

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Electrónica



INTRODUCCIÓN AL DISEÑO AUTOMATIZADO DE ESTRUCTURAS  
DE MICROONDAS FASE I

Autores:

Maria Fernanda Acevedo Cote  
Erik David Ussa Soto

Director:

Ph. D Carlos Arturo Suárez Fajardo



Grupo de Radiación Electromagnética y Comunicaciones Ópticas GRECO

---

Bogotá D.C  
2021



# INTRODUCCIÓN AL DISEÑO AUTOMATIZADO DE ESTRUCTURAS DE MICROONDAS FASE I

Anteproyecto de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniería Electrónica

Autores:

Maria Fernanda Acevedo Cote

Erik David Ussa Soto

Director:

Ph. D Carlos Arturo Suárez Fajardo



Grupo de Radiación Electromagnética y Comunicaciones Ópticas GRECO

UNIVERSIDAD DISTRICTAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Facultad de Ingeniería

Proyecto curricular de Ingeniería Electrónica

Bogotá D.C

2021

# Agradecimientos

Primero que todo queremos agradecer a Dios, por acompañarnos y permitirnos llegar hoy con este proyecto al final de nuestro camino en el pregrado de ingeniería electrónica, ya que cada uno de los pasos recorridos nos llevan a presentar un trabajo de calidad, donde no solo demostramos nuestros conocimientos, si no capacidades de afrontar dificultades, de superar retos, de trabajo en equipo. Esto nos lleva a agradecerle a nuestras familias, amigos y cada una de las personas que estuvieron de una u otra forma involucradas en este proceso, un proceso que no fue nada fácil, en el cual superamos paros, una pandemia, materias, semestres difíciles y momentos de frustración, que a su vez trajeron consigo un conjunto de emociones y momentos de gran alegría al deber cumplido, que nos abre miles de puertas a soñar y seguir ese proyecto de vida por el que cada uno ha venido trabajando, y que claramente se ve reflejado en orgullo para nuestros padres. Adicionalmente, queremos agradecer el arduo trabajo en equipo que hemos sabido llevar en este proyecto, ya que sin importar todo lo que tuvimos que cambiar, y todas las dificultades, mantuvimos una buena relación, comunicación, disposición de enfrentar y superar cada obstáculo, sin lo cual no hubiésemos logrado avanzar, y que de alguna manera forjó un vínculo y un crecimiento que se lleva para nuestras vidas profesionales y personales.

Por otro lado, queremos agradecer a dos personas que nos demostraron en el camino gran sabiduría y respeto con cada una de las observaciones, críticas constructivas y retroalimentación en cada uno de nuestros encuentros. El primero es nuestro director Carlos Arturo Suárez Fajardo, el cual, a pesar de todas las dificultades que vinieron acompañadas de esta situación inesperada como lo es el Covid 19, se dio a la tarea de buscar espacios, formas, métodos de replantear su apoyo y acompañamiento en este proceso. Por último, pero no menos importante agradecerle al evaluador del proyecto Gustavo Adolfo Puerto Leguizamón, por su compromiso y gran ayuda, ya que nos mostró total interés desde el día que se le asignó esta función, resaltando siempre su buena comunicación y agilidad con cada uno de los tramites que llevan este proyecto a culminar de manera exitosa.

# Resumen

En este proyecto se presenta una propuesta de encadenamiento de Matlab con un programa de análisis electromagnético, que para este caso, es la versión estudiantil del software CST Microwave Studio, enfocado al análisis y diseño automatizado de estructuras radiantes y meta-material.

El método propuesto, parte de establecer la comunicación entre programas, haciendo uso del lenguaje VBA script y el elemento COM Server de Matlab. Posteriormente, se estudian los elementos y herramientas de construcción necesarias para poder crear diversas geometrías, en las cuales se tiene en cuenta: rango de frecuencia, condiciones de contorno, rejillas, solucionadores, operaciones geométricas, puertos, y algunos criterios adicionales que aquí se detallan.

Teniendo en cuenta lo anterior, se tratan dos tipos de estructuras, que se clasifican en dos grupos, el primero de ellos es las antenas, en el cual tratamos una antena tipo parche y una tipo dipolo Bow-Tie, y en el segundo, se presenta una estructura metamaterial de tipo resonador de anillo dividido SRR. Para cada una de ellas, encontrará la validación de la funcionalidad del método, mediante la simulación y análisis de los resultados, teniendo en cuenta lo reportado en la literatura.

Cabe resaltar, que se hizo un trabajo adicional, el cual no está contemplado dentro de los objetivos planteados, pero que se decide realizar, debido a la complejidad en cuanto a la creación de estructuras y mostrar otro tipo de herramientas que el lector puede requerir en un uso futuro. Entre los elementos adicionales, se presentan, una antena de tipo bocina, dos estructuras metamaterial de tipo campo eléctrico acoplado ELC, una celda unitaria de tipo superficie de frecuencia selectiva, además de una propuesta de algoritmo de optimización Optimización por enjambre de partículas PSO, para una antena tipo parche rectangular la cual permite nuevamente demostrar la funcionalidad de lo aquí tratado.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>I</b>
<b>Resumen</b>	<b>II</b>
<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	1
1.2. Pregunta de investigación . . . . .	2
1.3. Justificación del problema . . . . .	3
1.3.1. Justificación Académica e Investigativa . . . . .	3
1.3.2. Justificación Socioeconómica . . . . .	3
1.3.3. Justificación Ecológica . . . . .	3
1.3.4. Justificación Personal . . . . .	3
1.4. Objetivos . . . . .	4
1.4.1. Objetivo general . . . . .	4
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	4
1.5. Metodología . . . . .	4
1.6. Organización del trabajo . . . . .	5
<b>II. Marco Teórico</b>	<b>7</b>
2.1. Antenas . . . . .	7
2.1.1. Parche rectangular . . . . .	7
2.1.2. Dipolo corbata o Bow-Tie . . . . .	9
2.2. Metamateriales . . . . .	10
2.2.1. Resonador de anillo dividido SRR . . . . .	10
2.2.2. Resonadores de campo eléctrico acoplado ELC . . . . .	10
2.2.3. Superficie de frecuencia selectiva FSS . . . . .	11
2.3. Parámetros relevantes para el proyecto . . . . .	12
2.3.1. Directividad y ganancia . . . . .	12
2.3.2. Ancho de banda de impedancia . . . . .	13
2.3.3. Parámetros de dispersión . . . . .	13
2.4. Programas . . . . .	15
2.4.1. Matlab . . . . .	15
2.4.2. Programas de análisis electromagnético . . . . .	15

2.5. Optimización . . . . .	17
2.6. Algoritmos y métodos de optimización multiobjetivo . . . . .	17
2.7. Comunicación entre programas . . . . .	21
<b>III. Estado del Arte</b>	<b>23</b>
3.1. Técnicas de diseño automatizado . . . . .	23
3.2. Diseño automatizado de antenas tipo parche . . . . .	27
3.3. Diseño automatizado de dipolos . . . . .	31
3.4. Diseño automatizado de estructuras metamaterial . . . . .	33
<b>IV. Metodología</b>	<b>36</b>
4.1. Creación de la comunicación . . . . .	38
4.2. Definición de Unidades . . . . .	38
4.3. Condiciones de contorno . . . . .	38
4.3.1. Material de fondo . . . . .	39
4.4. Materiales . . . . .	40
4.5. Operaciones geométricas . . . . .	40
4.5.1. Brick . . . . .	40
4.5.2. Cylinder . . . . .	41
4.5.3. Extrude . . . . .	42
4.5.4. Transform . . . . .	43
4.5.5. Add y Subtract . . . . .	45
4.5.6. Pick . . . . .	46
4.5.7. Loft . . . . .	48
4.5.8. Shell . . . . .	49
4.5.9. Polygon . . . . .	50
4.5.10. Wire . . . . .	50
4.6. Puertos . . . . .	51
4.7. Solucionadores . . . . .	53
4.7.1. Solucionador en el dominio de la Frecuencia . . . . .	53
4.7.2. Solucionador en el dominio del Tiempo . . . . .	53
4.7.3. Frecuencia de trabajo . . . . .	54
4.8. Monitores . . . . .	54
4.9. Exportar . . . . .	55
<b>V. Resultados</b>	<b>57</b>
5.1. Antenas . . . . .	57
5.1.1. Parche rectangular . . . . .	57
5.1.2. Antena Bow-Tie . . . . .	60
5.1.3. Bocina . . . . .	62
5.2. Celdas metamaterial . . . . .	65
5.2.1. Resonador de anillo dividido (SRR) . . . . .	65
5.2.2. Celda ELC 4 . . . . .	67

5.2.3. Celda ELC 6 . . . . .	69
5.2.4. Celda metamaterial para aplicaciones transmit-array (FSS) . . . . .	70
5.2.5. Algoritmo de optimización PSO . . . . .	72
<b>VI. Análisis de resultados</b>	<b>75</b>
<b>VII. Conclusiones</b>	<b>84</b>
<b>A. Cálculo de impedancia</b>	<b>90</b>
<b>B. Coeficiente de extensión</b>	<b>92</b>

# Índice de figuras

2.1. Antenas tipo parche rectangular y circular. . . . .	8
2.2. Comparación entre variaciones de antena bicónica: A. Antena bicónica, B. Antena de hoja triangular, C. Antena Bow-tie, D. Antena bicónica por medio de alambre. [15] . . . . .	9
2.3. Geometría del SRR. . . . .	10
2.4. Topología de celdas ELC. . . . .	11
2.5. Generalidad para topologías de FSS. . . . .	12
2.6. Efecto de la alta frecuencia en red de dos puertos. [21] . . . . .	14
2.7. Diagrama de la red de dos puertos. . . . .	14
2.8. Métodos de optimización . . . . .	18
2.9. Diagrama de flujo de PSO.[29] . . . . .	20
2.10. Editor de macros CST. . . . .	21
2.11. Equivalencia entre lenguaje macro VBA y lenguaje empleado por COM . . . . .	22
3.1. Conexión entre los programas mencionados. [32] . . . . .	24
3.2. Diagrama de flujo del método de optimización PSO. [35] . . . . .	26
3.3. Diagrama de flujo AG. [36] . . . . .	27
3.4. Diagrama de flujo FA. [42] . . . . .	29
3.5. Geometría antena parche rectangular. [44] . . . . .	31
3.6. Bow-tie propuesto. [45] . . . . .	32
3.7. Propuesta inicial de antena. [46] . . . . .	32
3.8. Geometría para antena Bow-tie auto-complementada FSCBT. [47] . . . . .	33
3.9. Esquema. (a) Vista del resonador. (b) SRR cuadrado colocado simétricamente en la parte posterior de la guía de onda coplanar. (c) Vista en sección transversal del CPW respaldado por el SRR. [50] . . . . .	35
4.1. Diagrama de bloques de la metodología del proyecto. . . . .	36
4.2. Condiciones de contorno. . . . .	39
4.3. Creación de Brick. . . . .	41
4.4. Creación de cilindro. . . . .	42
4.5. Creación de extrude. . . . .	43
4.6. Operación rotar objetos. . . . .	44
4.7. Trasladar objetos. . . . .	44



4.8. Reflejar objetos. . . . .	45
4.9. Operación Add: agrupar objetos. . . . .	45
4.10. Operación Subtract. . . . .	46
4.11. Selección de caras. . . . .	47
4.12. Selección de aristas. . . . .	48
4.13. Selección de punto a partir de coordenadas. . . . .	48
4.14. Operación Loft. . . . .	49
4.15. Demostración de la herramienta Shell. . . . .	49
4.16. Creación de un polígono. . . . .	50
4.17. Creación del cable a partir de un polígono. . . . .	51
4.18. Creación del puerto. . . . .	52
4.19. Creación de puerto discreto. . . . .	53
5.1. Consideraciones para la implementación del parche rectangular. . . . .	58
5.2. Comparación de geometrías del parche rectangular. . . . .	59
5.3. Resultados obtenidos mediante la propuesta realizada para parche rectangular. . . . .	59
5.4. Impedancia parche rectangular obtenido mediante propuesta. . . . .	60
5.5. Dipolo de banda ancha. Fuente propia. . . . .	61
5.6. Geometría obtenida del dipolo corbatín. . . . .	61
5.7. Resultado obtenido parámetro S11 de la Bow-tie . . . . .	62
5.8. Dimensiones de bocina piramidal según. [51] . . . . .	62
5.9. Dimensiones de implementación de bocina piramidal. . . . .	63
5.10. Geometría obtenida de la bocina piramidal. . . . .	63
5.11. Resultados obtenidos respecto al campo lejano de la bocina. . . . .	64
5.12. Resultado obtenido parámetro S11 de la bocina . . . . .	65
5.13. Dimensiones de implementación de la celda SRR. . . . .	66
5.14. Geometría obtenida de la celda SRR. . . . .	66
5.15. Resultados obtenidos parámetros S para SRR. . . . .	67
5.16. Dimensiones de implementación de la celda ELC 4. [51] . . . . .	68
5.17. Geometría obtenida de la celda ELC 4. . . . .	68
5.18. Resultado obtenido parámetros S de la celda ELC 4. . . . .	69
5.19. Dimensiones de implementación de la celda ELC 6. [51] . . . . .	69
5.20. Geometría obtenida de la celda ELC 6. . . . .	70
5.21. Resultado obtenido parámetros S de la celda ELC 6. . . . .	70
5.22. Dimensiones de implementación de la celda FSS. [52] . . . . .	71
5.23. Geometría obtenida de la celda FSS. . . . .	71
5.24. Resultado obtenido en parámetro S21 de la celda FSS. . . . .	72
5.25. Diagrama de flujo de la implementación del algoritmo PSO con factor de inercia dinámico. . . . .	73
5.26. Resultados de evolución por partícula para 5 iteraciones. . . . .	74
6.1. Comparación parámetro S11 del parche rectangular. . . . .	75
6.2. Comparación parámetro VSWR del parche rectangular. . . . .	76

6.3.	Resultados obtenidos parámetros S11 de la Bow-tie. . . . .	77
6.4.	Comparaciones geométricas de la bocina. . . . .	77
6.5.	Comparación campo lejano en plano H de la bocina. . . . .	78
6.6.	Comparación campo lejano en plano E de la bocina. . . . .	78
6.7.	Comparación parámetro S11 de la bocina. . . . .	79
6.8.	Comparación parámetros S de la celda SRR. . . . .	80
6.9.	Comparación parámetros S de la celda ELC 4. . . . .	81
6.10.	Comparación parámetros S de la celda ELC 6. . . . .	82
6.11.	Comparación magnitud y fase S21 de la celda FSS. . . . .	83
6.12.	Comparación en coordenadas polares del parámetro S21 de la celda FSS. . . . .	83
A.1.	Herramienta para cálculo de impedancia, según el software electromagnético. . . . .	90
B.1.	Herramienta para cálculo de coeficiente K. . . . .	92
B.2.	Opciones de cálculo disponibles, según el software electromagnético. . . . .	93

# Índice de tablas

2.1. Ecuaciones de diseño para antena tipo parche. [14][15] . . . . .	8
4.1. Principales líneas de código. . . . .	37
5.1. Parámetros de diseño parche rectangular. . . . .	58
5.2. Dimensiones del dipolo de banda ancha. . . . .	61
5.3. Dimensiones reportadas de la bocina piramidal. [51] . . . . .	62
5.4. Dimensiones de implementación de la bocina piramidal. . . . .	63
5.5. Dimensiones de la celda SRR. . . . .	66
5.6. Dimensiones de la celda ELC 4. . . . .	68
5.7. Dimensiones de la celda ELC 6. . . . .	69
5.8. Dimensiones de la celda Transmitarray. . . . .	71
6.1. Comparación de resultados parche rectangular para S11. . . . .	76
6.2. Comparación de resultados de la bocina. . . . .	79
6.3. Comparación de resultados parámetros S para celda metamaterial SRR. . . . .	80
6.4. Comparación de resultados parámetros S para celda metamaterial ELC 4. . . . .	81
6.5. Comparación de resultados parámetros S para celda metamaterial ELC 6. . . . .	82

# Capítulo I

## Introducción

### 1.1. Planteamiento del problema

En los últimos años se ha observado un crecimiento acelerado del tráfico de datos móviles, junto con el uso de dispositivos inalámbricos y demás dispositivos que requieren algún tipo de conectividad. Adicionalmente, en las redes de datos celulares, uno de los servicios de mayor demanda es el internet móvil, lo que motiva la necesidad del uso de los dispositivos móviles y por ende, el uso de antenas que permitan satisfacer esta demanda [1]. La situación antes planteada, exige de los investigadores en el campo del diseño de dispositivos pasivos y activos de microondas, y particularmente de las antenas, nuevas propuestas de elementos radiantes de reducido tamaño y altas prestaciones, en los que se mejore su rendimiento en parámetros como: ganancia, ancho de banda de impedancia, pureza de polarización, diagrama de radiación, etc. De tal manera que las soluciones puedan ser integradas en los dispositivos en el menor tiempo posible, para lo cual se hace necesario el adelantar investigación en aspectos como: tecnología de fabricación, geometrías, métodos de estudio, nuevos materiales, así como en nuevas técnicas de diseño y optimización, de tal forma que el diseño de dichos elementos, se haga de forma rápida y eficiente.

