparación con una estructura tipo anillo. Esta geometría tiene un comportamiento de tipo pasabanda, con una frecuencia de resonancia de 2.4GHz y además ya está bajo un escenario de prueba con la guía de onda WR340.

7.1.2. Pruebas iniciales

Una vez seleccionadas las geometrías, se realizan pruebas iniciales para evaluar su comportamiento cambiando el escenario de prueba al de la guía de onda WR340 y adaptando la lámina

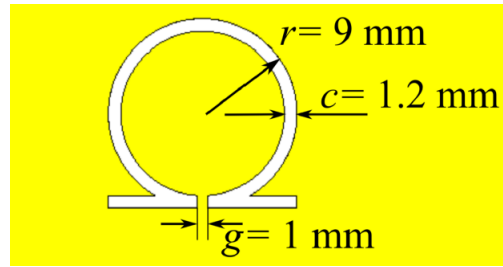


FIGURA 14: Omega CSRR [35]

de la estructura a material de aluminio. Bajo estas condiciones se realizan las simulaciones de los modelos anillo y cuadrado lo cual se destaca en las figuras 15 y 16.

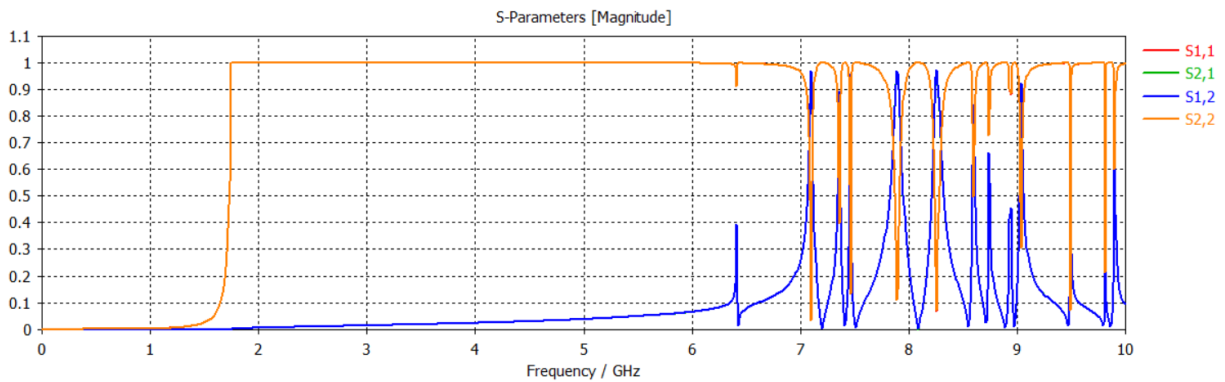


FIGURA 15: Comportamiento frecuencial de parámetros S de geometría anillo sin sintonizar

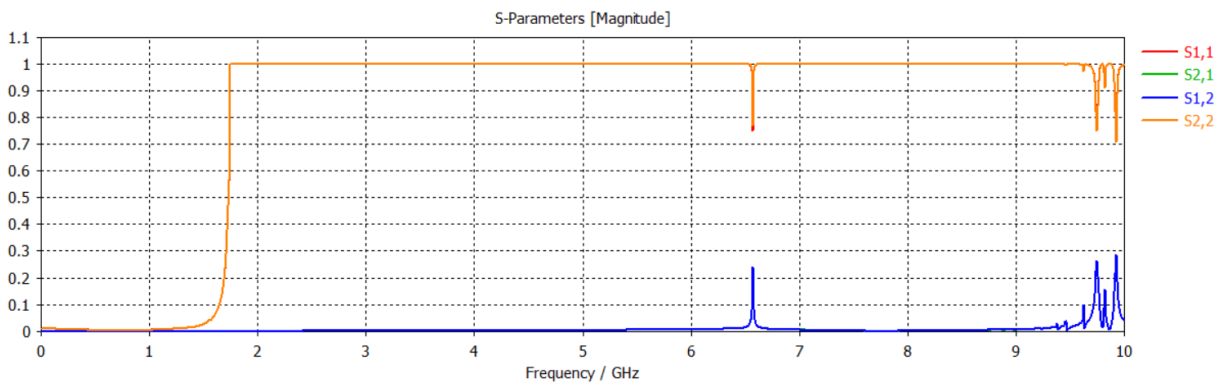


FIGURA 16: Comportamiento frecuencial de parámetros S de geometría cuadrado sin sintonizar

De acuerdo con las figuras 15 y 16 se observa que al variar las condiciones de las geometrías, el comportamiento cambió significativamente de modo que la respuesta actual no es la indicada de acuerdo con lo establecido para el desarrollo del presente proyecto. Por tal razón, es necesario sintonizar los filtros como pasabandas y con frecuencia central de 2.4GHz. Esto se realiza

variando los diferentes parámetros de geometría hasta tener un comportamiento aceptable de la celda; los resultados de dicha sintonización se encuentran en el capítulo siguiente.

7.1.3. Pruebas tipo espejo

Al lograr sintonizar las diferentes estructuras bajo los parámetros mencionados anteriormente, se realizan pruebas evaluando la simetría espejo con una, dos y tres celdas unidad por lámina. De esta manera se determina cuál de estas tiene un mejor comportamiento para el escenario de prueba en cuestión.

7.2. Fase 2

En la figura 17 se destaca visualmente la estrategia para el desarrollo del algoritmo bioinspirado, basado en la metodología presentada en el capítulo anterior.

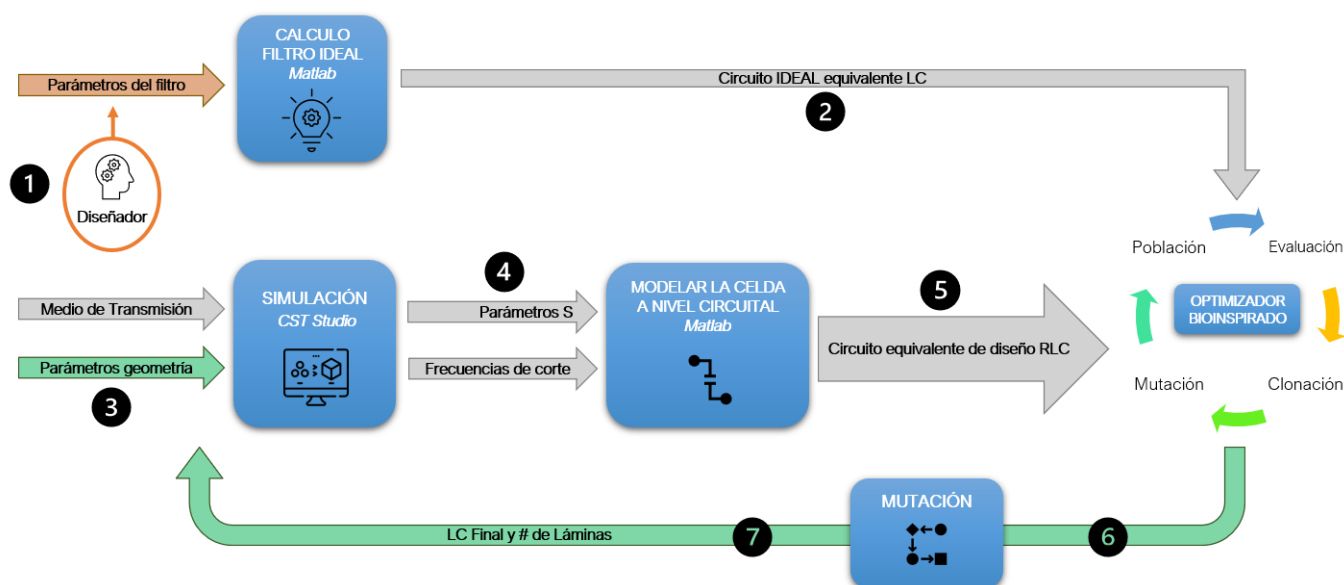


FIGURA 17: Desarrollo conceptual

7.2.1. Entrada de parámetros por parte del usuario

En primera medida, se le solicita al usuario las frecuencias de corte del filtro que desea diseñar, estas deben estar en un rango entre 2GHz y 2.7GHz, de acuerdo con pruebas realizadas se establece dicho intervalo.

7.2.2. Cálculo del circuito ideal equivalente

Una vez estipulados los parámetros iniciales de diseño, por medio de las ecuaciones (5.1) a la (5.6) y el uso del software Matlab, se plantea el modelo circuital equivalente RLC ideal; es decir, es el comportamiento al cual se busca llegar por medio del proceso de la figura 17.

7.2.3. Inicializar o actualizar parámetros de la geometría seleccionada

A través de Matlab se indican los valores de los diferentes parámetros de las geometrías, como ancho, radio o distancia, para su posterior prueba en el simulador de onda completa.

Cabe destacar que dichos valores se asignan inicialmente de manera aleatoria, en un rango específico de funcionamiento. Cuando el algoritmo vuelve a esta etapa, estos se asignan dependiendo de lo ocurrido en la etapa 7.2.6 y sobre todo en el error medido entre lo ideal con el funcionamiento actual de la celda.

En cuanto al medio de transmisión, los parámetros de simulación se ajustan para las especificaciones necesarias estableciendo como entorno de prueba la guía de onda WR340; además de indicar que el material conductor de las celdas es aluminio.

7.2.4. Obtención de parámetros de simulación en CST Studio Learning Edition

Se realizan las simulaciones correspondientes por medio del software CST Studio Learning Edition, y enseguida se extraen los resultados 1D de la celda. En específico se requieren los parámetros S y las frecuencias de corte las cuales se obtienen al realizar mediciones en -3dB en los parámetros S.

7.2.5. Cálculo del circuito equivalente RLC de la celda metamaterial

Con los datos obtenidos en la etapa anterior, se emplean a través de Matlab las ecuaciones (5.1) a la (5.6) con el fin de establecer el circuito RLC de la celda actual bajo sus parámetros reales. Es decir, es el comportamiento actual del filtro metamaterial pasabandas.

7.2.6. Optimizador bioinspirado

De acuerdo con lo desarrollado en las etapas 7.2 y 7.5, las variables de ambos circuitos RLC equivalentes ingresan al algoritmo bioinspirado. La población son los parámetros obtenidos de la celda metamaterial y la referencia son los parámetros ideales seleccionados en la etapa 7.1 por el usuario o diseñador.

En la función *fitness* del algoritmo, se tiene como métrica el error cuadrático medio entre los datos actuales y los ideales. De esta manera es posible cuantificar el error y evaluar si el comportamiento de la celda es aproximado al funcionamiento planteado por el usuario.

El proceso descrito en la figura 17, tiene en cuenta una población inicial, posteriormente se evalúa su desempeño, luego hace una clonación de esta población para luego mutarla y buscar una mejor respuesta (disminución del error).

7.2.7. Mutación

En esta etapa, se cambian uno o más parámetros de la geometría seleccionada con el fin de variar el comportamiento del filtro y asegurar una mejor respuesta.