El problema de la optimización, tradicionalmente soportada en la experiencia de los diseñadores y en la realización de análisis paramétricos, requiere del empleo de extensas jornadas de trabajo para programar cientos de simulaciones hasta lograr el comportamiento deseado. Como solución a este problema, en años recientes se ha propuesto el empleo de técnicas de optimización automatizada, integrando para tal fin diferentes tipos de programas de análisis electromagnético junto con programas matemáticos como Matlab, de tal forma que en el programa de análisis matemático se integren algoritmos de inteligencia artificial, logrando así que la simbiosis entre estos dos programas y los algoritmos de optimización alojados en el programa matemático, permitan adelantar tareas de optimización automatizada, para de esta manera sustituir en parte los métodos que incorporan análisis paramétricos en el proceso de optimización, y esto junto con la experiencia del diseñador en el diseño de estructuras similares, pueden reducir de una manera sustancial el tiempo total de diseño de una estructura.

A este respecto, gran parte de los diseños de estructuras pasivas de microondas y antenas realizados al interior del grupo GRECO de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, fueron llevados a cabo mediante análisis paramétricos, cuyos resultados fueron reportados en [2–11], para los cuales fue necesario llevar a cabo más de trescientas simulaciones por proyecto. Por otra parte, el grupo GRECO explora por primera vez el empleo de un método automatizado, para el diseño de una antena con polarización circular y sentido de giro conmutable en el año 2017, cuyos resultados fueron reportados en [12]. Este proyecto inicia con el diseño tradicional de dicha antena, siendo necesario realizar más de 350 simulaciones hasta optimizarla en parámetros como ganancia, relación axial y ancho de banda de impedancia, diseño que fue caracterizado en el laboratorio para validar sus resultados. Posteriormente y tomando como referencia dicha estructura, se procedió a realizar el mismo diseño enlazando Matlab, para la definición de parámetros y el proceso de optimización mediante algoritmos genéticos, junto con un programa de análisis electromagnético, logrando al final resultados similares a los obtenidos mediante el método tradicional, reduciendo el tiempo de diseño y optimización a aproximadamente una cuarta parte, esto partiendo naturalmente del conocimiento de la estructura y de la influencia de cada uno de los parámetros geométricos en el desempeño de la misma.

Con base en los resultados reportados en [12] y en la necesidad latente del grupo GRECO de explorar en el diseño de nuevas tecnologías como técnicas de guiado de ondas, diseño y aplicaciones de celdas metamateriales, antenas tipo lente, reflectarray, transmitarray, etc., aplicaciones que por su naturaleza es más complicado su diseño mediante métodos tradicionales, se hace necesario realizar la implementación de estrategias de diseño y optimización automatizada, que permitan reducir los tiempos tradicionalmente empleados para este tipo de procesos y de lo cual nace la idea de este proyecto, que dada su complejidad, se decide dividirlo en dos etapas a saber: una asociada a la definición de parámetros para encadenar dos programas como es el caso de Matlab, con un programa de análisis electromagnético, de tal manera que mediante Matlab se definan los parámetros del simulador de análisis electromagnético y se construya una geometría dada, para de esta manera obtener algunos resultados que luego retornan a Matlab. Y una segunda fase, la cual parte de la primera, de tal manera que tome los resultados que devuelve el simulador de análisis electromagnético a Matlab, con el objetivo de optimizar el diseño de la estructura por intermedio de un algoritmo de optimización alojado en Matlab, el cual, junto con los algoritmos de determinación de parámetros de simulación, de construcción de la geometría y de las funciones objetivo debidamente acotadas, se pretende que al final el conjunto de programas entreguen una geometría que cumpla con el rendimiento electromagnético deseado. Teniendo en cuenta lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación:

## **1.2. Pregunta de investigación**

¿Como encadenar Matlab a un software de análisis electromagnético para reducir los tiempos de optimización de una estructura radiante y metamaterial enfocado al diseño automatizado?

## **1.3. Justificación del problema**

### **1.3.1. Justificación Académica e Investigativa**

La reducción de tiempos de optimización enfocado al diseño de diversas estructuras, como es el caso de nuevas técnicas de guiado de ondas, metamateriales y nuevas aplicaciones como las antenas tipo lente, reflectarray, transmitarray, etc. Resulta de vital importancia para agilizar el desarrollo de este tipo de proyectos de investigación al interior del grupo GRECO de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Adicionalmente, dado que este proceso implica el encadenamiento de dos tipos de programas, esto genera la necesidad de explorar nuevas estrategias de simbiosis entre dichos programas, que permitan mejorar este proceso aún más.

### **1.3.2. Justificación Socioeconómica**

La tecnología de telecomunicaciones se desarrolla rápidamente y en varios campos (medicina, educación, telecomunicaciones entre otros), esta lidera el crecimiento de la economía en aspectos básicos del ser humano, transforma la forma de vida de las personas, estableciendo nuevos negocios, nuevos empleos los cuales mejoran la vida del individuo. El potencial estimado de impacto económico de las tecnologías en el año 2025 estará liderado por el internet móvil, seguido de este, se ubica software inteligente y el internet de las cosas [13]. Es por eso, que la reducción de tiempos de optimización es un elemento fundamental para esta tecnología en crecimiento, ya que presenta un aporte sustancial a la economía de la industria.

### **1.3.3. Justificación Ecológica**

La reducción de tiempos de optimización enfocado al diseño automatizado de estructuras radiantes, permite realizar una mayor cantidad de pruebas experimentales, lo cual se traduce en una implementación consciente y con menor margen de error, un tamaño reducido para algunas aplicaciones, menos material de fabricación, minimizando los desechos de estos procesos y el impacto ambiental. A su vez, aportando a la disminución de la contaminación visual en las ciudades causada por las antenas tradicionales.

### **1.3.4. Justificación Personal**

Se busca aplicar los conocimientos adquiridos, en el área de telecomunicaciones, en aras de lograr ampliar el espectro de posibilidades al poder definir y extraer parámetros de las estructuras radiantes, disminuyendo los tiempos de optimización de las mismas. Además, gracias a que se genera un encadenamiento de software, sentar precedentes para que, en trabajos posteriores, se pueda explorar aún más el potencial que este proyecto puede tener.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Proponer un método que permita encadenar Matlab con un programa de análisis electromagnético, enfocado al análisis y diseño automatizado de estructuras radiantes y metamaterial.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Realizar un estudio sistemático de las técnicas de diseño automatizado aplicado a diferentes tipos de antenas y estructuras metamaterial.
- Describir detalladamente los criterios de construcción de geometrías y asignación de parámetros de simulación desde Matlab a un software de análisis electromagnético para antenas tipo parche, dipolo Bow-Tie y celdas SRR.
- Demostrar la funcionalidad del método mediante el diseño y simulación de las estructuras propuestas en el objetivo anterior, comparando sus resultados frente a los reportados en la literatura consultada.

## **1.5. Metodología**

### **Fase 1: Revisión de literatura**

- Actividad 1: Revisar a fondo la literatura enfocada a técnicas de diseño convencionales, para diversos tipos de antenas y estructuras metamaterial.
- Actividad 2: Revisar una buena parte de la información disponible acerca de las técnicas de diseño automatizadas, enfocado a diversos tipos de estructuras radiantes y metamaterial, con el fin de apropiarse de esta información.
- Actividad 3: Realizar una revisión de la literatura sobre aspectos relacionados con las plataformas o programas que están siendo utilizados de manera individual o conjunta, como herramientas para implementar técnicas de diseño convencionales y automatizado.

### **Fase 2: Exploración y definición de requerimientos**

- Actividad 4: Definir los programas que se ajusten a las necesidades del proyecto, así como los elementos necesarios para realizar el encadenamiento, generando una familiarización con las herramientas que estos presentan para tal fin.
- Actividad 5: Una vez encadenados los programas, se seleccionan algunos tipos de antenas y celdas metamaterial para adelantar sus simulaciones, para lo cual se deben definir los parámetros tanto geométricos como de simulación desde el programa matemático, y

de esta forma, realizar una serie de simulaciones iniciales que permitan evaluar el comportamiento del proceso realizado conjuntamente entre el programa matemático y el de análisis electromagnético.

### **Fase 3: Validación de resultados**

- Actividad 6: Luego de definir mediante Matlab tanto la geometría a estudiar como los parámetros de simulación en el programa de análisis electromagnético, se efectúa la simulación, para al final de la misma, analizar lo obtenido en el programa de análisis electromagnético, junto con los resultados recibidos y visualizados en Matlab. Al final de este proceso se comparan los resultados de las simulaciones frente a los reportados en los documentos base seleccionados, con el fin de validar el funcionamiento del encadenamiento y la definición de parámetros realizada.
- Actividad 7: Redactar detalladamente los detalles de conexión, junto con los pasos adelantados para lograr el encadenamiento de los dos programas, separando lo concerniente a la definición de parámetros de simulación, la construcción de la geometría desde Matlab, el registro de los resultados simulación en Matlab, lo cual permite construir gráficas similares a las mostradas en el programa de análisis electromagnético para finalmente organizar los resultados de simulación en un archivo identificable.

## **1.6. Organización del trabajo**

El primer capítulo de este libro, presenta la propuesta de investigación sobre la atomización en el diseño de estructuras radiantes y celdas metamaterial, para ello se hace una breve exposición del problema con su justificación, se hace la pregunta de investigación y se plantean los objetivos a desarrollar, así como la metodología seguida para llevarlo a cabo.

En el segundo capítulo, se introduce al lector en la teoría básica relacionada con las estructuras a tratar, las cuales se dividen en dos grupos, los cuales son antenas y estructuras metamaterial, de estos dos grupos se expone brevemente parámetros importantes para ver su comportamiento y evaluar su desempeño. Así mismo, se hace una revisión sobre las técnicas de diseño automatizado enfocadas al diseño de estas estructuras.

El tercer capítulo, presenta la metodología seguida en el proyecto, aquí se explica y se detalla las consideraciones a tener en cuenta para crear las estructuras y se realiza una explicación general de los elementos más importantes en la construcción de éstas.

El cuarto capítulo, muestra los resultados obtenidos para las estructuras estudiadas, teniendo en cuenta los parámetros de diseño pertinentes, y de esta forma lograr extraer elementos como gráficas de campo lejano, de parámetros S y de impedancia.



En el quinto capítulo, se presenta el análisis de resultados correspondiente a realizar el contraste de lo obtenido mediante la propuesta aquí realizada y lo reportado en la literatura, en donde se calculan porcentajes de error asociado a las diferencias encontradas.

Finalmente, en el sexto capítulo, se exponen las conclusiones de todo el proceso de investigación del trabajo de grado.

# Capítulo II

## Marco Teórico

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos más relevantes, relacionados con las estructuras a estudiar como es el caso de antenas y celdas metamaterial, en cuanto al primer grupo, se estudia una antena tipo parche rectangular y una antena no plana como lo es el dipolo corbata o Bow-Tie. En cuanto al segundo grupo, se trata la celda resonador de anillo dividido o “Split ring resonator SRR”. Es importante resaltar que los elementos radiantes fueron seleccionados teniendo en cuenta sus características geométricas, tratando el problema de estructuras planas sobre sustratos microstrip y otro tipo de antena no plana como es el caso del dipolo, esto teniendo en cuenta que el programa de análisis electromagnético facilita de cierta manera el modelado de otros tipos de antenas que se encuentran en la literatura, ya que, aunque la geometría y las configuraciones sean diferentes, la tecnología es similar.

Además, se estudian los distintos parámetros de importancia para evaluar las estructuras radiantes ya mencionadas, y por supuesto los distintos programas de análisis electromagnético encontrados, haciendo énfasis en el programa CST Studio versión estudiantil, y Matlab, como programa de análisis matemático, aprovechando la licencia disponible en la universidad, para el posterior análisis de los resultados obtenidos a partir de la comunicación de dichos programas.

### 2.1. Antenas

#### 2.1.1. Parche rectangular

Las antenas de parche sobre sustrato microcinta, pueden ser diseñadas utilizando diversas geometrías. Sin embargo, los parches rectangulares y circulares mostrados en la Figura 2.1, son los más populares debido a la facilidad de análisis y fabricación, y a sus atractivas características de radiación, especialmente la baja polarización cruzada.

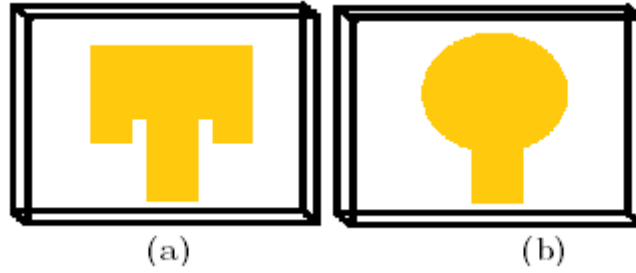


Figura 2.1: Antenas tipo parche rectangular y circular.

Para la alimentación del parche, en la literatura se trabajan técnicas como: alimentación con cable coaxial, mediante acople de proximidad, por acople de proximidad con ranura y finalmente alimentación por línea microstrip, las cuales pueden ser revisadas a profundidad en [14]. Posteriormente, se tiene el modelo analítico de esta estructura, el cual viene del modelo cavidad resonante y el de guía de onda. Estos modelos permiten extraer las características en términos de frecuencia y elementos relacionados a la geometría de la estructura, los cuales se condensan en la Tabla 2.1. Allí se describen elementos como el ancho  $W$  y largo  $L$  del parche, en términos de la longitud de onda y las características dieléctricas del sustrato, en donde se tiene en cuenta el efecto  $\Delta_L$ , asociado al cambio de longitud eléctrica de los materiales para la frecuencia deseada, finalmente, se presenta el cálculo de la distancia de inserción, el cual va relacionado directamente con la resistencia de entrada y los parámetros de conductancia asociados a la geometría. [14][15]

Tabla 2.1: Ecuaciones de diseño para antena tipo parche. [14][15]

	Descripción	Ecuación
1	Cálculo de ancho ( $W$ ) del parche	$W = c/(2f_r) \cdot \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}}$ Donde $c$ es la velocidad de la luz, $f_r$ es la frecuencia de resonancia y $\epsilon_r$ es la constante dieléctrica del sustrato
2	Cálculo de $\epsilon_{eff}$	$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{1+\frac{2h}{W}}} \right)$ Donde $h$ es el espesor del sustrato
3	Cálculo de la longitud efectiva $L_{eff}$	$L_{eff} = \frac{c}{2 \cdot f_r \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}}}$
4	Cálculo de la extensión $\Delta_L$	$\Delta_L = h \cdot 0,412 \cdot \frac{(\epsilon_{eff}+0,3)\left(\frac{W}{h}+0,264\right)}{(\epsilon_{eff}-0,258)\left(\frac{W}{h}+0,8\right)}$
5	Cálculo del largo ( $L$ ) del parche	$L = L_{eff} - 2\Delta_L$
6	Impedancia en el borde	$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})}$
7	Valor de auto-conductancia $G_1$	$G_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{90} \left( \frac{W}{\lambda_o} \right)^2, & W \ll \lambda_o \\ \frac{1}{120} \left( \frac{W}{\lambda_o} \right)^2, & W \gg \lambda_o \end{pmatrix}$

8	Valor de conductancia mutua $G_{12}$	$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left( \frac{\sin(\frac{k_o W}{2} \cos(\theta))}{\cos(\theta)} \right)^2 \dots$ $\dots J_o(k_o L \sin(\theta)) \sin^3(\theta) d\theta$
9	Cálculo distancia de inserción	$y_o = \frac{L}{\pi} \left( \cos^{-1} \sqrt{\frac{R_{in}(y_o)}{R_{in}(0)}} \right)$

### 2.1.2. Dipolo corbata o Bow-Tie

Debido a sus características de banda ancha, las antenas bicónicas se han empleado durante muchos años en las gamas de frecuencias VHF y UHF, además, presentan características de radiación atractivas, comparadas con las de otras de otras antenas simples, y es allí donde surgen variaciones de su estructura mecánica, conservando al mismo tiempo el mayor número posible de características eléctricas deseadas.

Las aproximaciones geométricas a la antena bicónica son las antenas de hoja triangular, tipo Bow-Tie, y algunas otras aproximaciones como las que se muestran en la Figura 2.2, son normalmente fabricadas por medio de láminas metálicas o alambres de distinto calibre. Cada una de estas antenas también puede simularse por un cable a lo largo de la periferia de su superficie, lo que reduce significativamente el peso y la resistencia al viento de la estructura. La antena Bow-tie, tiene como debilidad que su impedancia de entrada es algo más sensible a la frecuencia de trabajo, dicha antena ofrece un diagrama de radiación omnidireccional, con su haz principal en el plano perpendicular al plano de la antena, y el ancho de banda de dicha antena está limitado a una octava [15]. La antena bow-tie, es usada en arreglos planos para pruebas en vuelos de aeronaves y para la evaluación de un sistema radiómetro UHF. La estructura se puede situar sobre un plano de masa para obtener un diagrama de radiación unidireccional [16].