Si la métrica de desempeño aún no cumple, entonces se realiza nuevamente el procedimiento descrito anteriormente. En caso tal, que el error cuadrático medio sea menor al 0.31 %, el algoritmo finalizara.

7.3. Fase 3

7.3.1. Reevaluación

De acuerdo con los cambios generados en la etapa 7.2.7, ingresan los parámetros al sistema repitiendo cíclicamente los pasos 3 al 7 hasta encontrar la respuesta cuyo error satisfaga el criterio del 0.31 % definido anteriormente.

En la tabla 1, se encuentra condensada la información correspondiente a todos los parámetros a tener en cuenta para desarrollar el filtro pasabandas para la guía de onda WR340.

El usuario debe proporcionar las frecuencias de corte a las que el filtro pasabandas debe operar. Con esta información, el algoritmo selecciona la geometría adecuada y sus dimensiones

REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	
Usuario	Algoritmo
Frecuencias de corte entre 2GHz y 2.7GHz	Tipo de Geometría
	Parámetros: radio, ancho, lado y demás.
	Número de capas
	Obtener un error menor al 0.31%

TABLA 1: Requerimientos de diseño para filtro pasabanda de la guía de onda WR340

correspondientes. Además, lleva a cabo una evaluación del número de capas de las celdas metamateriales, todo ello con el objetivo de garantizar un error inferior al 0.31 %.

En la figura 1, se destaca el diagrama de bloques del algoritmo ABC adaptado para el trabajo desarrollado en este documento.

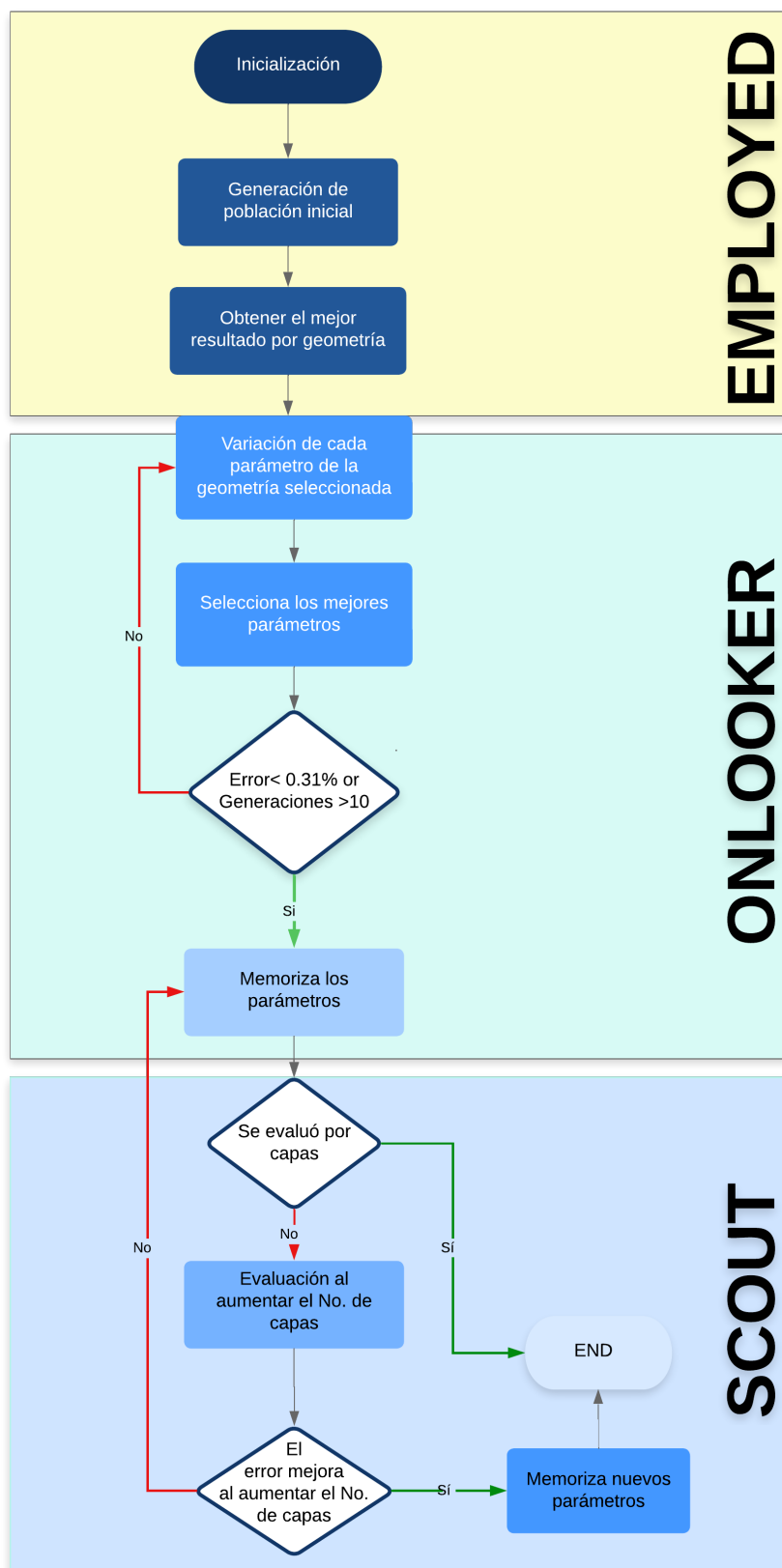


FIGURA 18: Diagrama de bloques del algoritmo ABC adaptado al bioinspirado desarrollado para el presente trabajo

Capítulo 8

Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados con relación al desarrollo conceptual y el diseño metodológico, donde se describen los pasos para cumplir los objetivos propuestos. De esta manera se muestran los resultados y el funcionamiento del algoritmo bioinspirado para el diseño de filtros pasabanda. A su vez, se proporcionan métricas y estadísticas que permiten la validación de los resultados obtenidos durante el desarrollo.

8.1. Fase 1: Normalización de Geometrías

8.1.1. Adaptación de geometrías a la guía de onda WR340

De acuerdo con lo planteado en la metodología, se sintonizaron las diferentes geometrías seleccionadas a una frecuencia de resonancia aproximada a los 2.4GHz. La razón de hacer esto, es porque en los artículos donde se obtuvieron dichos modelos, se utilizaba otro tipo de medio de transmisión. Por lo tanto, fue necesario adaptarlas a la guía de onda WR340, que es el escenario de prueba predispuesto para este proyecto. A continuación, se presentan las dimensiones de cada una de las geometrías como celdas unitarias y el comportamiento de estas, validando su adecuada sintonización.

– Geometría Anillo

En primer lugar, la geometría tipo anillo que tiene como parámetros de diseño el radio del anillo exterior (r), ancho (w), distancia entre anillos (d) y gap (s), cuyos valores se destacan en la figura 19.

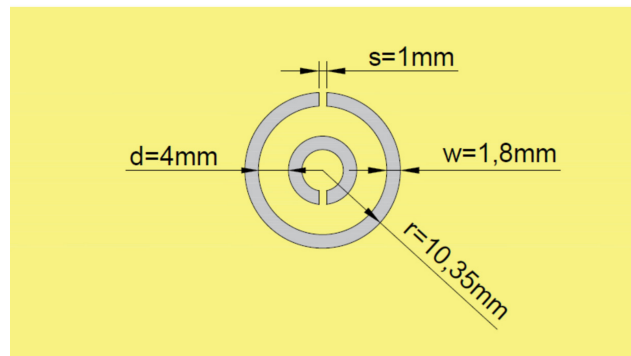


FIGURA 19: Celda unidad de geometría anillo

Por otro lado, es de resaltar que inicialmente esta geometría era de tipo rechazabanda, por lo cual, se realizó una rotación de -90° grados para que los espacios o *gaps* se ubicaran en la parte superior e inferior y no a los laterales, de esta manera se solucionó el desdoblamiento frecuencial y la lámina paso de ser rechazabanda a pasabanda.

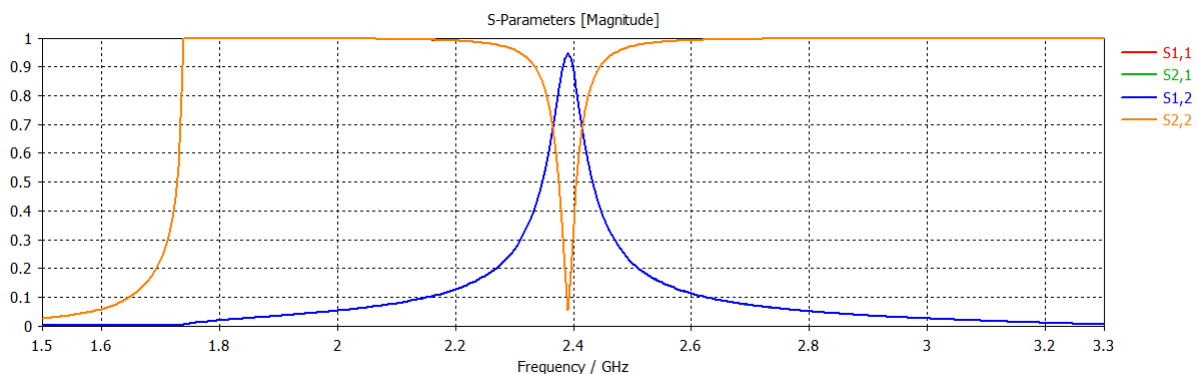


FIGURA 20: Parámetros S de celda unidad geometría anillo

Así mismo, se resalta que la lámina es de aluminio con 1mm de espesor y el software CST Studio permite realizar la simulación teniendo en cuenta el material y la respuesta de las ondas EM a través de este. Los parámetros S de la geometría tipo anillo se relacionan en la figura 20.

– Geometría Cuadrada

La geometría de topología cuadrada (figura 21) tiene como parámetros de diseño lado (a), ancho (b), distancia entre cuadrados (c) y gap (d). La figura 22 permite visualizar el comportamiento de la celda por medio de los parámetros S, comprobando su funcionamiento como filtro pasabanda de frecuencia de resonancia aproximada a 2.4GHz.