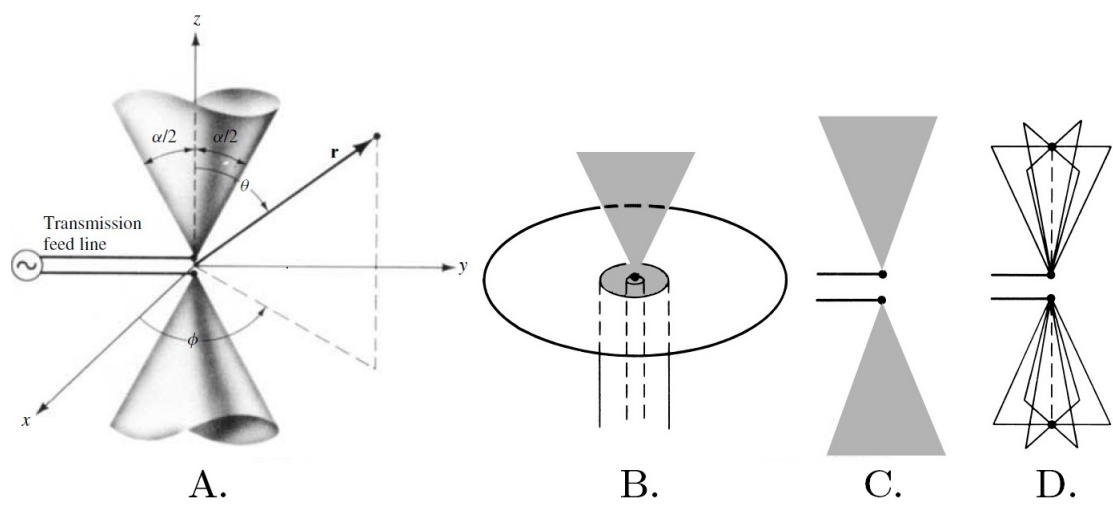


Figura 2.2: Comparación entre variaciones de antena bicónica: A. Antena bicónica, B. Antena de hoja triangular, C. Antena Bow-tie, D. Antena bicónica por medio de alambre. [15]

## 2.2. Metamateriales

### 2.2.1. Resonador de anillo dividido SRR

El Resonador de Anillo Dividido (SRR), su respectiva geometría se puede observar en la Figura 2.3, es ampliamente utilizado en el área de investigación debido a sus características de compactidad y bajo costo de implementación. El SRR puede incorporarse a la línea microstrip y puede probarse para diversos fines.

El diseño del Resonador de Anillo Dividido ha llamado la atención de los investigadores, por ello se han desarrollado varios tipos o topologías en diversas aplicaciones, debido a sus características de permeabilidad negativa, y en el área de detección de características dieléctricas. El SRR presenta una propiedad metamaterial que actúa como un resonador que se divide en los extremos opuestos de cada anillo anular concéntrico. El anillo está diseñado en pares que tienen un pequeño espacio entre ellos. Este generalmente está construido en cobre, pero en algunas aplicaciones podría usarse el oro [17].



Figura 2.3: Geometría del SRR.

### 2.2.2. Resonadores de campo eléctrico acoplado ELC

Las celdas ELC o de campo eléctrico acoplado, son estructuras metamaterial, que presentan una respuesta de permitividad negativa, la cual surge como mejora de estructuras con una respuesta electromagnética negativa, como las celdas de tipo alambre. Estas estructuras, también son resonantes y ajustables según sus parámetros geométricos. Además, se basan en un resonador LC con un modo fundamental, que se acopla fuertemente a un campo eléctrico uniforme, y de forma despreciable a un campo magnético uniforme, presentando una alternativa diferente a la celda SRR, en la cual su respuesta de resonancia eléctrica y magnética están acopladas, lo que da lugar a un comportamiento electromagnético híbrido no deseable para algunas aplicaciones. En la Figura 2.4, se presentan las distintas topologías de este tipo de estructura, según [18].

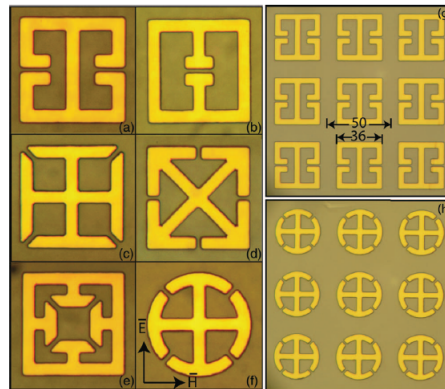


Figura 2.4: Topología de celdas ELC.

### 2.2.3. Superficie de frecuencia selectiva FSS

Las superficies de frecuencia selectiva, o filtros espaciales, son estructuras que se usan para modificar la incidencia de las ondas electromagnéticas en su superficie, y dar características de transmisión o reflexión. Los cambios en las características pueden ser tanto en amplitud, como en fase. Las FSS, suelen estar constituidas por una matriz periódica de elementos metálicos, sobre sustratos dieléctricos, cada uno de estos con una forma particular. También tienen doble polarización, estabilidad angular, periodicidad reducida y respuesta de frecuencia multipolar de bajo perfil.[19] Las propiedades referentes a un diseño optimizado son un desafío, ya que requiere un ajuste en el tamaño del elemento de la estructura, el diseño geométrico, el sustrato dieléctrico y el espaciado de elementos internos, con el fin de obtener las mejores propiedades electromagnéticas.

El funcionamiento de las FSS, se traduce en que cuando las ondas electromagnéticas insidien en una de estas estructuras, se simula la corriente en los elementos de la matriz y esta genera un campo electromagnético, de tal manera que, al haber una agrupación de estos elementos, estos se combinan y forman un campo que caracteriza su comportamiento. La Figura 2.5, muestra los circuitos equivalentes básicos de las FSS, en donde su comportamiento se traduce a un filtro pasa bajo o uno pasa alto. Los parches metálicos en el FSS actúan como inductancia (L), mientras que los huecos o mallas, generan capacitancia (C), resistencia (R). La combinación de elementos capacitivos e inductivos crea una respuesta de filtro, en donde si las dimensiones cambian, se producirán variaciones en los valores de L y C, y por ende en su frecuencia de resonancia.[19]

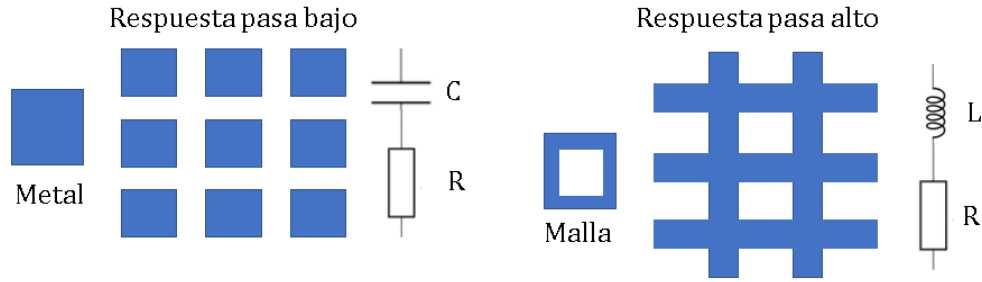


Figura 2.5: Generalidad para topologías de FSS.

## 2.3. Parámetros relevantes para el proyecto

Para poder entender y analizar el comportamiento de las antenas, se hace necesario describir e identificar una serie de parámetros que permitan evaluarlas bajo unas condiciones de prueba. Es por eso que aquí se detallan algunos de esos parámetros para llevar a cabo este proceso.

### 2.3.1. Directividad y ganancia

La Directividad ( $D$ ) de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y a una distancia dada desde la antena y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isótropa (que radiase la misma potencia que la antena), [20].

$$D(\theta, \phi) = \left( \frac{\rho(\theta, \phi)}{P_{rad}/(4\pi r^2)} \right) \quad (2.1)$$

Teniendo en cuenta que la intensidad de radiación se define como  $\vec{K}(\theta, \phi) = r^2 \rho(\theta, \phi)$  la expresión anterior puede ser escrita como:

$$D(\theta, \phi) = \frac{(4\pi r^2)\rho(\theta, \phi)}{P_{rad}} = \frac{4\pi \vec{K}(\theta, \phi)}{P_{rad}} = \frac{\vec{K}(\theta, \phi)}{P_{rad}/4\pi} = \frac{\vec{K}(\theta, \phi)}{K_0} \quad (2.2)$$

Un parámetro asociado con la directividad es la ganancia de potencia de la antena ( $G$ ). Aunque su definición es semejante, la comparación no se establece con la potencia radiada, si no con la aceptada por la antena. esto permite tener en cuenta las posibles pérdidas en la antena (eficiencia), ya que no toda la potencia entregada a la antena es radiada al espacio, sino que así mismo tiene en cuenta sus características direccionales.

La ganancia de una antena en una dirección se define como la relación entre la intensidad de radiación en una dirección y la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena fuera radiada de una forma isótropa. La intensidad de radiación resultante del caso en que una potencia aceptada sea radiada de una forma isótropa se determina como la potencia

aceptada por la antena (de entrada) dividida en  $4\pi$  [15], [20]. La ecuación (2.3) muestra la relación expuesta anteriormente.

$$G = \frac{\text{Intensidad de radiación}}{\text{Potencia de entrada aceptada}/4\pi} = 4\pi \frac{K(\theta, \Phi)}{P_{in}} \quad (2.3)$$

Para acercarse más a la realidad, se debe introducir el término de eficiencia de radiación, el cual se relaciona con la potencia de entrada y la radiada, de esta manera  $P_{rad} = e_{cd} \cdot P_{in}$ . Dicho término, permite escribir la ganancia en términos de la potencia radiada y la eficiencia de radiación (2.4).

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left( 4\pi \frac{K(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right) = e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (2.4)$$

De igual forma, el valor máximo de la ganancia ( $G_0$ ), se relaciona al valor máximo de la directividad, como se muestra en (2.5)

$$G_0 = G(\theta, \phi)|_{max} = e_{cd} D(\theta, \phi)|_{max} = e_{cd} D_0 \quad (2.5)$$

### 2.3.2. Ancho de banda de impedancia

Debido a su geometría finita, las antenas están limitadas a operar satisfactoriamente en una banda o margen de frecuencias. Este intervalo de frecuencias, en el que un parámetro de antena determinada no sobrepasa unos límites prefijados, se conoce su ancho de banda. El ancho de banda (BW) se puede especificar como la relación entre el margen de frecuencias en que se cumplen las especificaciones y la frecuencia central [15]. Existen varias formas de calcular el ancho de banda para una antena determinada teniendo en cuenta varias de sus características. En (2.6), se presenta la relación con respecto la frecuencia media, donde  $f_o = (f_{max} + f_{min})/2$ .

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_o} \quad (2.6)$$

Y en (2.7), la expresión utilizada para antenas de banda ancha.

$$BW = \frac{f_{max}}{f_{min}} : 1 \quad (2.7)$$

Cabe señalar que la selección de las frecuencias máxima y mínima, se hace con respecto al criterio de referencia según el estándar de aplicación en términos de las pérdidas de retorno, por ejemplo, el criterio de  $-10\text{dB}$  para antenas de banda ultra ancha.

### 2.3.3. Parámetros de dispersión

Los parámetros de dispersión o también llamados parámetros  $S$  son los coeficientes de reflexión y transmisión que se producen en el medio en el cual viaja una onda electromagnética. Los



coeficientes de transmisión están relacionados con la atenuación, pérdidas de inserción y ganancia. Por otro lado, los coeficientes de reflexión, con el VSWR y la impedancia. Adicionalmente, los parámetros  $Z$  que caracterizan a una red de “n” puertos, son definidos cuando uno de los puertos está en corto circuito ( $v = 0$ ) o en circuito abierto ( $i = 0$ ). Con un aumento de frecuencia, es más difícil establecer un circuito abierto. Las terminales separadas por un dieléctrico cualquiera forman un condensador como se observa en la Figura 2.6a. El voltaje, en el condensador, tiende a cero conforme aumenta la frecuencia. Esto provoca un comportamiento más de corto circuito que de un circuito abierto. Para establecer un circuito cerrado, las terminales del puerto son conectadas mediante un conductor. En la realidad, un conductor se comporta como un arreglo serie de resistencias y un inductor (como se observa en la Figura 2.6a. Al aumentar la frecuencia, la impedancia del conductor aumenta. Esto provoca más un circuito abierto que un corto circuito. Como se puede notar para altas frecuencias, no es posible caracterizar una red de “n” puertos con los parámetros  $Z$  [21].

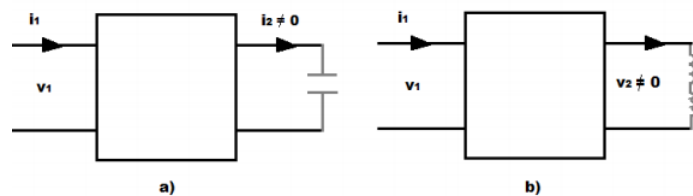


Figura 2.6: Efecto de la alta frecuencia en red de dos puertos. [21]

Los parámetros  $S$  se basan en los niveles de potencia que se perciben en los terminales de los dos puertos sin ningún tipo de consideración adicional. En la Figura 2.7 se muestra una red con ondas incidentes y reflejadas en los dos puertos. En el caso de un circuito de dos puertos existen cuatro parámetros  $S$  y las relaciones entre sus ondas incidentes y reflejadas están detenidas de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Donde  $S_{11}$  es el coeficiente de reflexión de entrada, es decir la potencia reflejada en el puerto 1, cuando se genera una onda incidente en el mismo.  $S_{12}$  es el coeficiente de transmisión inversa, es la potencia que llega al puerto 1 cuando se alimenta el segundo puerto. El coeficiente de transmisión directa  $S_{21}$  es la potencia que llega al puerto 2, cuando se alimenta por dicho puerto y El Coeficiente de reflexión a la salida  $S_{22}$  es la potencia que refleja el puerto 2 cuando se genera una onda incidente en dicho puerto. El parámetro  $S_{11}$  es uno de los más utilizado ya que brinda la información de la transferencia de potencia del generador hacia la antena [22].



Figura 2.7: Diagrama de la red de dos puertos.

## 2.4. Programas

Los programas o software son herramientas de análisis, que nos facilita la visualización y verificación de diferentes resultados de los tipos de estructuras anteriormente mencionadas, para este caso particular utilizaremos dos programas comerciales, ya que el encadenamiento entre estas dos herramientas nos ofrece una disminución en el tiempo de construcción geométrica de la antena visto desde Matlab hacia el programa de análisis electromagnético que para este caso en particular es CST Studio versión estudiantil, y luego se devuelven los resultados para su posterior manipulación y manejo de estos datos, ya sea para realizar una operación matemática, optimización o la operación necesaria para una interpretación de resultados.

### 2.4.1. Matlab

Es una herramienta técnica de alto rendimiento que ofrece de forma precisa y rápida realizar una integración entre cálculo, visualización y programación. Entre sus más importantes usos está modelado, simulación y creación de prototipos, análisis, exploración y visualización de datos y gráficos, generalmente en el ámbito científico y de ingeniería. Además, presenta la posibilidad de desarrollar aplicaciones o construcción de interfaces gráficas de usuario.

Debido a su amplia gamma de aplicaciones se convirtió un entorno universitario, ya que es la herramienta de instrucción estándar para cursos introductorios y avanzados en matemáticas, ingeniería y ciencias. Matlab también presenta un grupo de soluciones específicas para ciertas aplicaciones denominados cajas de herramientas o Tool box, que permiten aprender y aplicar tecnología especializada en ciertos proyectos. Estas cajas de herramientas son colecciones completas de funciones de Matlab, que generalmente se encuentran como archivos (.m), y amplían el entorno de Matlab.

Por otro lado, es importante resaltar que debido al uso de Matlab con otros lenguajes de programación como *C++*, *Java*, *Fortran*, entre otros, hace que sea uno de los favoritos para el análisis de datos ya que facilita la conversión de código o empaquetado de programas, en general la integración y enlace de diferentes programas como en nuestro caso con el software de análisis electromagnético [23].

### 2.4.2. Programas de análisis electromagnético

Durante años las herramientas de simulación han tenido una gran demanda, en el ámbito de la ingeniería, gracias a los avances tecnológicos se ha hecho posible que, con mayor facilidad, se pueda investigar y realizar simulaciones electromagnéticas. Estas herramientas de simulación de campos electromagnéticos abarcan un amplio margen de análisis y diseño. Además, se han convertido en parte fundamental ya que es un medio interactivo y dinámico que brinda la oportunidad de analizar escenarios complejos del mundo real de forma precisa, con un bajo coste económico y un ahorro de tiempo considerable.

Los programas de simulación electromagnética están basados en dos tipos de técnicas: técnicas rigurosas y técnicas asintóticas. Las técnicas rigurosas, tal como el Método de los Momentos (MoM), Finite Difference Time Domain (FDTD), o el Método de los Elementos Finitos (FEM), todas ellas están basadas en la discretización de la geometría en elementos diferenciales. Por lo que, para estructuras eléctricamente grandes, los recursos computacionales requeridos se incrementan y estas técnicas llegan a ser limitadas por la disponibilidad de recursos computacionales, aunque gracias a las nuevas investigaciones, estas limitaciones cada vez son menores. Pero, a pesar de este inconveniente, se obtiene una solución exacta numéricamente del problema [24]. Entre los programas de análisis electromagnético se tienen CST MICROWAVE STUDIO, ANSYS HFSS y FEKO los cuales serán descritos brevemente a continuación.

CST MICROWAVE STUDIO, está basado en la técnica de integración finita (FIT), un enfoque que describe las ecuaciones de Maxwell en un espacio de malla y puede escribirse tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia y no está restringido a un determinado tipo de malla. Un gran paso adelante en el área del mallado fue introducido por un método denominado “Aproximación de límites perfectos (PBA)” y que permitió una técnica para representar curvas e inclinaciones con gran precisión dentro de una discretización gruesa. Uno de los méritos más importantes del solver en el dominio del tiempo del CST MWS es que el requisito de recursos sólo se escala linealmente con el número de nodos de la malla y, por tanto, mejoró el problema del tamaño y hace posible manejar grandes estructuras radiantes. [25].

La capacidad de extraer una alta resolución de datos de antenas de banda ancha, es el resultado de emplear la capacidad del solucionador en el dominio del tiempo, para definir y calcular un gran número de monitores de campo lejano en una sola simulación representa un importante rendimiento, además, el uso de paquetes de simulación en un contexto de diseño industrial requiere mucho más que un algoritmo eficaz. Los diseñadores necesitan una interfaz fácil de usar que permita construir el modelo de simulación de forma sencilla y rápida, reutilizar los modelos CAD existentes, por ejemplo, del diseño mecánico, generar la malla de discretización de forma sencilla o automática, gestionar proyectos de simulación complejos compuestos por varios componentes y procesar posteriormente de forma eficaz los posibles enormes datos resultantes [26].