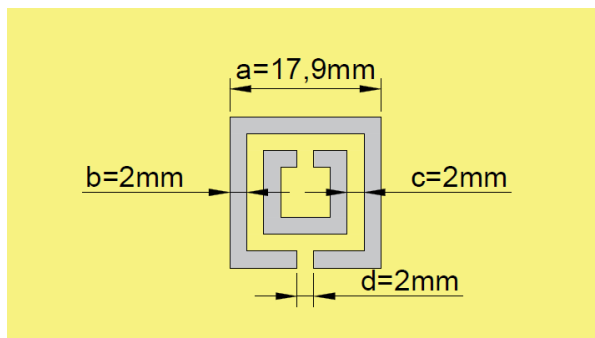


FIGURA 21: Celda unidad de geometría cuadrada

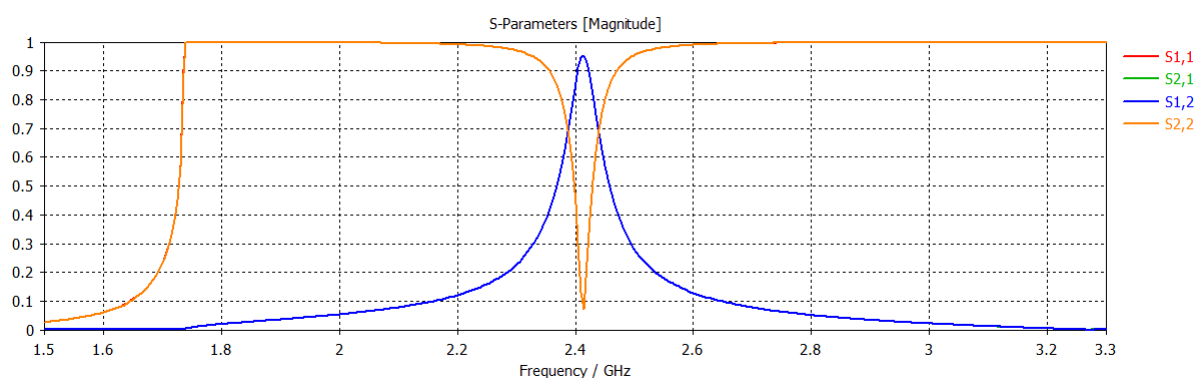


FIGURA 22: Parámetros S de celda unidad geometría cuadrada

– Geometría Omega

Por último, la celda de tipo omega tiene parámetros como radio (r), ancho del anillo (c) y gap (g), los cuales se observan en la figura 23 y así mismo su comportamiento en la 24.

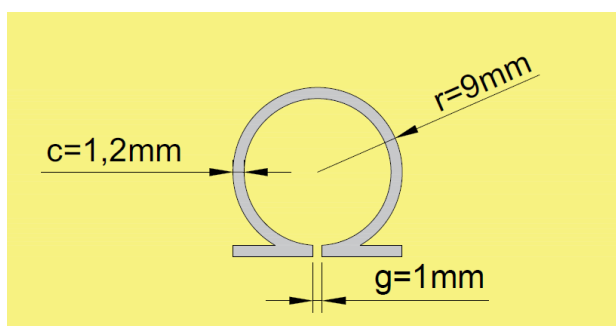


FIGURA 23: Celda unidad de geometría omega

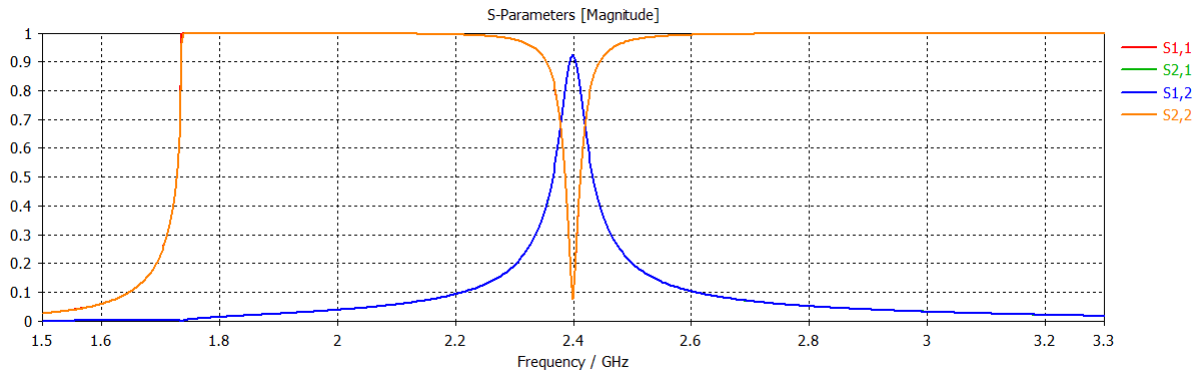


FIGURA 24: Parámetros S de celda unidad geometría omega

8.1.2. Pruebas tipo espejo

Es necesario realizar pruebas evaluando el comportamiento de cada geometría con una, dos y tres celdas unidad por lamina. Además de hacer una simetría tipo espejo con cada una de estas, ya que según lo expuesto en [35] si no se cumple este requisito ocurrirá desdoblamiento frecuencial, lo cual no es un comportamiento deseado para los objetivos del presente proyecto.

– Geometría Anillo

En la figura 25 se encuentran gráficamente las diferentes celdas de geometría anillo a analizar, y posteriormente, en la figura 26 se encuentran los resultados obtenidos.

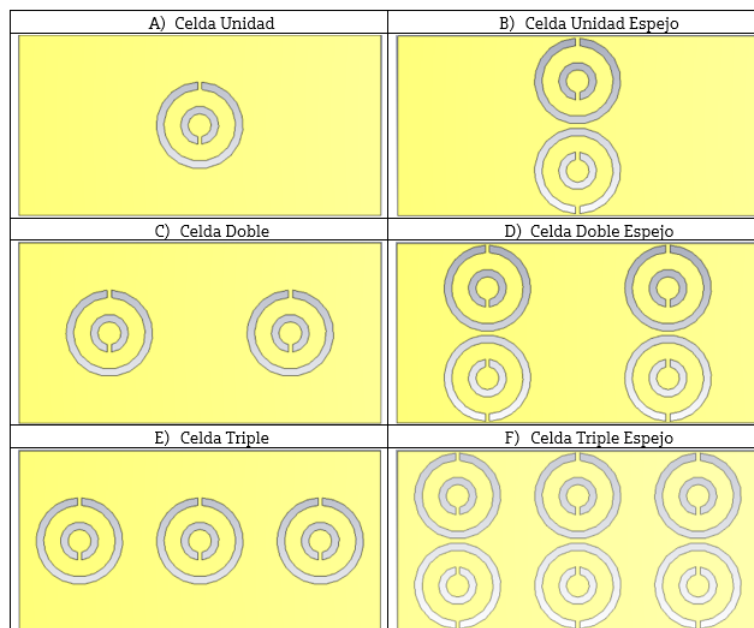


FIGURA 25: Diferentes láminas de la geometría anillo

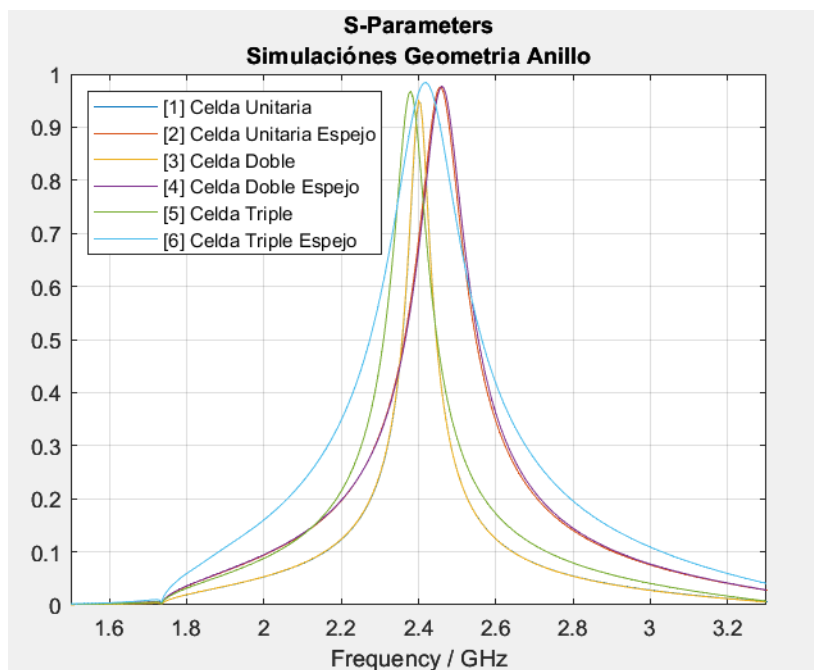


FIGURA 26: Comportamiento de las diferentes láminas anillo

– Geometría Cuadrada

Para la geometría cuadrada, las gráficas correspondientes a sus diferentes celdas se encuentran en la figura 27, y enseguida su respuesta en parámetros S_{21} en la figura 28.

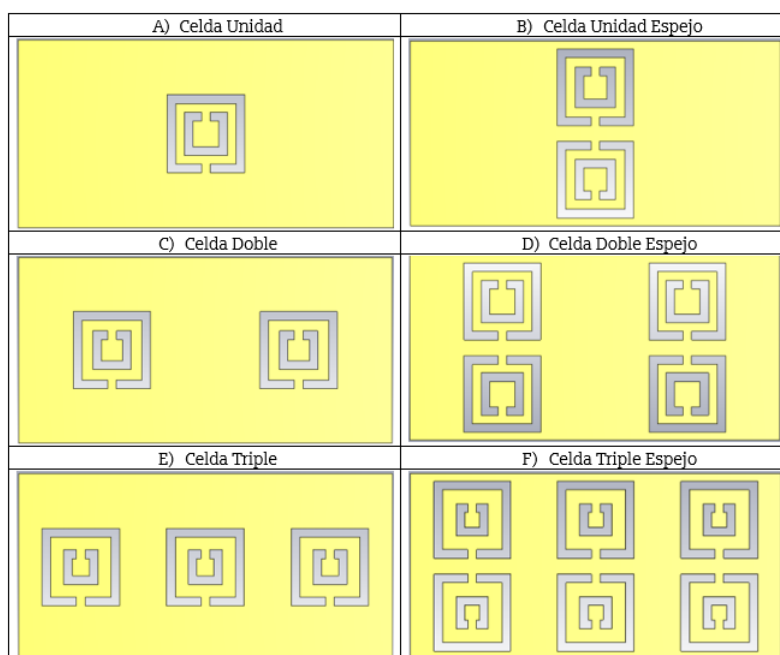


FIGURA 27: Diferentes láminas de la geometría cuadrada

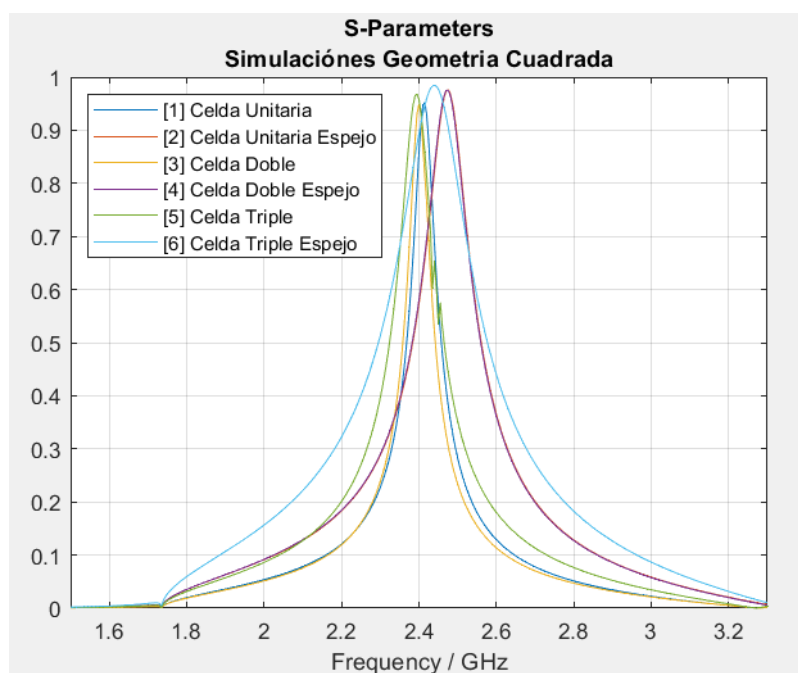


FIGURA 28: Comportamiento de las diferentes láminas cuadradas

– Geometría Omega

Las gráficas correspondientes a la geometría omega se encuentran en la figura 29, y así mismo en la figura 30 sus resultados.

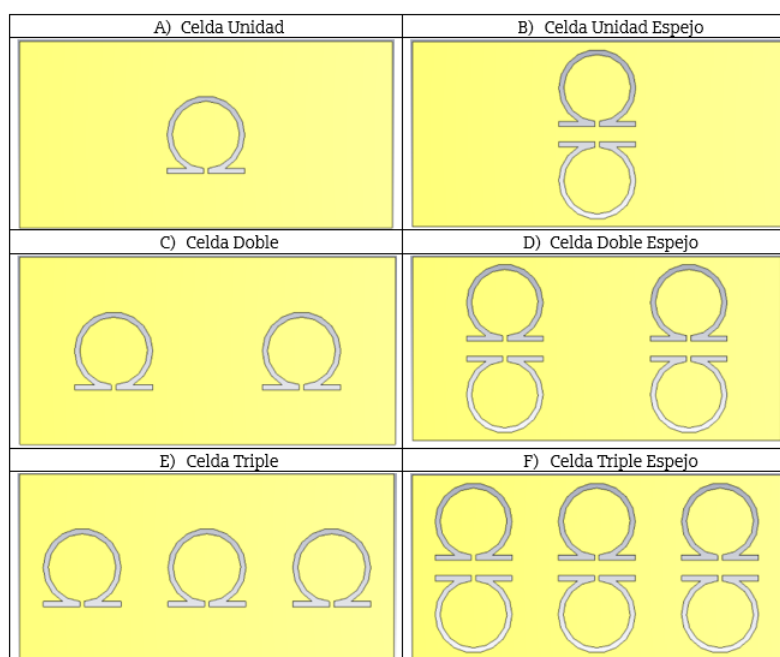


FIGURA 29: Diferentes láminas de la geometría omega

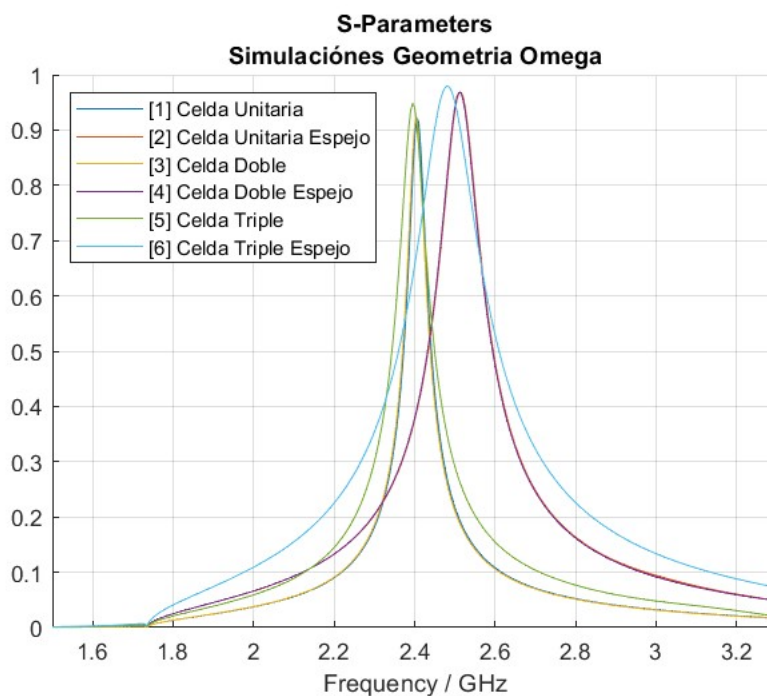


FIGURA 30: Comportamiento de las diferentes láminas omega

– Selección de lámina por topología

De acuerdo con las figuras 26, 28 y 30 se destaca que la topología con el mayor ancho de banda es la celda triple en espejo, por tal razón es la más adecuada para el estudio en cuestión. Al ofrecer desde etapas iniciales un gran ancho de banda, permite acceder a mayores rangos de funcionamiento del filtro.

8.2. Fase 2: Desarrollo del algoritmo

8.2.1. Obtención de datos

En primera medida, se utiliza la librería TCST Interface la cual permite la conexión entre Matlab y el simulador de onda completa. Gracias a dicha librería es posible la transferencia de datos entre los programas y se obtiene la información en tiempo real del simulador.

Por otro lado, las frecuencias de corte necesarias para el diseño de filtros se ingresan directamente en el código de Matlab. De acuerdo con pruebas realizadas se establece que el rango de trabajo sea de 2GHz - 2.7GHz. Para este caso, se indicó que las frecuencias de corte sean

2.332GHz y 2.502GHz; es decir un filtro con un ancho de banda de 170MHz y una frecuencia de resonancia aproximada de 2.415GHz.

8.2.2. Fase Inicial del Algoritmo

Para iniciar el algoritmo, se genera un grupo inicial de poblaciones en un rango de 8 a 20. Mediante pruebas, se determinó que este rango es adecuado para obtener respuestas satisfactorias; de lo contrario, se obtienen valores imprecisos. Esto permite realizar un barrido en la frecuencia de trabajo establecida, haciendo que la búsqueda sea más rápida y eficiente.

Se tomaron en cuenta los parámetros que más varían el comportamiento de las celdas (radio en anillo y omega, lado del cuadrado). Cabe destacar que, en algunas frecuencias de trabajo, los parámetros S presentan discontinuidades; es decir, comportamientos indeseados en la señal. El algoritmo se adaptó para que detecte dichos errores y elimine esa señal específica. De esta forma el código busca ser más preciso al momento de ofrecer una solución que sea válida y no presente interferencias.

Se generó un valor aleatorio por medio de la ecuación (5.7) para la determinación exacta de la población inicial. En este caso, el valor obtenido fue 13, cumpliendo con los requisitos al encontrarse en el rango de 8 a 20. Por lo tanto, se simularon 13 iteraciones en el rango de frecuencias establecido para cada una de las geometrías, sumando un total de 39 simulaciones.

8.3. Fase 3: Ajuste de filtros en guía de onda

8.3.1. Selección de Geometría

De acuerdo con la fase anterior, se generaron los siguientes resultados por geometría:

En la figura 31 se encuentra la población inicial de la celda tipo anillo, esta indica que de las 13 simulaciones realizadas fueron validas únicamente 8, quiere decir que en los modelos computacionales número 2,3,6,9 y 13 hubo discontinuidades y por tanto el algoritmo las descartó al no ser favorables como filtros.

En el caso de la geometría cuadrada, la figura 32 indica que solo tres simulaciones fueron satisfactorias para el caso en cuestión. En contraste para la celda de tipo omega, en la figura 33 se demuestra que 7 de las 13 simulaciones no presentaron discontinuidades y por tanto son aptas para su aplicación en procesos de filtrado.

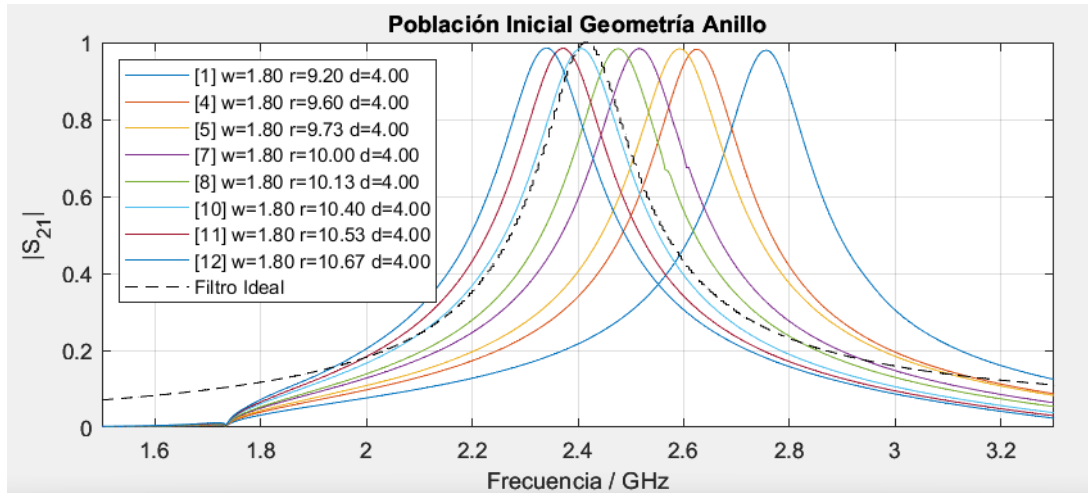


FIGURA 31: Resultado inicial geometría anillo

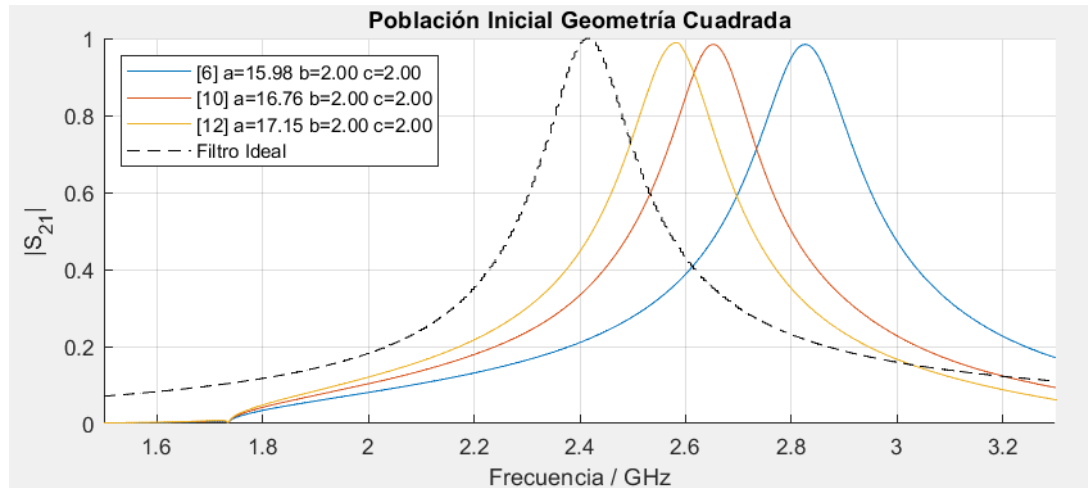


FIGURA 32: Resultado inicial geometría cuadrada

En paralelo a los resultados presentados anteriormente, el algoritmo realiza una medición entre el filtro ideal y cada una de las 39 simulaciones realizadas. Esta medición es el error cuadrático medio, el cual resta punto a punto la señal ideal y la actual, se eleva al cuadrado y luego este resultado se suma y se divide en el número de muestras, esto también teniendo en cuenta la ecuación (5.8) del algoritmo GBC. De acuerdo con esto, se obtuvieron los resultados de la figura 34, en la leyenda la [A] indica que es el mejor error obtenido en la figura anillo, la [O] omega y [C] la geometría cuadrada, cada una con sus parámetros correspondientes.