ANSYS HFSS (High Frequency Structure System) es un programa de diseño, modelado y simulación en 3D de campos electromagnéticos de onda completa y es esencial para el diseño de alta frecuencia y para el diseño de componentes de alta velocidad. Éste ofrece varias tecnologías avanzadas de solvers basadas en modelos a través del método de elementos finitos y mallas adaptativas o en el método de ecuaciones integrales. HFSS facilita la visualización del comportamiento de las ondas electromagnéticas por medio de herramientas interactivas y dinámicas. HFSS es una herramienta útil para resolver sistemas de estructura compleja que son difíciles o imposibles de modelar considerando métodos puramente algebraicos. Se utiliza por lo tanto para la creación de prototipos virtuales de todo tipo de antenas, conectores, entre otros [27].

FEKO es un programa de análisis electromagnético, utilizado ampliamente en las industrias de telecomunicaciones, automotriz, entre otras. Además, ofrece varias soluciones en el dominio de frecuencia y tiempo, bajo una sola licencia. La hibridación de estos métodos permite el análisis eficiente de un amplio espectro de problemas de EM, incluyendo antenas, circuitos de microstrip, componentes de RF y sistemas biomédicos, la colocación de antenas en estructuras eléctricamente grandes, el cálculo de la dispersión, así como la investigación de la compatibilidad electromagnética. También ofrece herramientas diseñadas para resolver las interacciones electromagnéticas más complejas, incluyendo solvers dedicados para análisis de modos característicos (CMA) y el acoplamiento de cables bidireccionales. También se incluyen formulaciones especiales para la simulación eficiente de antenas integradas en automóviles y matrices de antenas. Combinado con el método MLFMM (Multilevel Fast Multipole Method) [28].

## 2.5. Optimización

Actualmente la optimización ha venido tomando un papel importante en varias disciplinas. En general, optimización representa el proceso de encontrar la mejor solución a un problema, entre un conjunto de soluciones posibles, gracias al conjunto de métodos analíticos y numéricos que se utilizan para buscar dicha solución. Para abordar con más detalle esta sección, es importante mencionar que se tomó el punto de vista del concepto de optimización en [29]. Este puede ser tratado como un proceso en donde se quiere encontrar el valor óptimo  $X$  que minimiza o maximiza una o varias funciones objetivo  $f(x)$ .

$$f(x), x = (x_1, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d : x \in X \quad (2.9)$$

Donde  $x$  representa el vector de variables de decisión,  $d$  representa el número de variables, y  $x$ , el conjunto de soluciones candidato, o espacio de búsqueda, el cual suele acotarse mediante un límite inferior o superior de cada una de las  $d$  variables de decisión, de forma que:

$$X = \{x \in \mathbb{R}^d | l_i \leq x_i \leq u_i, i = 1, \dots, d\} \quad (2.10)$$

En algunos casos es necesario minimizar y en otros casos es necesario maximizar la función  $f(x)$ , cualquiera que sea el caso escogido se logra una relación para convertirlos fácilmente:

$$\max f(x) \iff \min -1 \cdot f(x) \quad (2.11)$$

## 2.6. Algoritmos y métodos de optimización multiobjetivo

Cuando a métodos y algoritmos de optimización nos referimos, se encuentra en la literatura una cantidad considerable de autores, donde partiendo de su función objetivo y necesidad de maximizar o minimizar se requiere, se pueden clasificar en métodos clásicos y en soft-computing. Su diferencia radica básicamente en que los clásicos buscan y garantizan un valor óptimo local,

mientras que en el segundo caso se cuenta con mecanismos específicos para alcanzar un óptimo global, aunque no garantizan su alcance, en la Figura 2.8 se puede observar la clasificación y algoritmos que pertenecen a dichos métodos.

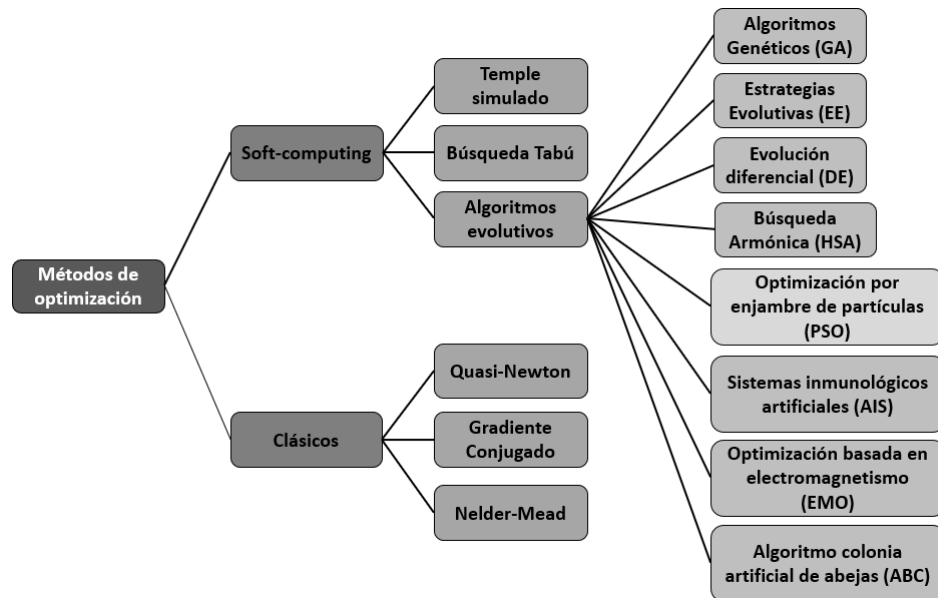


Figura 2.8: Métodos de optimización

En esta sección se hará énfasis en los primeros cinco algoritmos evolutivos, ya que son los algoritmos más comúnmente implementados en Matlab. A continuación, se mencionan las características principales de los algoritmos, haciendo la salvedad que en [29], se encuentra mayor detalle y ejemplos de cada uno de los anteriormente mencionados.

### Algoritmos genéticos (AG)

Este tipo de algoritmos se utilizan generalmente para la solución de problemas de optimización cuando se requiere minimizar una función de dos variables de decisión  $d = 2$ . Considerando  $x_1, x_2 \in [-15, 30]$

Función a minimizar:

$$f(x) = f(x_1, x_2) \quad (2.12)$$

$$= a + \exp(1) - a \cdot \exp\left(-b \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{d} \cdot (x_1^2 + x_2^2)\right)}\right) - \exp\left(\frac{1}{d} \cdot (\cos(c \cdot x_1) + \cos(c \cdot x_2))\right) \quad (2.13)$$

Un AG es un programa que genera una población inicial aleatoria de padres y durante cada generación selecciona pares de padres según la función objetivo, para realizar intercambios o cruces de material genético y generar pares de hijos, que serán mutados con cierta probabilidad y finalmente competirían por sobrevivir a la siguiente generación con los padres, este proceso

se conoce como elitismo. Puede ocurrir que la población sea arrastrada por el mejor individuo de la población que en ocasiones conduce a un estancamiento de la población.

### **Estrategias evolutivas (EE)**

Estos algoritmos inspirados en la evolución o mejora con respecto a alguna función objetivo y mediante operadores que imitan dicho proceso. la función utilizada corresponde a la llamada *Michalewicz* de dos dimensiones. Considerando  $x_1, x_2 \in [0, \pi]$  y que  $m = 10$ .

Función a minimizar:

$$f(x) = f(x_1, x_2) = - \left[ \sin(x_1) \sin^{2m} \left( \frac{x_1^2}{\pi} \right) + \sin(x_2) \sin^{2m} \left( \frac{2x_2^2}{\pi} \right) \right] \quad (2.14)$$

La mayor diferencia entre el EE y AG, es que el operador de mutación no es solo un valor como en el AG, sino es una matriz de valores de mutación. Siendo la característica más atractiva ya que lo hace muy poderoso para resolver problemas de optimización con o sin restricciones.

### **Evolución diferencial (DE)**

Este tipo de algoritmo ha demostrado mejor desempeño en términos de velocidad, robustez y convergencia, posee muchas características que lo han convertido en uno de los más utilizados, como estructura compacta, fácil implementación y uso, bajo costo de cómputo y una alta capacidad de resolución a problemas con superficies irregulares. La implementación más practica del DE, mantiene un par de vectores  $x_{i,g}$  que han sido encontrados aceptables para ser puntos de inicio en los cuales están contenidos los individuos  $N_p$ , de dimensiones  $d$  de valores reales y la población actual se simboliza por  $P_x$ .

$$P_{x,g} = (X_{i,g}), i = 0, 1, \dots, N_p - 1, g = 0, 1, \dots, g_{max} \quad (2.15)$$

$$X_{i,g} = (X_{j,i,g}), j = 0, 1, \dots, d - 1 \quad (2.16)$$

### **Búsqueda armónica (HSA)**

En los algoritmos metaheurísticos la inicialización de las soluciones esperadas, son utilizadas en el proceso de optimización. En el HSA estándar se requiere inicializar las variables que lo definen y los parámetros que el algoritmo emplea. Considerando  $x(j) \in [l(j), u(j)]$  con  $j = 1, 2, \dots, n$ . donde  $n$  el número de variables de diseño y  $[l(j), u(j)]$  los límites para cada variable de  $x(j)$ .

Función a minimizar:

$$f(x), x = [x(1), x(2), \dots, x(n)] \in \mathbb{R}^n \quad (2.17)$$

Las características que lo distinguen de los demás algoritmos metaheurísticos, son que para generar nuevas soluciones, se consideran todas las soluciones no solo las de los padres. Por otro lado, cada variable de decisión se considera independiente, de valor continuo y tiene su propio vector de soluciones. No requiere conversiones numéricas, ni inicialización previa de posibles soluciones. Por otro lado, no emplean métodos de derivadas o gradientes.

## Optimización por enjambre de partículas (PSO)

Este algoritmo considera soluciones candidatas como partículas que se conoce como población inicial, las cuales comienzan de forma aleatoria en un espacio determinado. Esta población determina su calidad al evaluar las partículas en la función objetivo, y de la misma forma se determina al mejor de los elementos, las nuevas velocidades y posiciones se calculan en función del mejor elemento global y el valor actual de cada partícula en conjunto con un número aleatorio. En la siguiente Figura 2.9 se puede ver el diagrama de flujo detallado de este algoritmo.

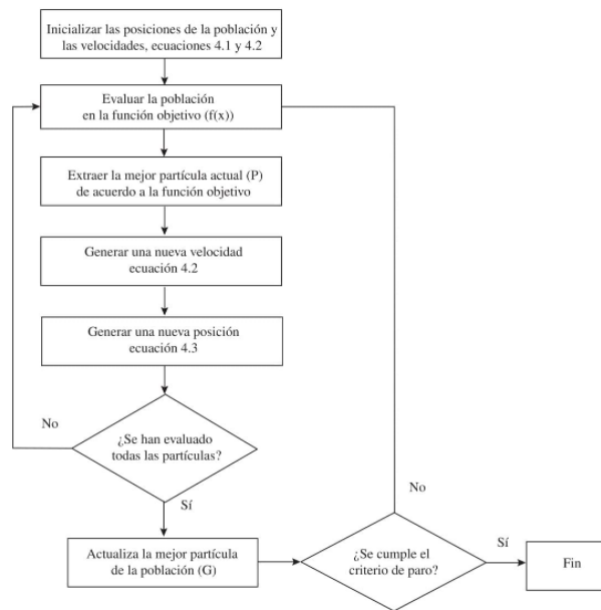


Figura 2.9: Diagrama de flujo de PSO.[29]

El PSO como en la mayoría de los algoritmos meta heurísticos, requiere una etapa de inicialización. La población inicial de partículas se genera distribuyendo aleatoriamente en el espacio de solución que tiene sus límites definidos en esta primera fase, además de las restricciones en caso de que existan. La siguiente ecuación describe la optimización para PSO:

$$x_k^{i,t} = l_k + rand(u_k - l_k), x_k^{i,t} \in x^t \quad (2.18)$$

Donde:  $x_k^{i,t}$  es la  $i$ -ésima partícula de la población  $x^t$ ,  $i$  es el índice que se refiere al número de partículas y tiene como valor máximo el tamaño de la población ( $i=1,2,\dots,Par\_N$ ) y la dimensión se define por la variable  $k$  y el número de iteraciones con la variable  $t$ . Mientras  $l_k$  y  $u_k$  son los límites inferior y superior de las dimensiones del espacio de búsqueda. Por último,  $rand$  es un número aleatorio uniformemente distribuido entre el rango de cero a uno.

## 2.7. Comunicación entre programas

Para la comunicación entre programas, se emplean dos recursos importantes de los programas a tratar, estos recursos son el lenguaje visual basic para aplicaciones VBA soportado por CST, y el objeto de comunicación (Componente Object Model) COM integrado en Matlab.

El lenguaje VBA, es una combinación del entorno y lenguaje de programación de visual basic, el cual es compatible con diversas aplicaciones como las contenidas por el paquete de Office entre otras. Este lenguaje presenta la particularidad, de que se basa en la programación orientada a objetos, en donde el programa presenta las definiciones y métodos correspondientes para acceder a cada uno de ellos, dichos métodos son presentados en forma estándar de VBA y deben ser llamados desde archivos externos para que se puedan reconocer de forma adecuada. CST tiene un entorno para creación y edición de macros, los cuales son subrutinas para ejecutar una o varias tareas específicas, las cuales se escriben en lenguaje VBA. En la Figura 2.10, se presenta la visualización del editor de macros en CST. [30]

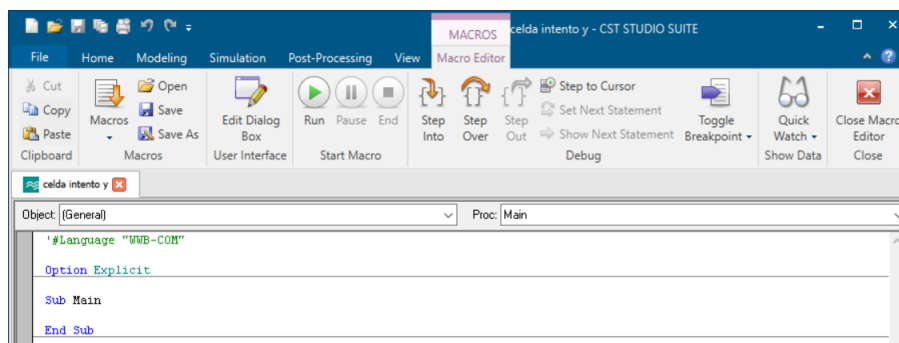


Figura 2.10: Editor de macros CST.

Por otro lado, se tiene el objeto COM que se encuentra en Matlab, el cual proporciona un marco de trabajo para integrar componentes de software binarios y reutilizables en una aplicación. Dado que los componentes se implementan con código compilado, el código fuente puede escribirse en lenguajes de programación compatibles con COM, y desde un archivo “.m”, lo cual evita que se deban llamar archivos externos, centra el manejo de todo el desarrollo en un archivo principal, y facilita la integración de distintas herramientas compatibles a este. En la Figura 2.11, se presenta la analogía de sintaxis para el lenguaje VBA y lo requerido por COM. [31]



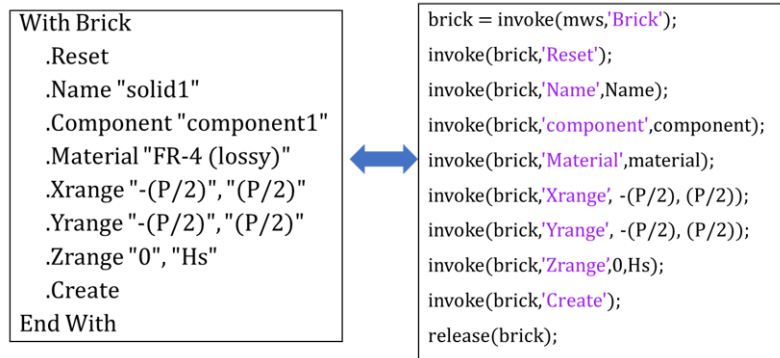


Figura 2.11: Equivalencia entre lenguaje macro VBA y lenguaje empleado por COM

# Capítulo III

## Estado del Arte

A continuación, se presentan los avances más relevantes en cuanto a las técnicas de diseño automatizadas aplicadas al diseño y modelado de estructuras radiantes en general, esto con el objetivo de presentar un panorama amplio en este campo y generalidades asociadas. Posteriormente, se tratará lo referente al diseño automatizado, para los grupos de estructuras tratados en este documento, en el grupo de antenas, se presenta lo referente a parche rectangular y dipolos de banda ancha, y como segundo grupo, lo referente a estructuras metamaterial.

### 3.1. Técnicas de diseño automatizado

En esta sección se encuentran las generalidades reportadas en la literatura para las técnicas de optimización enfocadas al diseño automatizado, para diversos tipos de antenas.

En [32], se utiliza un elemento VBA (Visual Basic Application) para enlazar Matlab con el programa de simulación CST, esto con el fin de lograr establecer un método de automatización del diseño para optimizar una antena de tipo RFID con un AG (Algoritmo genético). Al vincular estos dos programas se logra que los resultados de las pruebas obtenidas del programa de simulación se transmitan al algoritmo genético, y éste optimiza el diseño automáticamente.

La Figura 3.1 muestra el esquema de conexión general de dicha implementación, de aquí se sabe que se construye la geometría mediante las herramientas que brinda el programa, y posteriormente se fijan parámetros particulares a tener en cuenta por el algoritmo seleccionado en Matlab, para ahí si ejecutar la conexión.