En concordancia con lo anterior, el mejor error de la geometría anillo fue de 1.6574 %, para la figura omega de 15.7779 % y por último, la celda cuadrada obtuvo un error de 307.9114 %. Esto indica, que de las tres geometrías evaluadas inicialmente, el error mínimo lo tuvo la celda de tipo anillo.

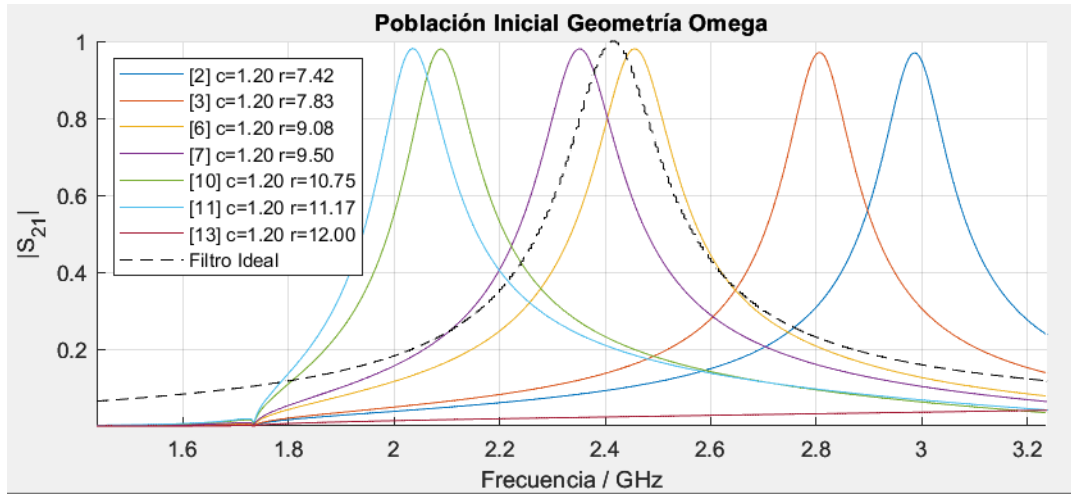


FIGURA 33: Resultado inicial geometría omega

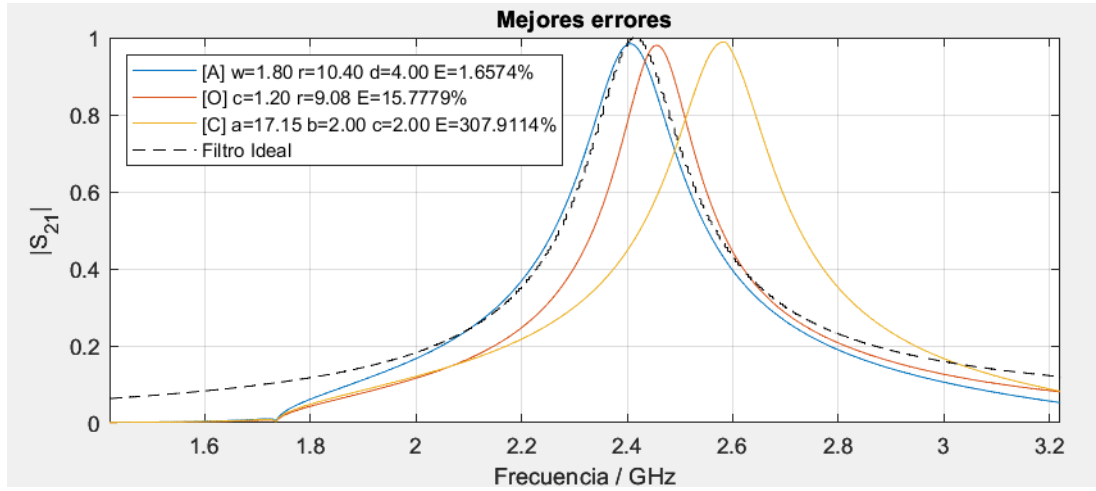


FIGURA 34: Mejor error por geometría

8.3.2. Aplicación del Bioinspirado

Gracias a la fase anterior, fue posible obtener una respuesta inicial bastante aproximada a lo solicitado. Posterior a esto, el algoritmo selecciona la geometría que tuvo el menor error junto con sus parámetros para buscar una respuesta más aproximada.

El algoritmo recibe dichos parámetros, y evalúa cada uno de estos de acuerdo con un valor delta (generado por la ecuación (5.9)) y un intervalo de valores dependiendo de la magnitud del error, es decir, si el mejor error obtenido es menor al 3 %, entonces el intervalo de la variable delta es de 0.005-0.03. Si es el error esta entre el 3 % y el 9 %, el rango es de 0.031-0.1; finalmente si el error es superior al 9 %, entonces el margen de valores es de 0.1-0.5. Este valor delta indica el cambio que tendrá cada parámetro por arriba y por debajo del seleccionado. Por ejemplo, si

el parámetro correspondiente al radio del anillo (r) es igual a 5 ($r=5$), y el valor delta fue de 0.1, entonces el algoritmo evalúa la celda en $r=4.9$ ($r-\text{delta}$) y $r=5.1$ ($r+\text{delta}$), de esta manera se busca variar los parámetros de forma controlada para disminuir el error lo máximo posible.

El procedimiento detallado anteriormente se realiza repetidamente hasta obtener un error menor al 0.31 % o hasta superar 10 generaciones, en otras palabras, si el algoritmo realizó más de 10 veces el mismo procedimiento, indica que no fue posible obtener una respuesta cuyo error cuadrático medio sea menor al valor estipulado.

8.4. Fase 4: Evaluación de resultados en escenarios de prueba

8.4.1. Evaluación por métricas de desempeño

Para este caso en cuestión, la figura 35 muestra el mejor error obtenido, además de sus parámetros, en cada una de las generaciones. En la primera, que es la misma de la fase anterior, el error es de 1.6574 %; en la segunda generación, el menor error obtenido se logró variando el parámetro r , permitiendo disminuirlo a un 0.3173 %; finalmente en la tercera generación el error cumplió satisfactoriamente con el valor mínimo establecido y logro ser de 0.1986 %.

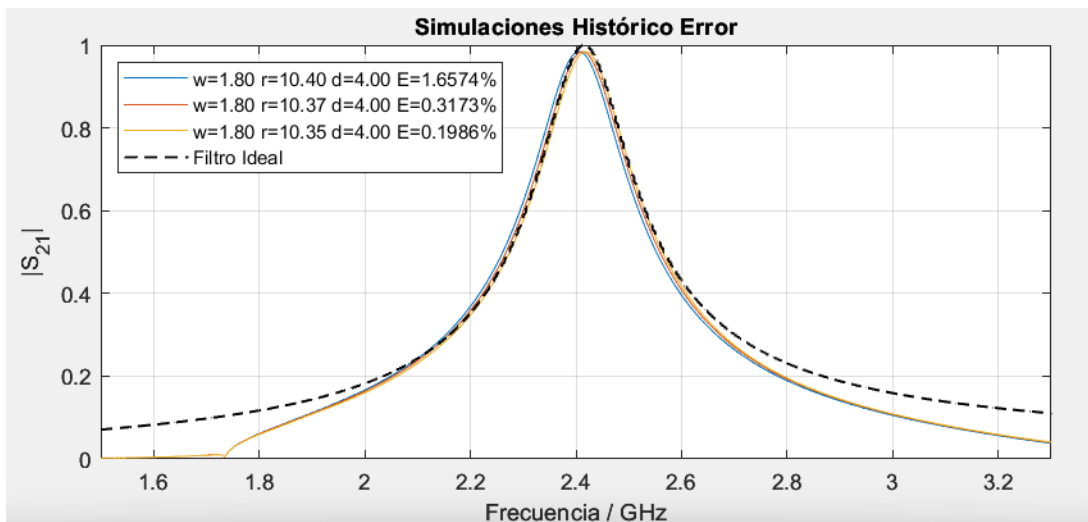


FIGURA 35: Aplicación del bioinspirado a la celda tipo anillo

En la figura 36, se muestra un acercamiento aproximado al 70.7 % de filtro pasabanda, con el fin de representar visualmente y en mayor detalle el histórico del error del bioinspirado, para este caso de estudio.

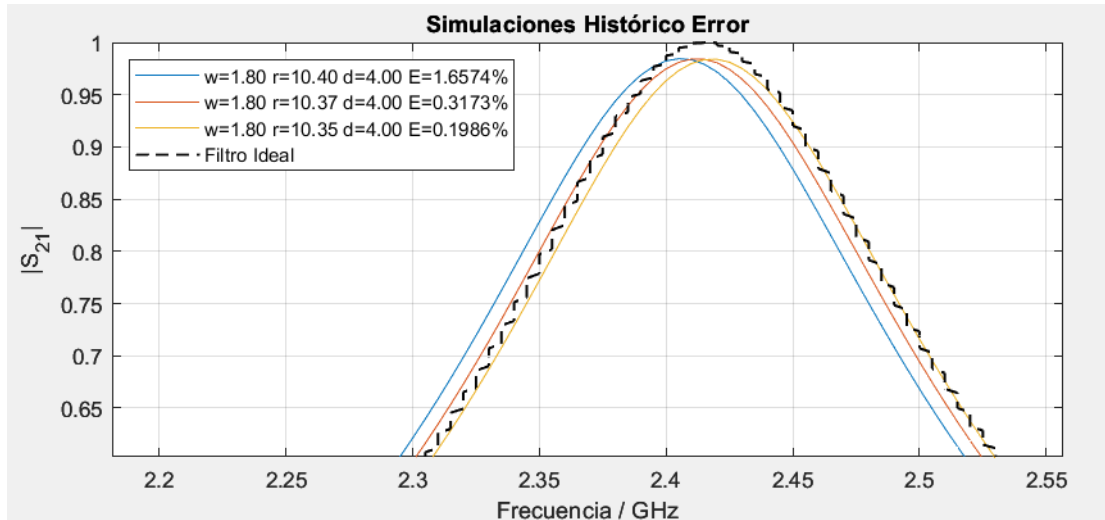


FIGURA 36: Acercamiento aproximado en 0.707 de la figura 35

8.4.2. Obtención de Resultados Finales

De acuerdo con los resultados de la figura 36, el menor error fue de 0.1986 % obteniéndolo cuando los parámetros de la geometría anillo son $w=1.8\text{mm}$, $r=10.35\text{mm}$ y $d=4\text{mm}$.