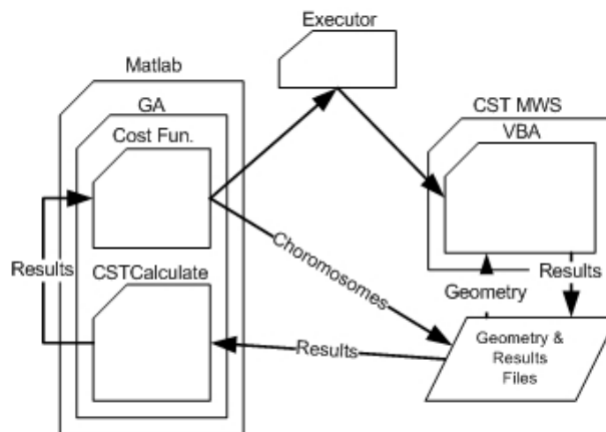


Figura 3.1: Conexión entre los programas mencionados. [32]

De manera un poco más detallada, el AG, el cálculo de costes y el cálculo de CST, se programan con Matlab, el AG solicita la ejecución del programa de análisis electromagnético mencionado al ejecutor, y el AG pasa el cromosoma que tiene los parámetros de diseño al archivo de geometría. La aplicación VBA define el esqueleto de las estructuras de la antena y los entornos de simulación, así como el rango de frecuencias. Luego, el VBA recibe el archivo de geometría de un diseño traducido de un cromosoma, y obtiene los resultados de la simulación, como la impedancia de la antena y patrón de radiación, estos se pasan a Matlab para transferir los resultados de impedancia de la antena RFID al coeficiente de reflexión basado en la impedancia del chip RFID, éste parámetro se utilizará para el cálculo del coste. Estos procesos se repetirán hasta que la función coste cumpla el criterio establecido por el diseño.

En [33], se propone un método de simulación interactiva de Matlab y CST por medio del uso de algoritmos genéticos, que permita medir el grado de acoplamiento entre dos monopolos a 300 y 625 MHz. El método aquí planteado, solicita la información de posición de la antena y la plataforma portadora se inicializa en Matlab, para posteriormente ejecutar el programa del algoritmo genético y conseguir que el esquema de disposición de cada generación, se transmita automáticamente al programa de simulación electromagnética mencionado a través de Activex. Éste resuelve el grado de acoplamiento de la antena y lo devuelve a Matlab como valor objetivo del esquema. Después de docenas de generaciones arrojadas por el algoritmo, se encuentra el mejor diseño teniendo en cuenta el criterio del diseñador. En comparación con otros métodos de optimización reportados por el autor, el método de este trabajo no necesita construir un complejo modelo de cálculo numérico electromagnético, tiene una gran operatividad y un alto grado de visualización.

Finalmente, se destaca que dicho algoritmo se utilizó para optimizar la ubicación espacial de las antenas con respecto a un plano de masa y de esta forma reducir el grado de acoplamiento. Se adopta el método de co-simulación, que aprovecha al máximo la capacidad de procesamiento de datos de Matlab y la capacidad de cálculo electromagnético de CST. El método de este artículo

es aplicable al problema de optimización de la disposición de la antena de otras portadoras. Si la estructura de la portadora y la función objetivo cambian, sólo se debe volver a crear el nuevo modelo en el programa de simulación electromagnética mencionado y escribir la función de objetivo correspondiente.

En [34], se aplican técnicas de optimización avanzadas para diseñar automáticamente una antena y de esta forma conocer las dimensiones adecuadas de la misma. Aquí se trabaja una antena fractal Sierpinski, la cual, debido a la complejidad de formas para su construcción, requiere un mayor número de parámetros, por ende, más tiempo de cálculo. En estos casos, las herramientas de optimización integradas en programas comerciales no son eficaces. Por lo tanto, es necesario desarrollar una nueva técnica con un algoritmo de optimización avanzado que se asocie a un programa comercial. En este trabajo, se implementó el método de optimización caótica propuesto en Matlab, el cual fue capaz de controlar CST a través de un archivo *.m* para la optimización de una guía de onda coplanar modificada (CPW), para alimentar la antena fractal de Sierpinski. En el método de optimización propuesto se hace uso de las ecuaciones que describen un oscilador de Chua conocido con parámetros correspondientes al atractor caótico de doble desplazamiento.

En [35], se propone una antena RFID anidada para asegurar la coincidencia de impedancia conjugada entre esta y un chip. La antena RFID en forma de *H* se optimiza utilizando la interfaz de CST Microwave Studio con Matlab. El objetivo de la optimización es maximizar la transferencia de potencia al chip diseñando y lograr que la impedancia de la antena sea conjugada con la impedancia del chip, para esto se utilizó el algoritmo PSO (Optimización de Enjambre de Partículas). Aquí se evalúa el diseño de la antena mediante el algoritmo PSO propio de Matlab, se vincula con el CST a través del servidor COM utilizando un script VBA, en donde se tiene a CST en calidad de servidor y Matlab en calidad de cliente. Por otro lado, y como se mencionó anteriormente, la antena propuesta se simula en el programa electromagnético y los resultados de  $S_{11}(\text{dB})$  asociados, se importan a Matlab para calcular la función objetivo. La integración del código fuente interno de los programas se realiza mediante la creación de un programa de interconexión. El diagrama de flujo que detalla la metodología de integración se discute en la Figura 3.2.

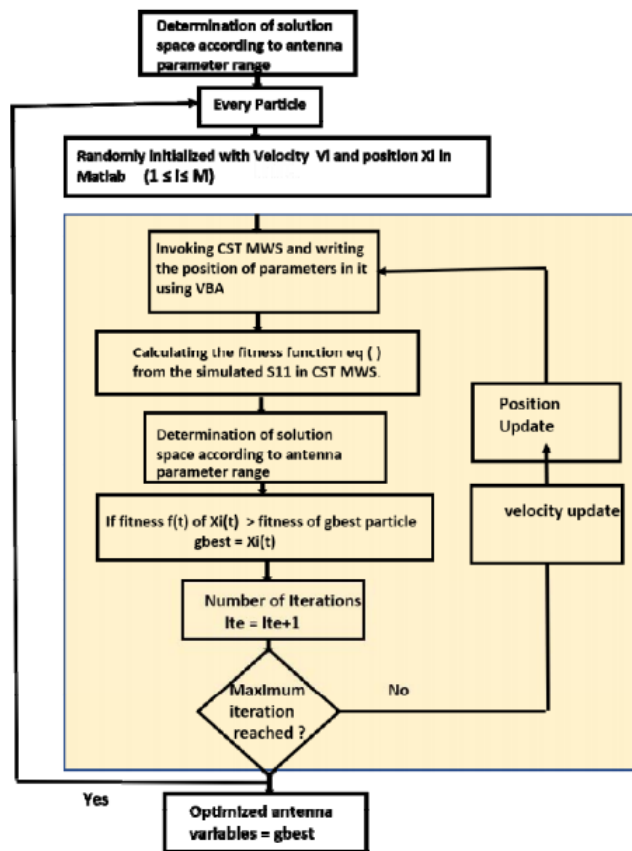


Figura 3.2: Diagrama de flujo del método de optimización PSO. [35]

Con la conexión de los dos programas lograron obtener los resultados deseados, los cuales implican una disminución del tamaño, una mejora del ancho de banda y mejor comportamiento de las pérdidas de retorno. Por lo tanto, la interconexión dichos programas, les permitió una mayor flexibilidad en la manipulación de los datos y el procesamiento de la señal.

En [36], se realiza la optimización de una PIFA (Antena Plana  $F$  Invertida) de polarización simple y doble, utilizando un AG de la plataforma de simulación CST. De manera general, este algoritmo representa un procedimiento de selección estocástico que actúa sobre una población de posibles soluciones, por medio de la creación de una población inicial, reproducción entre individuos, selección de candidatos y mutación.

Para la antena de polarización simple, emplearon un parche en forma de  $L$ , y realizaron variaciones en su longitud, así como en la del pin de cortocircuito. Para la antena de doble polarización realizaron el mismo proceso, pero con dos parches en forma de  $L$ . Los resultados de la simulación y función de fitness se evalúan entorno a la medición del parámetro de reflexión de entrada ( $S_{11}$ ), de las dos antenas. En la Figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo general seguido por los autores para la ejecución de este algoritmo.

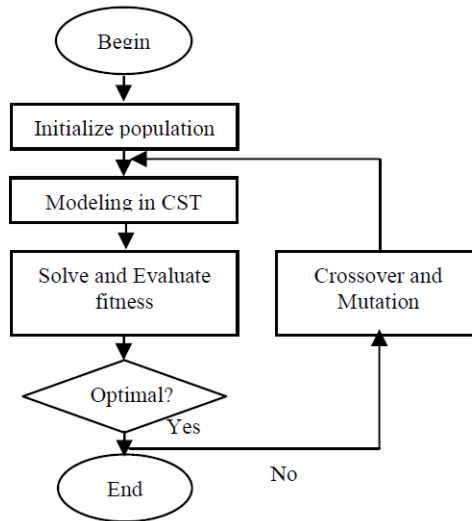


Figura 3.3: Diagrama de flujo AG. [36]

## 3.2. Diseño automatizado de antenas tipo parche

En [37], se considera una antena de parche circular para una frecuencia de resonancia de 5 GHz. Se hace uso del algoritmo FA (Firefly Algorithm), el cual se implementa de manera manual en Matlab, y envía parámetros a la geometría construida en CST. Los parámetros aquí considerados para esta antena son: el radio del parche y la altura del sustrato sobre el que se monta el parche. La función de objetivo busca optimizar parámetros como frecuencia de resonancia, y otros parámetros como son la directividad, el HPBW, etc. Los códigos en Matlab contienen funciones aleatorias que generan diferentes resultados cada vez que se ejecuta el programa. Los valores de varios parámetros se toman como entrada para el proceso de modelado en CST Studio Suite. FA es uno de los algoritmos más exitosos inspirados en la naturaleza, que utiliza, como su nombre lo dice, el concepto de luciérnagas y su movimiento para formar la lógica de la optimización de antenas. Según el autor, la optimización FA resulta más prometedora que la optimización por enjambre de partículas en el sentido de que dicho algoritmo puede tratar con funciones multimodales de forma más eficiente.

En [38], se considera una antena de parche rectangular cuya longitud, ancho y altura de sustrato, se optimizan utilizando GSA (Algoritmo de Búsqueda Gravitacional) a la frecuencia de 5 GHz. Este algoritmo fue recientemente desarrollado e inspirado en la naturaleza, que se basa en las leyes newtonianas del movimiento de la gravitación, la aceleración y la interacción de las masas entre sí. La fuerza gravitacional es la tendencia de las partículas a moverse unas hacia otras, en donde la fuerza entre las partículas se reduce con el cuadrado de la distancia entre ellas.

GSA se utiliza para la optimización en Matlab, la antena de parche rectangular se diseña utilizando CST Studio sobre la base de los resultados obtenidos. La función de fitness se utiliza

para seleccionar la antena de parche optimizada. El gráfico del parámetro S da una breve cuenta de la pérdida de retorno. La antena optimizada tiene un área y dimensiones más pequeñas y da una disminución sustancial en la pérdida de retorno, gracias al uso de este algoritmo.

En [39], se presenta el diseño de una antena de parche microstrip, por medio de una red neuronal artificial optimizada por el algoritmo PSO. El diseño fue basado en simulaciones y técnicas de análisis de onda completa, que brindan programas como CST Studio Suite TM, ya que permite un análisis más preciso de las características de la antena microstrip, cálculos rápidos y suficientemente precisos, que puede satisfacerse utilizando modelos de redes neuronales. Los resultados calculados y los de la red neuronal se comparan con los valores medidos de la antena en este documento.

Para este caso en particular, utilizaron el modelo de red neuronal para calcular las dimensiones principales del parche rectangular, incluida la distancia del punto de alimentación ( $d$ ). Como entrada al modelo, utilizaron los valores conocidos de la frecuencia de resonancia, la altura del sustrato y la constante dieléctrica. Este proceso se lleva a cabo a lo largo de un número de iteraciones de entrenamiento durante las cuales se reduce el error E. El proceso iterativo finaliza cuando se alcanza un valor pequeño y satisfactorio, o se llega a un número determinado de iteraciones.

Es de destacar, que la eficiencia de lo aquí reportado es mayor a los métodos tradicionales, dado que el autor emplea PSO para la optimización de los pesos sinápticos en la estructura de la red neuronal (asociados a los parámetros de entrada y entrenamiento), logrando reducir el error de entrenamiento en comparación con otros métodos convencionales, así que los resultados obtenidos de las redes neuronales entrenadas, les muestran que dicho modelo puede utilizarse como herramienta para el diseño rápido y preciso de antenas de parche, lo que se verifica experimentalmente.

En [40], se hace uso de una red neuronal para la optimización de una antena tipo parche rectangular. De manera más específica en este proyecto se hace uso de una red neuronal supervisada que utiliza RBF (Función de Base Radial), con la cual se consigue mapear las entradas en un espacio de características de alta dimensión a través de procedimientos no lineales. Este tipo de técnicas requiere de una fase de entrenamiento o aprendizaje y una fase de análisis, los cuales son generalmente implementados en programas de análisis matemático.

El proceso consiste en alimentar todo el conjunto de valores disponibles en la red y dejar que se analice, en donde se emplea el algoritmo de retro propagación por medio la función sigmoidea para la optimización. El modelo propuesto se construyó usando las siguientes consideraciones:

- Parámetros de tamaño:  $W, L, h$ , correspondientes a las dimensiones del parche y el espesor del sustrato
- Parámetros del material:  $\epsilon_r$ , correspondiente a características fijas del material

- Parámetros de desempeño:  $f_r, \lambda$ , correspondientes a la frecuencia de resonancia y longitud de onda asociada a la geometría

A manera de conclusión se presenta que este proceso reduce tiempos de cálculo y diseño, en contraste a los métodos de análisis teórico, el método de cavidades y el método de onda completa mencionados por el autor.

En [41], se presenta la optimización de una antena tipo parche rectangular para la frecuencia de 5 GHz, empleando BA (Algoritmo de Búsqueda de Murciélagos) por medio de Matlab, y simulando en el programa CST. Este algoritmo se basa en el principio de la eco-localización de los murciélagos, y tiene como parámetros principales la tasa de pulso y el ruido en el medio. Para este tipo de algoritmos, existen diversas posibilidades en cuanto a número de individuos a evaluar, iteraciones y criterios de parada. Aquí, se hicieron 5 combinaciones distintas de número de individuos e iteraciones y se seleccionó el mejor valor, comparando con un algoritmo PSO, para concluir que el algoritmo BA presenta mejores resultados en cuanto a tamaño, ya que el desempeño electromagnético es casi igual en ambos.

En [42], se compara FA (Algoritmo de Luciérnagas), con PSO y AG en una situación multi-objetivo (optimizar más de un parámetro), para una antena tipo parche de banda ultra ancha en la banda de 3 a 14 GHz. Esta comparación se hace por medio del uso de Matlab y CST, en donde se importa un archivo de geometría CST existente, lo cual implica que esta no se construye directamente desde el programa de análisis matemático, este se usa únicamente para el control del programa de análisis electromagnético. En la Figura 3.4 se puede observar el diagrama de flujo del algoritmo para FA propuesto por el autor.

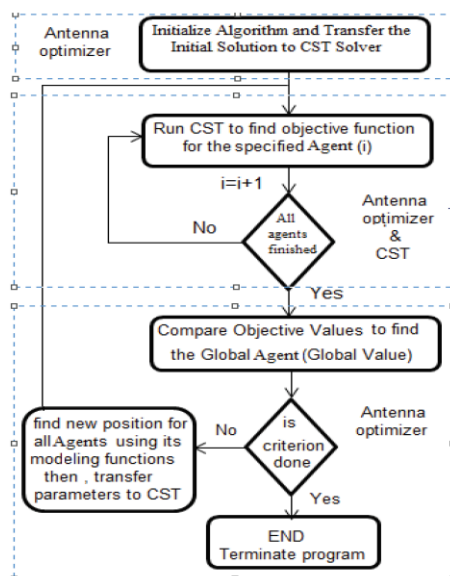


Figura 3.4: Diagrama de flujo FA. [42]



En este algoritmo se debe tener en cuenta que cada luciérnaga se siente potencialmente atraída por todas las demás, una luciérnaga menos brillante se acercará a otra más brillante, en caso de que esto no suceda, la luciérnaga en particular se puede mover al azar y la atracción es proporcional a la luminosidad, por lo que ambas disminuyen con la separación. Adicionalmente, el brillo se relaciona con la función objetivo siendo el individuo más brillante el que está más cerca de esta y viceversa. A manera de conclusión FA presento mejor desempeño dado que realizó la optimización con un menor número de iteraciones.

En [43], se presenta el diseño de una antena de parche microstrip con inserción utilizando VBA, así como una visión general sobre la interconexión de Matlab y paquetes comerciales de programa electromagnético (como CST microwave studio). El control del programa de análisis electromagnético mencionado se realiza mediante Matlab, quien llama al diseño de la antena de parche microstrip junto con sus parámetros de rendimiento: S11, VSWR, requisitos de potencia, patrón de radiación, pérdidas de retorno, etc. Dado que se usa Matlab para controlar el programa de análisis electromagnético, se aclara que este actúa como cliente y CST como servidor, adicionalmente la página de interfaz entre Matlab se crea de igual forma a través de un elemento VBA.

En conclusión, dado que en la actualidad el proceso de diseño de antenas se realiza normalmente modificando el diseño existente de forma manual, y a menudo requieren un extenso método de prueba y error, se crea la necesidad de encontrar soluciones y estrategias novedosas para el diseño de antena, el cual encuentra respuesta en la integración de solucionadores electromagnéticos de onda completa existentes, con diferentes esquemas de optimización, como el aquí reportado, generando una ejecución óptima global para solucionar el problema a tratar, existiendo un único inconveniente referente a lo aquí reportado, el cual es el manejo de los diversos archivos de texto generados en el proceso de optimización descrito, ya que pese a que se intenta tener el control en un solo programa, existe una parte que aún requiere intervención e incorporación de elementos externos.

En [44], se presenta el diseño de una antena de parche rectangular empleando la tecnología microstrip para la frecuencia de 28 GHz. Se realizó el diseño de la estructura, teniendo en cuenta que se manejó un material llamado Taconic TLY-5 con una constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) de 2,2, espesor ( $h$ ) de 0,12 mm y una tangente de pérdidas ( $\tan \delta$ ) de 0,0009, esto dado que el diseño requiere de estas características para calcular las dimensiones de la estructura. En la Figura 3.5 se puede observar la geometría de la antena con los parámetros de interés.

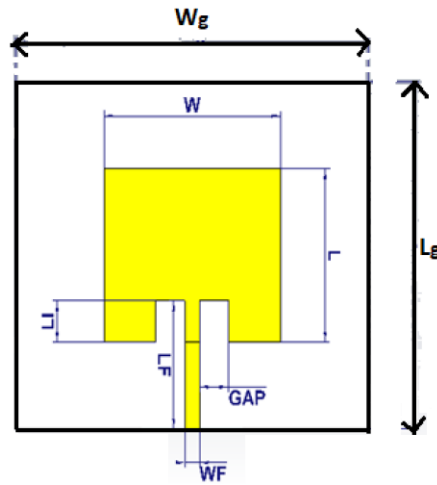


Figura 3.5: Geometría antena parche rectangular. [44]

Cabe señalar, que para el caso del gap, se realizó un barrido paramétrico de 0,5 a 0,9 mm, encontrando que para el diseño en particular, los mejores resultados estaban cuando este era igual a 0,7 mm. Lo cual permite evidenciar como el gap y por ende el ancho de la línea de transmisión, tienen una relación directamente proporcional a la frecuencia de resonancia ya que, al aumentar dicho parámetro, esta iba aumentando hasta lograr la frecuencia deseada de 28 GHz, además, cabe resaltar que lo aquí reportado no se involucra algún tipo de algoritmo de optimización, por lo que se infiere que el proceso de diseño y formulación matemática fue siguiendo un método convencional.

### 3.3. Diseño automatizado de dipolos

En [45], se presenta el diseño y optimización de una antena Bow-Tie para aplicaciones RFID en la banda de 2,45 GHz. Allí se usan 4 técnicas de optimización que son: Algoritmos Genéticos (GA), Enjambre de partículas (PSO), algoritmo de Nelder-Mead (NM), un híbrido entre PSO y NM y uno entre GA y NM, en busca de hacer una comparación en cuanto a las pérdidas de retorno  $|S_{11}|$  obtenidas. La geometría básica de la antena propuesta se muestra en la Figura 3.6. La antena está diseñada sobre una sola capa de sustrato dieléctrico *FR4* que tiene dimensiones de 58,259 x 37,852 mm, esta es simétrica con respecto al eje "Y" y cuya estructura principal es una ranura en forma de triángulo y una línea de alimentación de guía de onda coplanar (CPW).

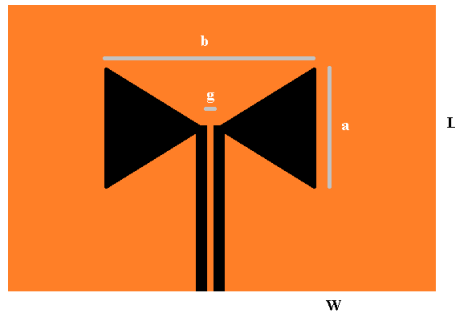


Figura 3.6: Bow-tie propuesto. [45]

Los algoritmos son implementados haciendo el uso de las herramientas internas de CST, por lo cual no se emplean elementos asociados a conexión con agentes externos, adicionalmente cabe rescatar que los métodos híbridos son los que presentaron mejores resultados para la geometría aquí reportada.

En [46], se presenta el estudio y diseño de una antena de banda ancha, operando en frecuencias de 120 a 210 MHz. La antena propuesta es de tipo Bow-tie, en donde se realizan tres modificaciones diferentes a partir de la estructura inicial de la Figura 3.7. La estructura inicial alcanza una ganancia alrededor de 5 dB, posteriormente se agrega un reflector con el fin de conseguir anchos de haz más estrechos y un mayor aumento de ganancia, y finalmente, para aumentar aún más la ganancia y el ancho del haz en el plano azimutal, agregan algunos elementos pasivos como stub  $\lambda/4$ . Los resultados simulados muestran que el ancho de banda de impedancia de 10 dB varía de 125 a 210 MHz (ancho de banda de más del 40%), con la relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR) inferior a 1,5 y se obtiene un buen patrón de radiación con una ganancia de 11,5 dBi. Cabe señalar en este trabajo se recurrió a realizar un análisis paramétrico en cuanto al radio de los brazos de cada una de las estructuras propuestas, para encontrar el valor donde se presentan las mejores características reportadas.

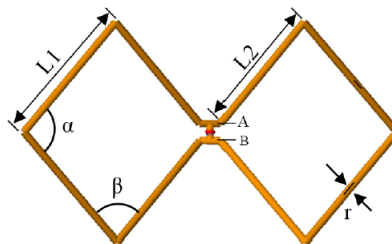


Figura 3.7: Propuesta inicial de antena. [46]

En [47], se presentan tres topologías de antena Bow-tie, que son: la Tradicional (TBT), la auto-complementada (SCBT) y la fractal auto-complementada (FSCBT). Donde se busca solucionar el problema de ancho de banda limitado que presenta esta antena en su configuración tradicional, y que al ser antenas que requieren alimentación a través de una línea de transmisión

balanceada de  $300\Omega$ , requieren acopladores a  $50\Omega$ , los cuales se traducen en un problema de diseño dada su complejidad. Cabe señalar, que las antenas se elaboraron usando el sustrato FR4 con un espesor de 1,6 mm, permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) = 4,3, y tangente de pérdidas de 0,025. En la Figura 3.8, se muestra la configuración más compleja lograda por el autor, la cual implica el paso por dos etapas previas de diseño y ajuste de parámetros mediante análisis paramétricos, y técnicas de mejora de características de diversas fuentes para lograr los resultados deseados.

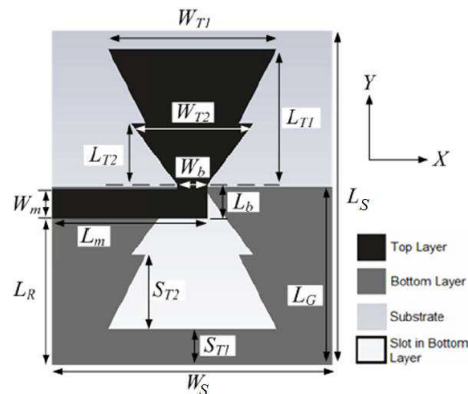


Figura 3.8: Geometría para antena Bow-tie auto-complementada FSCBT. [47]

### 3.4. Diseño automatizado de estructuras metamaterial

En [48], se aborda el uso del Resonador de Anillo Dividido (SRR) como carga periódica sobre las placas dieléctricas colocadas en las paredes laterales de una guía de onda rectangular. Este tipo de carga crea un modo inusual en la banda de paso por debajo de la frecuencia de corte de la guía de onda. Utilizando un algoritmo externo de optimización de colonias de hormigas (ACO), se optimizan las dimensiones de la celda unitaria para obtener la banda de paso en la frecuencia más baja. La motivación de hacerlo es la miniaturización y conseguir una amplia separación de banda respecto a la banda pasante. La optimización se realizó a partir de los diagramas de dispersión.

El algoritmo se implementó en MATLAB y con ayuda de CST se evaluó que tan buenas son las soluciones. Esto significa que es un trabajo lento, y por ello, utilizaron un número moderado de hormigas y de iteraciones. Hecho que proporciona un tiempo computacional menor al de otros algoritmos de búsqueda global (por ejemplo, la genética), en los que el número de individuos debe ser mucho mayor para conseguir buenos resultados. Para decidir el movimiento de cada hormiga, el algoritmo tiene que calcular el diagrama de dispersión de todos los nodos vecinos. A manera de conclusión, se logró optimizar el filtro pasabanda deseado por dos métodos de cómputo diferentes demostrando la versatilidad de la propuesta aquí mencionada.

En [49], se presenta el desarrollo de un algoritmo basado en RNA (Las redes neuronales artificiales), que son una de las soluciones más populares para la optimización y la predicción. Y

que fueron de gran ayuda para el diseño de un resonador circular de anillo dividido para aplicaciones inalámbricas. Ya que se ha comprobado que la frecuencia de resonancia del resonador de anillo dividido depende de las dimensiones físicas de la estructura dividida, como el ancho, la separación y el radio. Las mejores combinaciones posibles de todos estos parámetros físicos proporcionan la frecuencia de resonancia adecuada sobre la que se puede obtener la propiedad metamaterial de la estructura. En este caso, se utiliza una RNA de tipo Perceptrón Multicapa (MLP), el cual consiste en una red de múltiples capas, de tal manera que tenga capacidad para resolver problemas que no son linealmente separables. La optimización se realiza entorno de la mejor combinación posible de dimensiones físicas para determinar el comportamiento deseado de resonancia del SRR.

Finalmente se concluye que el comportamiento de resonancia de la antena depende estrictamente de la dimensión del SRR. Por lo tanto, la selección cuidadosa de la dimensión es esencial. Adicionalmente varias de las dimensiones similares proporcionan varios conjuntos de comportamiento idénticos, en donde la RNA con aprendizaje previo proporciona la mejor combinación de dimensiones con la que se obtiene un comportamiento de resonancia y permeabilidad negativa casi ideal. Esto confirma el papel de la RNA como herramienta de optimización.

En [50], se presenta el diseño de una guía de onda coplanar (CPW) cargada con resonadores de anillo dividido (SRR), para obtener las características de la banda de parada para aplicaciones de filtrado. También se propone una formulación teórica para estimar la frecuencia de resonancia del resonador SRR y por último verifican experimentalmente la teoría propuesta y logran realizar comparaciones de los datos calculados con los resultados obtenidos en la simulación.

Una de las mayores ventajas de utilizar un SRR para este tipo de aplicaciones, es que el tamaño de estas estructuras es mucho menor que la longitud de onda del espacio libre en la resonancia. En la Figura 3.9 se muestra el diagrama esquemático de un SRR y su carga en una guía de onda coplanar. Cuando se aplica un campo magnético externo a lo largo del eje  $z$ , aparece una fuerza electromotriz alrededor del SRR y acopla los dos anillos metálicos con la corriente inducida, que pasa de un anillo al otro a través de una capacitancia distribuida que se forma debido a la separación entre los anillos, y una vez estos se colocan estratégicamente en una guía de onda coplanar, sus resonancias se acoplan para mostrar características de banda de parada.

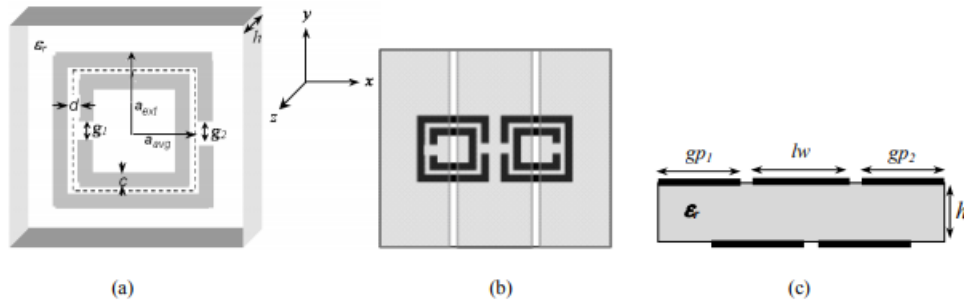


Figura 3.9: Esquema. (a) Vista del resonador. (b) SRR cuadrado colocado simétricamente en la parte posterior de la guía de onda coplanar. (c) Vista en sección transversal del CPW respaldado por el SRR. [50]

Finalmente lograron concluir que el reducido tamaño de la estructura, aumenta su utilidad en aplicación en bandas de frecuencias bajas en microondas. También que la formulación simplificada propuesta logró la estimación de la frecuencia de resonancia del SRR empleado y se verificó su estrecha correspondencia con la simulación y las mediciones.

# Capítulo IV

## Metodología

En este capítulo se tratan todas las operaciones empleadas para los procesos de creación de comunicación entre programas, construcción de geometrías, definición de materiales y componentes requeridos para la simulación, así como todo lo referente a exportar datos de interés. En la Figura 4.1, se presenta el diagrama de bloques que resume la metodología tratada en este proyecto.

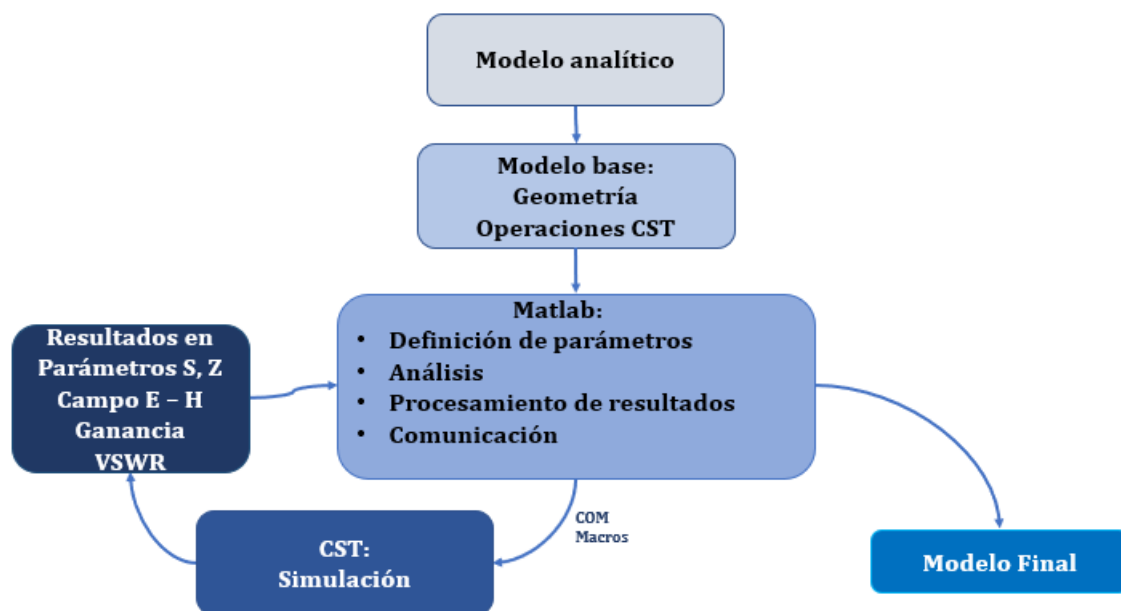


Figura 4.1: Diagrama de bloques de la metodología del proyecto.

Adicionalmente, en la Tabla 4.1, se presentan algunas de las líneas de código más empleadas en el transcurso de este capítulo.

Tabla 4.1: Principales líneas de código.

#	Objeto	Descripción
1	<code>cst=actxserver('CSTStudio.application');</code>	Crea un objeto de tipo actxserver en el cual se dice que CST sera el servidor y por ende Matlab el cliente
2	<code>mws=invoke(cst,'NewMWS')</code>	Abre una nueva ventana de CST y permite heredar todas las características de los objetos asociados a este
3	<code>Units = invoke(mws,'Units')</code>	Permite la creación del objeto para modificar unidades
4	<code>invoke(Units,'Parametro','Unidad')</code>	Configura las unidades para la frecuencia. Se hace de manera análoga para las demás
5	<code>release(Objeto)</code>	Permite soltar diversos tipos de objetos, se debe usar para todas las operaciones, como por ejemplo: Units, Brick, Background, etc.
6	<code>Solver = invoke(mws,'Solver')</code>	Crea el objeto para modificar la frecuencia de trabajo
7	<code>invoke(Solver,'FrequencyRange',fmin,fmax)</code>	Configura la frecuencia de trabajo mediante dos limites
8	<code>Background=invoke(mws,'Background')</code>	Crea el objeto para modificar el material de fondo
9	<code>material = invoke(mws,'material')</code>	Crea el objeto para ingresar posteriormente las propiedades de los materiales
10	<code>invoke(material,'Reset')</code>	Permite inicializar objetos en caso de un previo uso
11	<code>mws.invoke('saveas','project1.cst', 'false')</code>	Permite guardar el proyecto con un nombre deseado
12	<code>PostProcess1D=invoke(mws,'PostProcess1D')</code>	Activa visualización de resultados en CST
13	<code>invoke(PostProcess1D,'ActivateOperation','vswr','true')</code>	Activa cálculo de VSWR
14	<code>invoke(PostProcess1D,'ActivateOperation','yz-matrices','true')</code>	Activa cálculo de matrices Y y Z
15	<code>SelectTreeItem=invoke(mws,'SelectTreeItem','1D Results\$S - Parameters\$\$1,1</code>	Selecciona el resultado a extraer, del arbol de resultados disponibles



## 4.1. Creación de la comunicación

Para poder establecer comunicación entre Matlab y el software electromagnético, es necesario crear un objeto de tipo “*actxserver*”, el cual crea un servidor de automatización *COM* y devuelve un objeto del mismo tipo para su interfaz. Este proceso se hace mediante el uso del ítem 1 de la Tabla 4.1. Aquí se deja claro que CST es el servidor y Matlab el cliente.