Para finalizar, se evalúa si al colocar más capas de celda metamaterial el filtro mejora su respuesta. Cabe destacar que la distancia a la cual se encuentran las capas oscila en un intervalo de 0.05mm- 0.4mm, y se selecciona aleatoriamente ya que es un rango satisfactorio de operación. Para este caso, este valor fue de 0.09445mm de distancia entre cada capa.

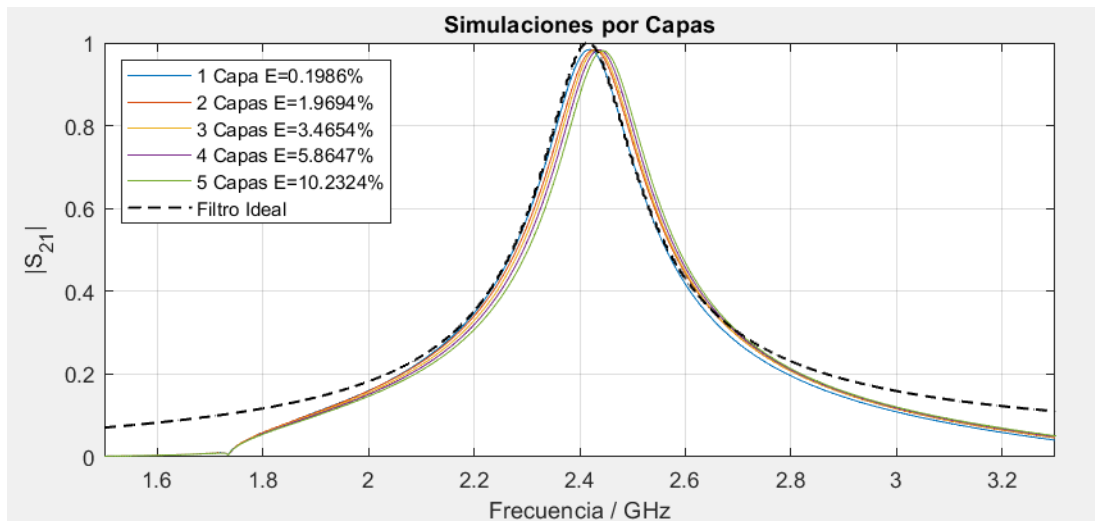


FIGURA 37: Resultado de capas en paralelo de geometría anillo

En la figura 38, se encuentra una perspectiva visual del ajuste entre una y cinco capas de la celda metamaterial de tipo anillo a la guía de onda WR340. Los resultados de esta se encuentran en la figura 37.

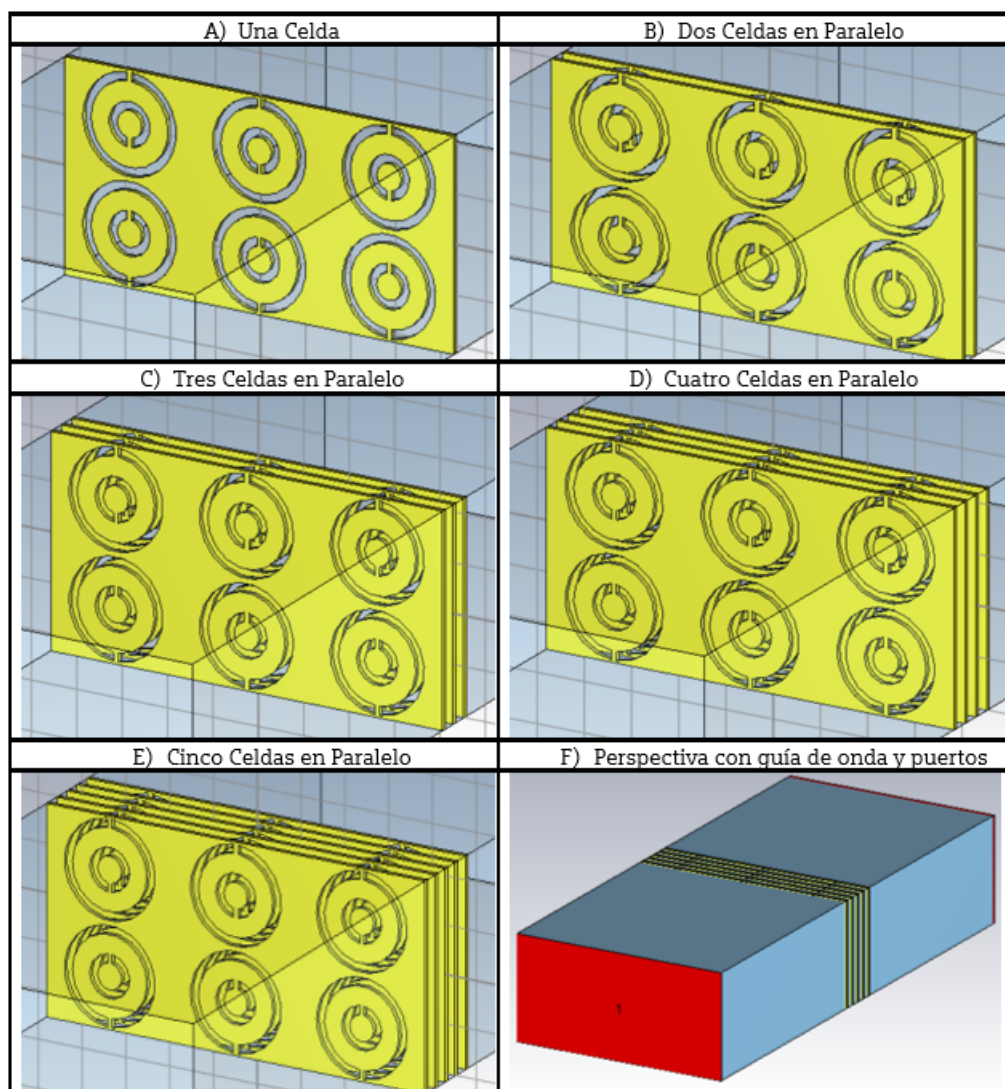


FIGURA 38: Capas en paralelo y perspectiva con guía de onda y puertos

Los resultados indican que el filtro pasabandas con una sola celda metamaterial presenta el menor error, con un 0.1986 %. En cambio, las demás capas muestran un aumento gradual en el error, que va desde el 1.964 % hasta el 10.2324 %.

La figura 39, muestra un acercamiento aproximado al 70.7 % de filtro pasabanda, con el fin de representar visualmente y en mayor detalle el comportamiento de las celdas en paralelo de la geometría anillo para este caso de estudio.

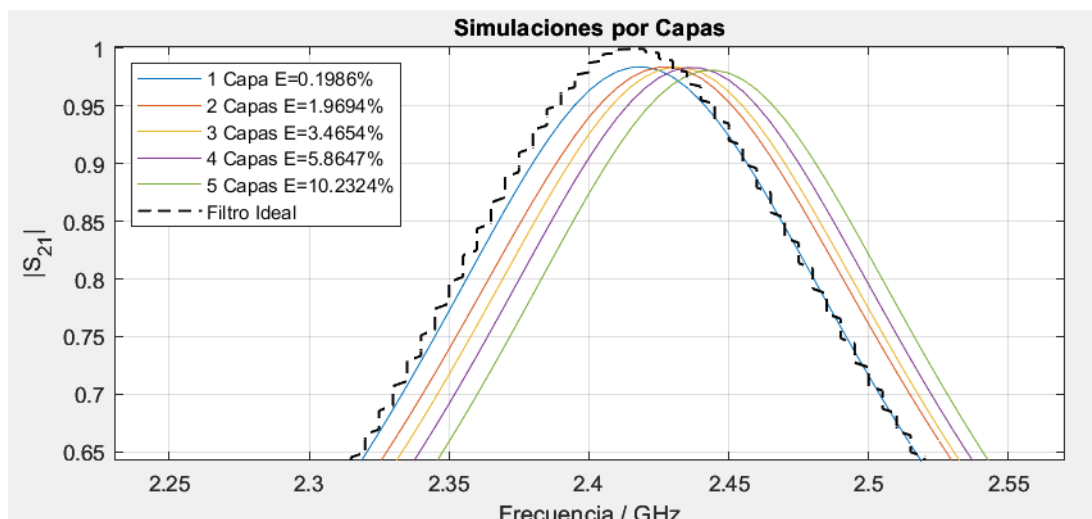


FIGURA 39: Acercamiento aproximado en 0.707 de la figura 37

De acuerdo con lo estipulado en el marco teórico del presente documento, las celdas metamateriales se pueden modelar como circuitos RLC y una función de transferencia. En concordancia con lo anterior y con el desarrollo conceptual del proyecto (figura 17) el número de láminas o celdas para los requerimientos de diseño del usuario es una, y la función de transferencia se relaciona en la figura 40.

```
>> TF_Definitiva

TF_Definitiva =

      1.037e09 s
-----
s^2 + 1.037e09 s + 2.305e20

Continuous-time transfer function.
```

FIGURA 40: Funcion de transferencia definitiva

En la tabla 2 se resumen todos los datos correspondientes a cada fase del desarrollo del algoritmo, incluyendo los resultados obtenidos. En la primera etapa, se lleva a cabo la selección de la geometría, donde se observa que la geometría de anillo muestra el menor error, alcanzando un 1.6574 % con los siguientes parámetros de diseño: $w=1.8\text{mm}$, $r=10.40\text{mm}$ y $d=4.0\text{mm}$. Durante la fase de aplicación del algoritmo, se exploran diversas combinaciones de parámetros para la geometría seleccionada previamente, y la que presenta el menor error avanza a la etapa final. En este caso, se logra un error de 0.1986 % con los siguientes parámetros: $w=1.8\text{mm}$, $r=10.35\text{mm}$ y $d=4\text{mm}$. Por último, se realiza una evaluación por capas de la celda en cuestión para analizar su comportamiento, y se observa que el error mínimo persiste en 0.1986 % cuando solo hay una capa. Considerando estos resultados, se concluye que la mejor configuración para

el filtro pasabandas, con requerimientos de frecuencias de corte de 2.332GHz y 2.502GHz para la guía de onda WR340, consiste en la utilización de una sola lámina de la geometría anillo, con parámetros: $w=1.8\text{mm}$, $r=10.35\text{mm}$ y $d=4\text{mm}$.