Por otro lado, se debe crear un objeto que permita hacer uso de los elementos internos de CST desde Matlab, de tal forma que este los identifique, dicha operación se hace empleando el ítem 2 de la Tabla 4.1.

## 4.2. Definición de Unidades

Para definir las unidades con las que va a trabajar el software electromagnético, se debe crear un objeto que permita recibir los parámetros correspondientes, haciendo uso del ítem 3 de la Tabla 4.1, y de esta forma, pasar los parámetros asociados a elementos como geometría, frecuencia, tiempo, etc. Después, en el ítem 4 de la misma tabla, se pueden modificar las unidades, teniendo en cuenta parámetros como: “Geometry”, “Frequency”, “Time”, y su unidad correspondiente. Cabe señalar, que si no se realiza ninguna modificación de unidades, el programa toma las que tiene por defecto, además, para finalizar cualquier operación de modificación de propiedades de un objeto, como se hace en este caso, se debe usar el ítem 5 de la tabla en cuestión, y la palabra “Objeto” debe ser cambiada por el nombre del objeto tratado.

## 4.3. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno, o Boundaries, definen el entorno de radiación del modelo. Existen cuatro configuraciones básicas las cuales son:

- Pared eléctrica: Representa un conductor eléctrico perfecto, en donde todos los campos eléctricos tangenciales y flujos magnéticos normales, se hacen iguales a 0.
- Pared magnética: Representa un conductor magnético perfecto, en donde todos los campos magnéticos tangenciales y flujos eléctricos normales, se hacen iguales a 0.
- De tipo abierto: Representa un límite abierto, el cual extiende la geometría en contacto virtualmente hasta el infinito, mediante el uso de un límite de capa perfectamente acoplada. Las ondas pueden traspasar este límite con reflejos mínimos.
- De tipo abierto con espacio adicional: Representa un límite abierto al igual que el anterior, pero esta vez agrega un espacio extra con el fin de permitir cálculos de campo lejano.

Para la creación de las condiciones de contorno, se debe crear un objeto que permita recibir las características en CST, a continuación se debe definir el tipo de cada uno de ellos para el

valor mínimo (Xmin) y máximo (Xmax) del eje X,Y y Z, de manera que queden las seis caras de una caja de condiciones de contorno definida. Los valores que puede tomar este campo son: “Expanded open”, “Open”, “Electric”, “Magnetic”. A continuación, se presenta el procedimiento para la creación de la condición de contorno para el valor mínimo del eje Z, en donde los cinco ejes restantes se crean de manera análoga.

```
1 Boundary = invoke(mws, 'Boundary');
2 invoke(Boundary, 'Zmin', 'expanded open');
3 release(Boundary); %Objeto para finalizar la operacion
```

En la Figura 4.2, se muestra un ejemplo de una celda meta-material, en la cual se muestran las condiciones de contorno: de color morado se muestra la condición ‘Expanded Open’, en verde la condición ‘Electric’ y finalmente, en azul la condición ‘Magnetic’.

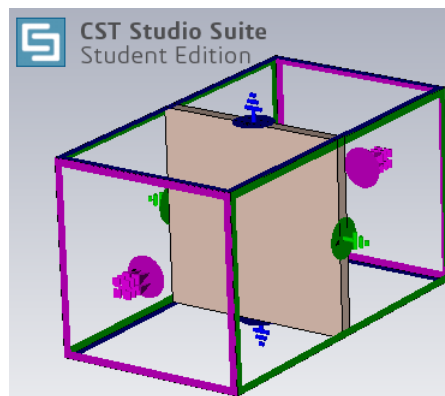


Figura 4.2: Condiciones de contorno.

### 4.3.1. Material de fondo

El material de fondo, o Background material, es el que se encuentra en el espacio fuera del área del modelo estructural creado por el usuario, normalmente suelen utilizarse materiales tales como: PEC (conductor ideal), Normal (aire o vacío), Anisotropic (anisotrópico), Lossy Metal (conductor con pérdidas). En el código mostrado a continuación se observan las características requeridas para la construcción de esta operación, las cuales se hacen de manera análoga a la creación de las condiciones de contorno, allí se muestra la adición de un espacio extra para el valor mínimo del eje Y, teniendo en cuenta las condiciones de un material de tipo normal, que para este caso es aire.

```
1 Background = invoke(mws, 'Background'); %Objeto de la operacion
2 invoke(Background, 'Type', 'Normal'); % Tipo de material
3 invoke(Background, 'Epsilon', '1.0');
4 invoke(Background, 'Mu', '1.0');
5 invoke(Background, 'YminSpace', 1000); %Espacio adicional de 1000 en el valor minimo de Y
6 Release(Background);
```

## 4.4. Materiales

A la hora de definir los materiales, es importante conocer ciertos parámetros como lo son: constante dieléctrica, tangente de pérdidas, tipo de material, etc. A continuación, se muestra cómo se pueden definir las propiedades más relevantes de algunos materiales, en donde es posible incorporar diversas características más específicas que se pueden requerir en otro tipo de simulaciones, también se presenta la definición completa mediante líneas de código que acepta Matlab, teniendo como materiales comúnmente empleados: Copper Annealed Lossy (Cobre con pérdidas), FR4 lossy (FR4 con pérdidas) y Taconic RF-35A. Ahora se muestra la definición de dichos materiales, además se puede crear distintos tipos de materiales si se cuentan con sus características correspondientes.

```
1 % Material Cobre
2 material = invoke(mws, 'material'); %Objeto de la operacion
3 invoke(material, 'Reset'); %Inicializacion del objeto
4 invoke(material, 'Name', 'Copper (annealed)'); %Nombre
5 invoke(material, 'Epsilon', '1');
6 invoke(material, 'FrqType', 'all'); %Condicion por defecto
7 invoke(material, 'Type', 'Lossy metal'); %Tipo de material
8 invoke(material, 'SetMaterialUnit', 'GHz', 'mm'); %Unidades segun se requiera
9 invoke(material, 'Mue', '1.0');
10 invoke(material, 'Rho', '8930.0');
11 invoke(material, 'Colour', '1', '1', '0');
12 invoke(material, 'Transparency', '0'); %Transparencia del material
13 invoke(material, 'Create'); %Ejecucion de la operacion
14 release(material);
```

Cabe señalar, que las opciones que puede tomar el campo “TipoMaterial” son: “PEC”, “Normal”, “Anisotropic”, “Lossy Metal”, “Corrugated wall” y “Ohmic sheet”, adicionalmente se tienen opciones como color y transparencia, las cuales resultan de utilidad para identificar materiales creados por el usuario, con las características electromagnéticas de su interés.

## 4.5. Operaciones geométricas

Las operaciones geométricas, son herramientas de modelado que nos permiten definir objetos, ejecutar operaciones entre ellos y de esta forma crear estructuras.

### 4.5.1. Brick

Como su nombre lo indica, un Brick es un ladrillo o cubo, que se utiliza generalmente para definir figuras rectangulares como puede ser un plano de tierra, sustrato, o parche. Para poder ejecutar esta operación, se requiere ingresar las dimensiones en X, Y y Z, además, definir el material y un nombre de identificación para hacer posibles operaciones futuras. En el código mostrado a continuación, se observan los procedimientos generales para la creación de un Brick, en donde se debe seguir la lógica de lo expuesto en la línea 6, para definir las dimensiones correspondientes al rango de Y y Z respectivamente.

```

1 brick = invoke(mws, 'Brick'); %Objeto de la operacion
2 invoke(brick, 'Reset'); %Inicializacion del objeto
3 invoke(brick, 'Name', 'Nombre_objeto'); %Nombre
4 invoke(brick, 'component', 'component1'); %Componente al que pertenece
5 invoke(brick, 'Material', 'Nombre_material'); %Tipo de material
6 invoke(brick, 'Xrange', 0, 10000); %rango en X
7 invoke(brick, 'Create'); %Ejecucion de la operacion
8 release(brick);

```

En la Figura 4.3, se muestra el resultado de la operación ejecutada, en la cual se evidencia la creación de un Brick de las características mencionadas anteriormente.

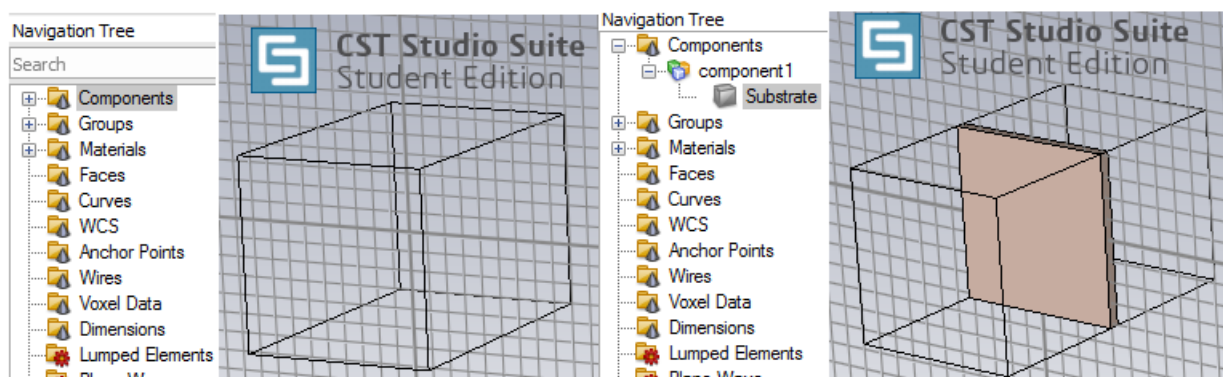


Figura 4.3: Creación de Brick.

## 4.5.2. Cylinder

Esta operación geométrica, requiere definir el radio, el material del cilindro y las coordenadas de ubicación de este. De igual forma, un nombre de identificación para las posibles operaciones que se deseen realizar. Para la ejecución de esta operación, y de manera general, se debe tener en cuenta el plano en el cual se crea la figura y la dirección en la que esta hace su proyección tridimensional. En el siguiente ejemplo se presenta un cilindro el cual se orienta en el plano  $XZ$ , y se proyecta sobre el eje  $Y$ , dicho cilindro tiene un espesor que va de  $-E_c$  a  $E_c$  y con centro en la coordenadas  $(x, z) = (0, D_c)$ . Cabe señalar, que si se quiere proyectar la geometría en otro plano como por ejemplo el  $Z$ , debe tenerse en cuenta que la orientación y centro del mismo estarán en torno a las coordenadas  $(x, y)$ , y de manera análoga, si se quiere hacer la proyección sobre el eje  $X$ .

```

1 cylinder = invoke(mws, 'Cylinder'); % Objeto asociado a la operacion
2 invoke(cylinder, 'Reset'); %Inicializacion del objeto
3 invoke(cylinder, 'Name', 'Nombre del objeto'); %Nombre
4 invoke(cylinder, 'component', 'component1'); %Componente al que pertenece
5 invoke(cylinder, 'material', 'Copper (annealed)'); %Tipo de material
6 invoke(cylinder, 'OuterRadius', radio_Exterior);
7 invoke(cylinder, 'InnerRadius', radio_Interior);
8 invoke(cylinder, 'Axis', 'Y'); %Eje de proyeccion
9 invoke(cylinder, 'Yrange', -Ec, Ec); %Rango de proyeccion
10 invoke(cylinder, 'Xcenter', '0'); %Coordenada de centro en x
11 invoke(cylinder, 'Zcenter', Dc); %Coordenada de centro en z
12 invoke(cylinder, 'Create'); %Ejecucion de la operacion

```

```
13 release (cylinder);
```

En la Figura 4.4, se observa el resultado de la operación ejecutada, con la cual se construye un cilindro hueco (también se puede construir sólido), con las especificaciones mencionadas anteriormente.

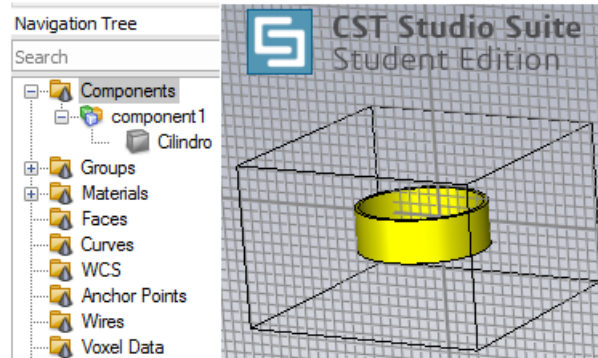


Figura 4.4: Creación de cilindro.

### 4.5.3. Extrude

Extrude es una operación, en donde se puede crear un polígono de  $n$  vértices y generar una superficie volumétrica de un espesor deseado. Esta operación se hace útil para los casos en que la geometría sea diferente a figuras básicas como círculos, o rectángulos. Para poder usarla, se requiere la ubicación de cada uno de los vértices del polígono a crear, los comandos *Uvector* y *Vvector* para saber el plano de orientación, el material de construcción, las coordenadas de ubicación, y el valor del grosor del objeto. Esta operación se basa en la creación de líneas desde los vértices (unión de puntos) seleccionados mediante el comando *LineTo*. En el siguiente ejemplo se creará un triángulo con vértices en  $(x, y) = (4, 0)$ ,  $(2, 3)$  y  $(0, 0)$ , proyección a lo largo del eje  $Z$ , inicio en  $Z$  de  $Ec + h$  y un espesor o altura de  $Ec$ .

```
1 Extrude = invoke(mws, 'Extrude'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(Extrude, 'Reset'); %Inicializacion del objeto
3 invoke(Extrude, 'Name', 'Nombre del objeto');
4 invoke(Extrude, 'component', 'component1');
5 invoke(Extrude, 'Material', 'Copper (annealed)'); %Tipo de material
6 invoke(Extrude, 'Mode', 'Pointlist'); %Modo general para la creacion de este objeto
7 invoke(Extrude, 'Height', 'Ec'); %Grosor de la figura
8 invoke(Extrude, 'Twist', '0.0'); %Efecto de torsion o deformacion
9 invoke(Extrude, 'Taper', '0.0'); %Efecto de inclinacion en las aristas
10 invoke(Extrude, 'Origin', '0.0', '0.0', 'Ec+h'); %Posicion de inicio en Z
11 invoke(Extrude, 'Uvector', '1.0', '0.0', '0.0'); %Abre en x
12 invoke(Extrude, 'Vvector', '0.0', '1.0', '0.0'); %Abre en y
13 invoke(Extrude, 'Point', '0', '0'); %Vertice de inicio
14 invoke(Extrude, 'LineTo', '4000', '0');
15 invoke(Extrude, 'LineTo', '2000', '3000');
16 invoke(Extrude, 'LineTo', '0', '0');
17 invoke(Extrude, 'Create'); %Ejecucion de la operacion
18 release(Extrude);
```

En la Figura 4.5, se presenta el resultado de la operación ejecutada, con la cual se construye un triángulo, a partir de las consideraciones mencionadas anteriormente.

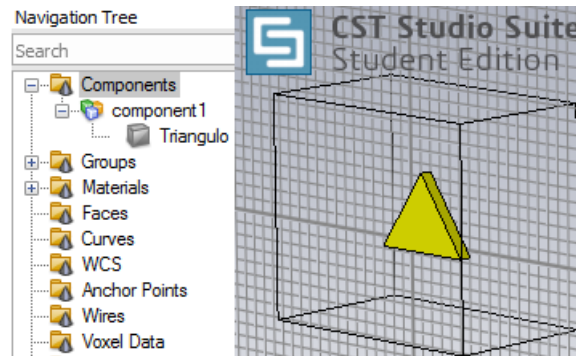


Figura 4.5: Creación de extrude.

#### 4.5.4. Transform

Las operaciones de tipo transform, hacen referencia a como su nombre lo dice, modificar características como orientación, posición, etc. Dichas operaciones comparten ciertos parámetros, razón por la que a continuación, se presentan la estructura general para las tres operaciones de este tipo, las cuales serán explicadas posteriormente.

```

1 Objeto=invoke(mws, 'Transform');
2 invoke(Objeto, 'Reset'); %Inicializacion del objeto
3 invoke(Rotar, 'Name', 'component1:nombre objeto a modificar');
4 %Aquí se inserta lo correspondiente a las operaciones tratadas mas adelante
5 invoke(Objeto, 'MultipleObjects', 'True'); %True, copia. False, solo original
6 invoke(Objeto, 'GroupObjects', 'False'); %True, agrupa(original y copia rotada)
7 invoke(Objeto, 'Repetitions', '3'); %Numero de veces a realizar la copia
8 invoke(Objeto, 'MultipleSelection', 'False'); %Opcion por defecto
9 invoke(Objeto, 'Transform', 'Shape', 'Rotate'); %Ejecucion de la operacion
10 release(Objeto);

```

Una vez se tiene el procedimiento general, se presenta la operación de rotación, la cual tiene las siguientes líneas adicionales, estas a su vez se insertan en el lugar indicado anteriormente, y son las que caracterizan esta nueva operación.

```

1 %invoke(Rotar, 'Origin', 'CommonCenter'); %usa el centro de la figura para rotar
2 invoke(Rotar, 'Origin', 'Free'); %Origen de rotacion libre
3 invoke(Rotar, 'Center', '0', '0', '0'); %Determina el centro de rotacion
4 invoke(Rotar, 'Angle', '0', '0', '90'); %Rotacion de 90 grados en X, Y o Z

```

En la Figura 4.6, se tiene el resultado de la operación tratada, con la cual se rota 3 veces, una especie de flecha construida previamente, en donde cabe aclarar que para el ejemplo los 4 elementos se posicionan cada 90 grados y no están agrupados entre ellos.