Selección de geometría (figura 34)		
GEOMETRÍA	PARÁMETROS (mm)	ERROR
Anillo	$w=1.8$, $r=10.40$, $d=4.0$	1.6574 %
Omega	$c=1.20$, $r=9.08$	15.7779 %
Cuadrada	$a=17.15$, $b=2.00$, $c=2.00$	307.9114 %
Aplicación del Bioinspirado (figura 36)		
GEOMETRÍA	PARÁMETROS (mm)	ERROR
Anillo	$w=1.8$, $r=10.40$, $d=4.0$	1.6574 %
Anillo	$w=1.8$, $r=10.37$, $d=4.0$	0.3173 %
Anillo	$w=1.8$, $r=10.35$, $d=4.0$	0.1986 %
Evaluación por Capas (figura 39)		
No. CAPAS	DISTANCIA (mm)	ERROR
1	---	0.1986 %
2	0.09445	1.9694 %
3	0.09445	3.4654 %
4	0.09445	5.8647 %
5	0.09445	10.2324 %
Resultado final del diseño del filtro		
Celda tipo Anillo de parámetros:	No. de Capas	Error mínimo obtenido
$w=1.8$, $r=10.35$, $d=4.0$	1	0.1986 %

TABLA 2: Resultados por etapa de las fases 3 y 4

Capítulo 9

Conclusiones y Trabajos Futuros

9.1. Conclusiones

– Gracias a la investigación realizada en la fase 1 del desarrollo conceptual, fue posible obtener las geometrías con las cuales se desarrolló el presente proyecto de grado. Cabe resaltar que en la sección 7.11, se propone la celda tipo anillo rechazabanda en 2.4GHz, y teniendo en cuenta que para el presente trabajo se requerían filtros pasabanda; se comprobó que su desdoblamiento frecuencial era reversible al ubicar los espacios del anillo de manera vertical y no horizontal. De acuerdo con las investigaciones proporcionadas en las secciones 4.2 y 4.3, se hizo una rotación de -90° con el fin de obtener un filtro pasabanda a partir de uno rechazabanda.

– En los resultados de las figuras 26, 28 y 30 se demuestra que al utilizar celdas triples en espejo se obtiene el mayor ancho de banda respecto a las demás topologías sin presentar desdoblamiento frecuencial. Esto ocurre porque el modelo de propagación de la guía de onda depende del ancho, mas no de la altura; en otras palabras, la simetría espejo va en línea con la propagación de las ondas dentro de la WR340, por lo cual el comportamiento de filtro pasabanda se cumple. Además, al emplear todo el espacio posible de la celda metamaterial se distribuye equitativamente el campo eléctrico y magnético y por lo tanto el ancho de banda aumenta significativamente. Es de resaltar que al trabajar con la celda triple espejo presenta restricciones en el rango de valores de sus parámetros, si estos son muy pequeños la simulación presenta errores, si por el contrario son muy grandes superan el límite geométrico y se superponen las figuras ocasionando que se pierda su forma. Por lo anterior, fue fundamental encontrar el rango de valores satisfactorio para cada geometría.

– La librería TCST Interface se utilizó como puente entre Matlab y el simulador de onda completa; no obstante, se presentaron inconvenientes al momento de utilizarla por la falta de funciones para borrar los datos de simulación, puesto que al realizar nuevas simulaciones se sobrescribían en las realizadas previamente. Esto ocasionaba que los datos enviados a Matlab salieran alterados o erróneos y por tanto no fueran confiables. Para abordar este problema, se propuso una solución: en el código fuente de la librería TCST Interface, se comentó la línea 1752 para permitir el cierre del proyecto sin confirmación. Posteriormente, se creó una función en Matlab que facilitaba la eliminación de la carpeta de resultados de las simulaciones desde la consola de Windows. De esta manera, al abrir el proyecto nuevamente, no quedaban datos previos de simulaciones, permitiendo la ejecución de nuevas simulaciones sin interrupciones.

– En ciertas frecuencias de trabajo ocurrían discontinuidades en las señales, es decir, comportamientos indeseados que alteraban el funcionamiento adecuado del filtro. De acuerdo con esto, el simulador de onda completa tiene diferentes modalidades de simulación: el solucionador de dominio frecuencial que utiliza el método de elementos finitos, que divide el dominio de simulación en elementos discretos más pequeños. Y el solucionador de ecuaciones integrales que formula la solución en términos de corrientes y cargas en la superficie de la estructura. Al emplear este último método los resultados fueron mucho más precisos y no había presencia de discontinuidades, sin embargo, presentó demoras significativamente altas para solo una simulación (10-15 minutos aproximadamente) y exigía muchos más recursos de la CPU y la memoria del equipo, en total la ejecución de todo el algoritmo tardaba mínimo 12 horas en completarse exitosamente. Por otro lado, el solucionador frecuencial ejecutaba una sola simulación en entre 40-50 segundos aproximadamente, pero en los resultados ocurrían algunas discontinuidades. Por lo cual se planteó que el algoritmo las detecte, las elimine y las penalice al presentar mayor error que las señales con comportamiento aceptable; esto se refleja en las figuras 31, 32 y 33 porque solo se grafican las señales continuas. El algoritmo se ejecuta satisfactoriamente entre 70 y 90 minutos aproximadamente. Por tiempos de ejecución, velocidad de respuesta y cumplimiento de métricas de desempeño se seleccionó el solucionador de dominio frecuencial.

– En las figuras 37 y 39, se demuestra que, al ubicar diferentes celdas en paralelo, la frecuencia central se desplaza, es decir a mayor número de celdas, más corrimiento frecuencial habrá, sin embargo, el ancho de banda no presenta cambios significativos. Cabe resaltar que al sobrepasar el límite de 5 capas y después de cierta distancia entre estas, se presentan muchas más discontinuidades en el filtro, por lo tanto, se estableció un rango de distancias entre 0.05mm - 0.4mm y un límite de capas.

– Durante el desarrollo del proyecto, se evaluaron dos métricas de desempeño, el error cuadrático medio y el error cuadrático medio logarítmico, estas son medidas comunes utilizadas

para evaluar el comportamiento de modelos de IA, específicamente para medir la discrepancia o diferencia entre los valores reales observados y el valor predicho o ideal. Estos tipos de error tomaban rutas diferentes en la ejecución del algoritmo, sin embargo, el error cuadrático medio encontraba las soluciones en menos generaciones que el error cuadrático medio logarítmico. La característica fundamental es que este último es menos sensible a valores atípicos, por lo cual en ocasiones detectaba las discontinuidades y en otras no. Esto ocasionaba que no penalizara ciertas señales que no tenían la calidad requerida para comportamiento de filtrado y arrojaban resultados erróneos en ocasiones. Por lo tanto, se decidió emplear el error cuadrático medio como métrica de desempeño definitiva del algoritmo desarrollado.

– Los resultados obtenidos confirman que mediante la aplicación de un algoritmo bioinspirado es posible aportar a la metodología de diseño de filtros pasabandas con metamateriales. El error se disminuyó satisfactoriamente a menos del 0.31 % y cumple con la evaluación del resultado en un entorno referente a la guía de onda WR340.

9.2. Trabajos Futuros

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la parametrización de filtros mediante algoritmos bioinspirados, aporta significativamente a la metodología de diseño de filtros con metamateriales; esto permite abrir grandes posibilidades para explorar otro tipo de filtros y geometrías, para diversas aplicaciones del área de la ingeniería. Además, podrían fabricarse estos filtros metamateriales y adaptarlos a una guía de onda en entornos reales para así evaluar su desempeño y contrastar los resultados reales con los simulados. De esta forma se elimina la brecha entre la parte teórica y experimental de los metamateriales, que como ya se ha mencionado en este documento, esta primera parte aun es muy limitada y no permite conocer los alcances reales de los metamateriales.

Bibliografía

- [1] J. Candelario Elías, «Clasificación automática de interferencias arbitrarias utilizando dispositivos Wifi comerciales», *Déposito de Investigación Universidad de Sevilla*, 2020.
- [2] M. Serel, «Acceso a internet como derecho humano en el siglo XXI», *Ab-Revista de Abogacía*, n.º 6, págs. 163-168, 2020.
- [3] T. J. Cui, D. R. Smith y R. Liu, *Metamaterials*. Springer, 2010.
- [4] P. S. Manage, U. Naik, S. Nargundkar y V. Rayar, «A Survey on applications of Metamaterials in Antenna Design», en *2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, IEEE, 2020, págs. 153-158.
- [5] R. Jenkins, P. O'Connor, S. Campbell, P. Werner y D. Werner, «Deep Learning for Generalized Multiobjective Optimization of Metamaterials», en *2020 Fourteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*, IEEE, 2020, págs. 261-263.
- [6] V. Jayakrishnan y M. Liya, «A Survey on Frequency Selective Surfaces in EM field», en *2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, IEEE, 2020, págs. 671-675.
- [7] S. Zhou, Y. Hu, M. Li, Y. Yu y R. Chen, «Statistical modeling of dielectric metamaterial with fabrication imperfection tolerance», en *2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*, IEEE, 2019, págs. 1-2.
- [8] P. Forbes, J. Booske y N. Behdad, «Experimental Hot Test Results of a Metamaterial-Enhanced Resistive Wall Amplifier Prototype», en *2020 IEEE 21st International Conference on Vacuum Electronics (IVEC)*, IEEE, 2020, págs. 97-98.
- [9] S. Kulkarni y A. Mishra, «Metamaterials: Advancement and Futuristic Design Approach», *Wireless Personal Communications*, vol. 124, n.º 3, págs. 2075-2095, 2022.

-
- [10] *Conectividad Mundial | Oficina Del Enviado del Secretario general para la Tecnología Naciones Unidas*, 2019. <https://www.un.org/techenvoy/es/content/global-connectivity>, Accedido: 2023-02-23.
 - [11] *Internet servicio público esencial, Congreso de la República de Colombia*, 2021, <https://www.camara.gov.co/internet-servicio-publico-esencial>, Accedido: 2023-02-23.
 - [12] R. H. Barroso y W. Malpica, «An overview of electromagnetic metamaterials», *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, n.º 11, págs. 1862-1873, 2020.
 - [13] M. Al Rifaie, H. Abdulhadi y A. Mian, «Advances in mechanical metamaterials for vibration isolation: A review», *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 14, n.º 3, págs. 1-20, 2022.
 - [14] G. C. Prieto, A. Mayorga y A. Piñeros, «Limitaciones de la articulación de la ciencia, la tecnología y la innovación con la política nacional de desarrollo productivo», *Revista Análisis*, págs. 1-20, 2018.
 - [15] «Oficina del Enviado del Secretario General para la Tecnología” Naciones Unidas, 2020, <https://www.un.org/techenvoy/es>, Accedido: 2023-03-01.
 - [16] E. Ford y W. Weck, «Internet y Pandemia en las Américas. Primera crisis sanitaria en la era digital», *Recuperado de <https://www.kas.de/documents/7851262/8887001/LIBRO+INTERNET+Y+PANDEMIA+EN+LAS+AMERICAS+VF.pdf/4a2>*, vol. 51, a3-c28a, 2020.
 - [17] *Hoja de Ruta para la Cooperación Digital” United Nations*, 2020, <https://www.un.org/techenvoy/es/content/roadmap-digital-cooperation>, Accedido: 2023-03-01.
 - [18] «Política y lineamientos de Proyección Social y Extensión Universitaria de la Universidad Santo Tomás a nivel Multicampus”, *Acuerdo No.13 de 2020*, https://secretariageneral.usta.edu.co/images/Acuerdo_No._13_del_20_de_octubre_de_2020_Aprobar_Politica_y_Lineam._Proy._Social_compressed_1.pdf, Accedido: 2023-03-05.
 - [19] M. Gutiérrez et al., «Filtros fijos y sintonizables para las cabeceras de radiofrecuencia en sistemas espaciales», *Repositorio Digital Universidad Politécnica de Cartagena*, 2022.
 - [20] M. A. R. Ramírez, «Filtros pasa-banda diferenciales», Tesis doct., Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2018.
 - [21] E. A. Avellán Poma, «Diseño de un filtro paso-bajo reconfigurable con respuesta elíptica», Tesis doct., Universitat Politècnica de València, 2020.
 - [22] G. Montoya-Zúñiga, V. I. R. Abdalá, S. Ibarra-Delgado, R. Sandoval-Aréchiga y J. Flores-Troncoso, «Análisis de desempeño de un filtro FIR en RFNoC», *Difu100ci@, Revista de difusión científica, ingeniería y tecnologías*, vol. 13, n.º 2, págs. 7-12, 2019.

-
- [23] E. J. Lorenzo Cañizares, «Desarrollo de filtros transversales para comunicaciones inalámbricas de banda ultra-ancha», Tesis doct., Universidad Autónoma de Nuevo León, 2022.
 - [24] R. Verdecia Peña y H. Millán Vega, «Número de coeficientes del filtro de las subportadoras en el sistema gfdm: efecto en el desempeño», *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, n.º 23, págs. 53-61, 2020.
 - [25] *Virtual Institute for Artificial Electromagnetic Materials and Metamaterials*, <https://www.metamorphose-vi.org/index.php/metamaterials>, Accedido: 2023-02-17.
 - [26] Y. Chen, B. Ai y Z. J. Wong, «Soft optical metamaterials», *Nano Convergence*, vol. 7, págs. 1-17, 2020.
 - [27] I. Peralta, «Diseño computacional de materiales con aplicaciones térmicas y mecánicas», 2019.
 - [28] X. Su, M. Zhou, F. Shan, L. Cai, J. Wang e Y. Fan, «Electric Field Distribution on Surface of Metamaterial under Lightning Impulse», en *2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*, IEEE, 2019, págs. 1-4.
 - [29] D.-H. Kwon, «Lossless tensor surface invisibility cloaks utilizing surface waves», en *2018 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*, IEEE, 2018, págs. 243-245.
 - [30] A. A. G. Antuch y M. E. B. Corona, «Diseño y simulación de filtro de banda doble con metamateriales», *Telemática*, vol. 20, n.º 2, 2021.
 - [31] S. Sagar, S. Y. Chan, T. Pal y P. Mittal, «Designing and parametric extraction of low pass filter using metamaterials», en *2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES)*, IEEE, 2020, págs. 1-4.
 - [32] M. Naureen, D. K. Choudhary y R. K. Chaudhary, «Compact metamaterial inspired dual-band bandpass filter using parallel coupled line and circular shaped stub», en *2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)*, IEEE, 2018, págs. 1-2.
 - [33] W. Wang, Z. Zheng, X. Fang et al., «A waveguide slot filtering antenna with an embedded metamaterial structure», *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, n.º 5, págs. 2953-2960, 2019.
 - [34] W. Wang, Z. Zheng, H.-t. Zhang, M.-p. Jin e Y. Liu, «Waveguide Slot Filtering Antenna with Metamaterial Surface», en *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, IEEE, 2018, págs. 1-2.
 - [35] I. Díaz, J. Baena y C. Suárez, «Waveguide Filters Based on Metasurfaces Made of Subwavelength Slot Resonators», en *2022 Sixteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*, IEEE, 2022, págs. 040-042.

-
- [36] W. Wu, X. Liu, K. Cui, Y. Ma e Y. Yuan, «An ultrathin and polarization-insensitive frequency selective surface at Ka-band», *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, n.º 1, págs. 74-77, 2017.
 - [37] S. Qiao, Y. Zhang, Y. Zhao, Y. Zhou, S. Liang y Z. Yang, «Multiband frequency-selective surface with five resonance peaks in terahertz band», *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 6, n.º 2, págs. 292-299, 2016.
 - [38] M. Daghari, C. Abdelhamid y H. Sakli, «Invariable Filter Response of Metamaterial Layer for Electromagnetic Interference Mitigation», en *2020 17th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, IEEE, 2020, págs. 776-779.
 - [39] D. W. Astuti, S. Y. Darmanik, M. Muslim y M. Alaydrus, «Substrate integrated waveguide bandpass filter with complementary split ring resonator at 2.45 ghz», en *2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, IEEE, 2018, págs. 560-563.
 - [40] S. Krutiev, D. Lonkina, P. Makhno, A. Kleshchenkov y V. Makhno, «Design and Fabrication of Compact Waveguide Filter with Complementary Split-ring Resonators (CSRR)», en *2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, IEEE, 2022, págs. 420-424.
 - [41] J. Li y T. Yuan, «Stopband-Performance-Enhanced Waveguide Filters Based on Slotted Hemispherical Resonators», en *2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, IEEE, 2020, págs. 1-3.
 - [42] K.-R. Xiang, F.-C. Chen y Q.-X. Chu, «High selectivity and high gain X-band waveguide filtering antenna based on triple-mode resonator», *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, n.º 10, págs. 6953-6958, 2021.
 - [43] J.-Y. Yin, T.-L. Bai, J.-Y. Deng et al., «Wideband single-layer substrate integrated waveguide filtering antenna with U-shaped slots», *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, n.º 9, págs. 1726-1730, 2021.
 - [44] L. Kouhalvandi y L. Matekovits, «A Case Study for Improving Performance of Frequency Selective Surface through Union of Sub-Sets and Particle Swarm Optimization», en *2022 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, IEEE, 2022, págs. 113-116.
 - [45] Y. Pan y J. Dong, «Design of FSS Using Equivalent Circuit and MOPSO algorithm», en *2022 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, IEEE, vol. 1, 2022, págs. 1-2.
 - [46] A. D. Boursianis, M. S. Papadopoulou, M. Salucci et al., «Frequency Selective Surface Design Using Coot Optimization Algorithm for 5G Applications», en *2022 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, IEEE, 2022, págs. 184-187.

-
- [47] W. G. Lima, C. d. C. Nogueira, F. H. Ferreira et al., «Hybrid and Bioinspired Computational Optimization Techniques for the Design and Synthesis of Multilayer FSS», en *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, IEEE, 2019, págs. 1-3.
 - [48] S. Cogollos Borrás, «FUNDAMENTOS DE LA TEORÍA DE FILTROS», *Colección Manual de referencia*, 2016.
 - [49] T. L. Floyd et al., «Dispositivos electrónicos», 2008.
 - [50] M. A. Sadiku, *Fundamentos de circuitos eléctricos*. Mc Graw Hill, 2006.
 - [51] R. F. Coughlin, F. F. Driscoll y G. A. Flores, *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. Prentice Hall, 1999, vol. 5.
 - [52] A. B. Williams y F. J. Taylor, *Electronic filter design handbook*. McGraw-Hill Education, 2006.
 - [53] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
 - [54] I. Gil Galí, C. Recasens Aloy y A. M. Sánchez Delgado, «Circuits de microones, febrer 2013», 2013.
 - [55] H. D. Silva, «Lineas de transmisión y parámetros S aplicados a la metrología»,
 - [56] R. Marqués, F. Martín y M. Sorolla, *Metamaterials with negative parameters: theory, design, and microwave applications*. John Wiley & Sons, 2011.
 - [57] A. Barriga Ruano, «Sensores electromagnéticos basado en resonadores CSSR (Complementary Slipt-ring Resonator) en tecnología Microstrip: diseño, implementación y caracterización», 2020.
 - [58] V. Jayakrishnan y M. Liya, «A Survey of Electromagnetic waves based Metamaterials and Applications in Various domains», en *2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, IEEE, 2020, págs. 662-666.
 - [59] B. A. Munk, *Frequency selective surfaces: theory and design*. John Wiley & Sons, 2005.
 - [60] S. B. Glybovski, S. A. Tretyakov, P. A. Belov, Y. S. Kivshar y C. R. Simovski, «Metasurfaces: From microwaves to visible», *Physics reports*, vol. 634, págs. 1-72, 2016.
 - [61] R. Lahoz-Beltrá, *Bioinformática: Simulación, vida artificial e inteligencia artificial*. Ediciones Díaz de Santos, 2004.
 - [62] R. P. Díez, A. G. Gómez y N. de Abajo Martínez, *Introducción a la inteligencia artificial: sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva*. Universidad de Oviedo, 2001.
 - [63] J. C. Ponce Gallegos, A. Torres Soto, F. S. Quezada Aguilera et al., *Inteligencia artificial*. Iniciativa Latinoamericana de Libros de Texto Abiertos (LATIn), 2014.

-
- [64] J. C. Herrera Lozada, «Sistema inmune artificial con población reducida para optimización numérica», Tesis doct., 2011.
- [65] X. Fan, W. Sayers, S. Zhang, Z. Han, L. Ren y H. Chizari, «Review and classification of bio-inspired algorithms and their applications», *Journal of Bionic Engineering*, vol. 17, págs. 611-631, 2020.
- [66] A. Darwish, «Bio-inspired computing: Algorithms review, deep analysis, and the scope of applications», *Future Computing and Informatics Journal*, vol. 3, n.º 2, págs. 231-246, 2018.
- [67] A. Alazzawi, H. Md Rais, S. Basri e Y. Alsariera, «PhABC: A Hybrid Artificial Bee Colony Strategy for Pairwise test suite Generation with Constraints Support», oct. de 2019, págs. 106-111. DOI: 10.1109/SCORED.2019.8896324.
- [68] V. Sarin, R. K. Raj y V. Kesavath, «Negative group-delay assisted anomalous propagation in stacked Split Ring Resonator array», *Results in Optics*, vol. 12, pág. 100443, 2023.
- [69] D.-D. Lv, L. Meng y Z. Zou, «Miniaturized HMSIW dual-band filter based on CSRRs and microstrip open-stubs», *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 77, págs. 97-102, 2018.