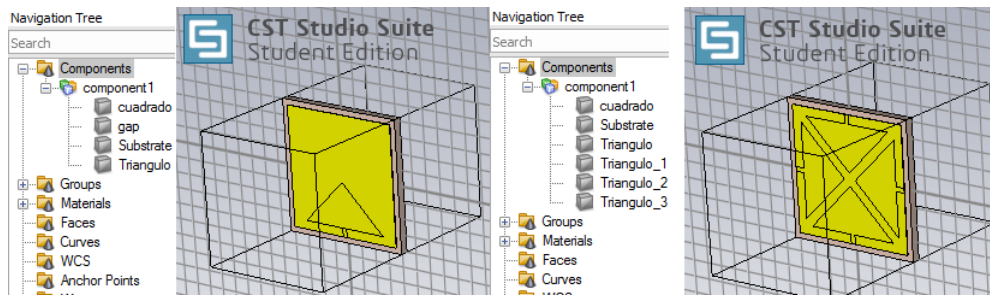


Figura 4.6: Operación rotar objetos.

Por otro lado, se muestra la operación trasladar, la cual permite que un objeto pueda cambiar su ubicación espacial, mediante un vector de desplazamiento (X,Y,Z). Así como en la operación anterior, se puede conservar el objeto original y hacer copias modificadas de la forma expuesta anteriormente. Las líneas para agregar al procedimiento general en este caso, se presentan a continuación.

```

1 %invoke(Trasladar,'Name','component1:solid1'); %Nombre cuando es una forma
2 invoke(Trasladar,'Name','curve1:wire1_1'); %Nombre cuando es una curva
3 invoke(Trasladar,'Vector',posicion,'0','0'); %Vector desplazamiento

```

En la Figura 4.7, se puede observar el resultado de la operación trasladar, con la cual se modificó la posición de un elemento previamente creado con un vector de desplazamiento, allí se observa el antes y después para poder ver el cambio deseado.

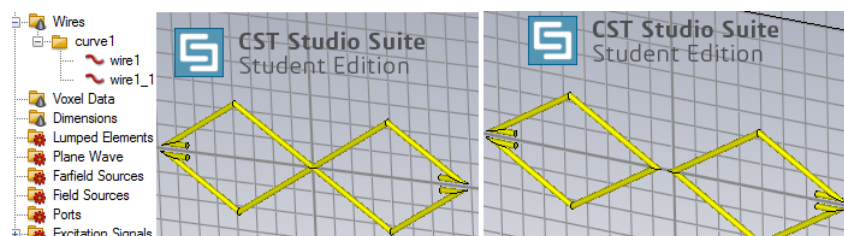


Figura 4.7: Trasladar objetos.

De manera similar a la operación rotar, existe la operación Mirror (de reflejo), con respecto a un eje determinado, para lo cual se agregan las líneas que se tienen a continuación.

```

1 % invoke(Rotar,'Origin','CommonCenter'); %usa el centro de la figura para rotar
2 invoke(mirror,'Origin','Free'); %Origen de rotacion
3 invoke(mirror,'Center','0','0','0'); %Determina el centro de rotacion
4 invoke(mirror,'PlaneNormal','-1','0','0'); %Plano de reflejo

```

En la Figura 4.8, se presenta el resultado de reflejar el objeto seleccionado con respecto al eje X, aquí se realiza una copia del objeto original y es por eso que aparecen dos objetos con exactamente la misma forma, pero con una transformación aplicada en uno de ellos.

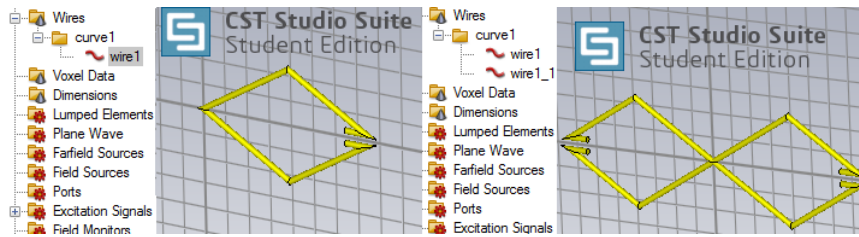


Figura 4.8: Reflejar objetos.

#### 4.5.5. Add y Subtract

Las operaciones Add y Subtract, se usan como su nombre lo dice, para combinar y eliminar partes entre dos componentes previamente seleccionados. Para utilizar dichos comandos, es vital reconocer los nombres de los componentes, debido a que, una vez realizada la operación, la geometría se unifica bajo el primer nombre seleccionado. A continuación, se tienen dos ejemplos para la acción Add y Subtract, en donde para el primer caso, el objeto resultante se identifica con el nombre *Triangulo*, y el segundo con el nombre *Triangulo\_1*.

```
1 Solid = invoke(mws, 'Solid'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(Solid, 'Add', 'component1:Triangulo', 'component1:Triangulo_1');
```

En la Figura 4.9, se se puede observar el resultado de la operación Add, en la cual se puede agrupar de a dos objetos seleccionados, cabe señalar que las operaciones de trasladar, rotar y reflejar, incorporan dentro de su estructura esta operación mediante la opción 'GroupObject'.

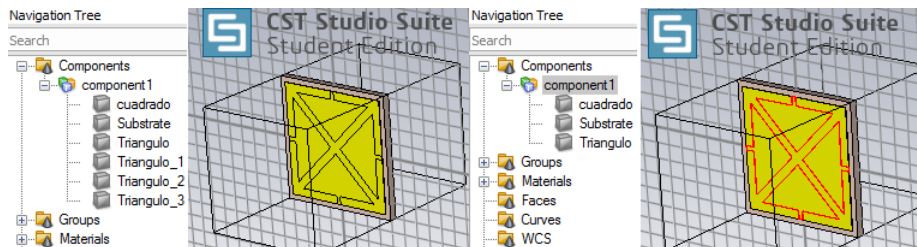


Figura 4.9: Operación Add: agrupar objetos.

En cuanto a la operación Subtract, se presenta el siguiente ejemplo, mediante el cual se restan dos objetos distintos, los cuales geoméricamente se encuentran en la misma capa. En la Figura 4.10, se muestra el resultado de ejecutarla.

```
1 Solid = invoke(mws, 'Solid'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(Solid, 'Subtract', 'component1:cuadrado', 'component1:Triangulo'); %Ejecucion
```



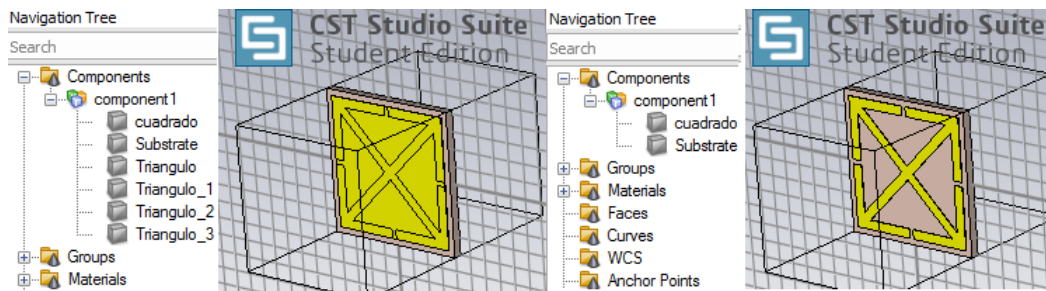


Figura 4.10: Operación Substract.

#### 4.5.6. Pick

Los Pick, como su nombre lo indica son selecciones ya sea de un punto específico o de una cara de la geometría en cuestión, este comando es utilizado frecuentemente a la hora de seleccionar el punto o la cara, donde se requiere poner un puerto, ejecutar algún tipo de operación en particular, etc. Existen diferentes tipos de Pick, aquí trataremos los más importantes:

- *PickFaceFromId*: Permite seleccionar una cara al tener su id, este puede ser asignado directamente por el usuario y pasado a la función con el mismo nombre. El siguiente es un ejemplo de uso de dicha operación, aquí se proporciona el nombre de un objeto previamente creado, se le asigna un Id y se le pasan esos parámetros al programa, mediante la última línea de código del ejemplo.

```
1 Pick = invoke(mws, 'Pick'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(Pick, 'PickFaceFromId', 'component1:Subtrato', 3);
```

- *PickMidPointFromId*: Así como en la operación anterior, esta permite realizar selecciones por medio de un id, pero esta vez la selección corresponde al punto medio de una geometría, y es el programa quien automáticamente detecta si es más apropiado seleccionar el punto medio de una cara, o de una arista. El siguiente ejemplo muestra la aplicación de la presente operación, siguiendo la lógica expuesta anteriormente.

```
1 Pick = invoke(mws, 'Pick'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(Pick, 'PickMidpointFromId', 'component1:Subtrato', id);
```

Cabe señalar, que las operaciones que requieren un id de objeto, resultan complicarse conforme aumentan las caras del mismo, ya que en ocasiones el programa va modificando estos identificadores de manera automática, es por esto, que se recomienda que para tareas complejas, se haga uso de otras herramientas para cumplir este fin, las cuales se detallan a continuación.

- *PickFaceFromPoint*: En esta operación se selecciona la cara de un objeto determinado, teniendo en cuenta unas coordenadas en (x,y,z) proporcionadas por el usuario. Para poder

ejecutarla, lo único que se necesita es el objeto sobre el cual se hará la selección y las coordenadas ya mencionadas. En la Figura 4.11 se puede observar el resultado de la operación.

```
1 Pick = invoke(mws, 'Pick'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(Pick, 'PickFaceFromPoint', 'component1:Nombre_elemento', 0, 0, H/2);
```

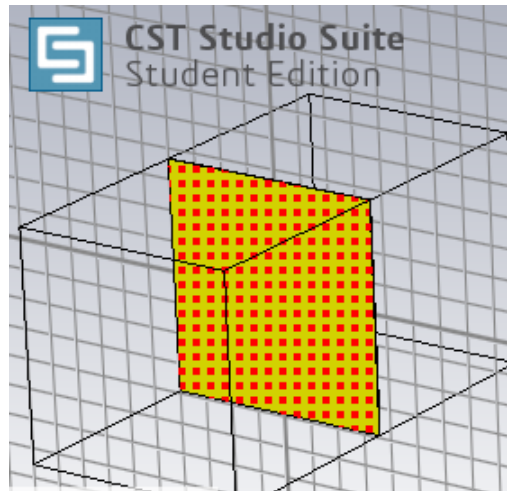


Figura 4.11: Selección de caras.

- *PickEdgeFromPoint*: En esta operación se selecciona un borde o arista de un objeto determinado, teniendo en cuenta unas coordenadas en (x,y,z) proporcionadas por el usuario. Para poder ejecutarla, se requieren las mismas condiciones de la operación anterior. En la Figura 4.12 se puede observar el resultado de la operación.

```
1 Pick = invoke(mws, 'Pick'); %Objeto asociado a la informacion
2 invoke(Pick, 'PickEdgeFromPoint', 'component1:Nombre_elemento', -W/2, -L/2, H/2)
```

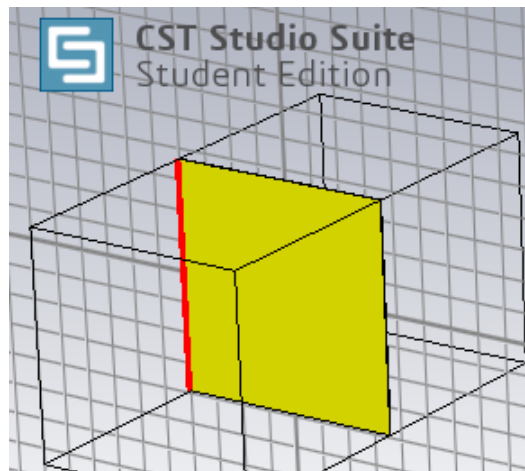


Figura 4.12: Selección de aristas.

- *PickPointFromCoordinates*: Esta operación, permite seleccionar un punto mediante la selección de coordenadas en un objeto determinado. Para poder ejecutarla, sencillamente se necesita pasar los valores de (x,y,z) mediante las siguientes líneas de código. En la Figura 4.13 se puede observar el resultado de la operación.

```

1 Pick = invoke(mws, 'Pick'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(Pick, 'PickPointFromCoordinates', -W/2, -L/2, H/2)

```

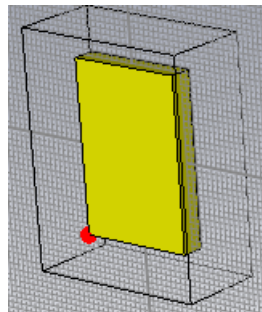


Figura 4.13: Selección de punto a partir de coordenadas.

### 4.5.7. Loft

La operación Loft, hace referencia a la unión de dos caras seleccionadas, mediante una proyección o tubería que conserva las características de los objetos a conectar. Para esta operación, se requiere haber seleccionado las caras para unir mediante una nueva cubierta. En la nueva geometría, se debe definir el tipo de material de la unión creada y la suavidad o paso del trazo. A continuación, se muestra el procedimiento general de dicha operación, el cual quedará bajo el nombre de *Union*.

```

1 Loft = invoke(mws, 'Loft'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(Loft, 'Reset'); %Inicializacion del objeto
3 invoke(Loft, 'Name', 'Union'); %nombre del objeto
4 invoke(Loft, 'component', 'component1'); % Componente que contiene el objeto
5 invoke(Loft, 'Material', 'Copper (annealed)');
6 invoke(Loft, 'Tangency', '0.0');
7 invoke(Loft, 'Minimizetwist', 'true');
8 invoke(Loft, 'CreateNew'); %Ejecucion de la operacion
9 release(Loft);

```

En la Figura 4.14, se observa cómo se debe seleccionar las caras para crear la unión entre ellas, y una vez configuradas las características necesarias, se ve como resultado una nueva geometría.

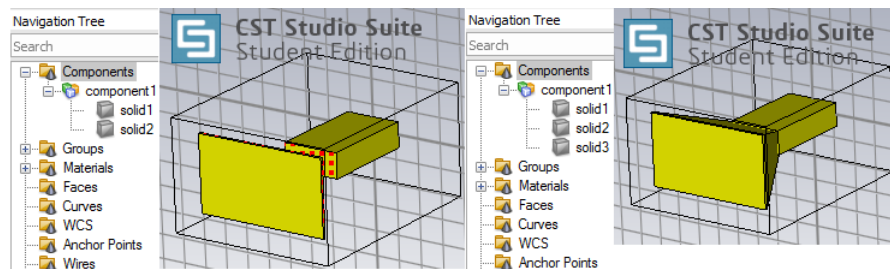


Figura 4.14: Operación Loft.

#### 4.5.8. Shell

Este comando se utiliza fundamentalmente cuando se desea que la geometría sea hueca, para ello se necesita haber seleccionado las dos caras con el comando PickFace, y posteriormente determinar el grosor del corte interior. Las siguientes líneas muestran la ejecución de esta operación.

```

1 Solid = invoke(mws, 'Solid'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(Solid, 'ShellAdvanced', component1, 'Inside', Espesor, 'True'); %Ejecucion

```

En la Figura 4.15, se observa cómo se deben seleccionar la cara inicial y final de donde se pretende aplicar esta herramienta, una vez configuradas las características se ve como resultado una figura hueca.

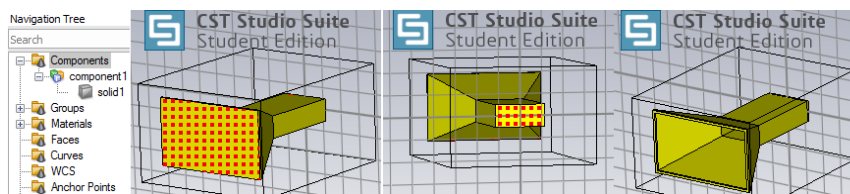


Figura 4.15: Demostración de la herramienta Shell.

### 4.5.9. Polygon

Polygon es una herramienta que permite, como su nombre lo dice, crear polígonos abiertos y cerrados a partir de un punto inicial y múltiples líneas. Para la creación de una figura usando esta herramienta, se debe tener en cuenta que el resultado será sencillamente líneas unidas, las cuales se unen de manera automática en el orden de escritura. Por otro lado, los parámetros requeridos son dos nombres, el primero de la figura, y el segundo el de la curva que contiene dicho elemento, adicionalmente se requiere el punto de inicio, y las n líneas para la construcción deseada. Cabe señalar, que la diferencia principal entre esta operación y algunas como Brick y Extrude, radica en que aquí se enfoca en el contorno (cerrado o abierto), mientras que en las otras dos mencionadas, se enfocan en la proyección que se puede trabajar a partir de ese contorno (cerrado).

```
1 Polygon=invoke(mws, 'Polygon'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(Polygon, 'Reset'); %Inicializacion del objeto
3 invoke(Polygon, 'Name', 'polygon1'); %Nombre del objeto
4 invoke(Polygon, 'Curve', 'curve1'); %Nombre de la curva
5 invoke(Polygon, 'Point', x4, y4); %Punto inicial
6 %Secuencia de lineas a puntos, esta cantidad puede variar segun se desee
7 invoke(Polygon, 'LineTo', x3, y3);
8 invoke(Polygon, 'Create'); %Ejecucion de la operacion
9 release(Polygon);
```

En la Figura 4.16 se muestra el resultado obtenido de la operación ejecutada, para un polígono abierto de 7 vértices. En este caso la construcción comenzó de derecha a izquierda.

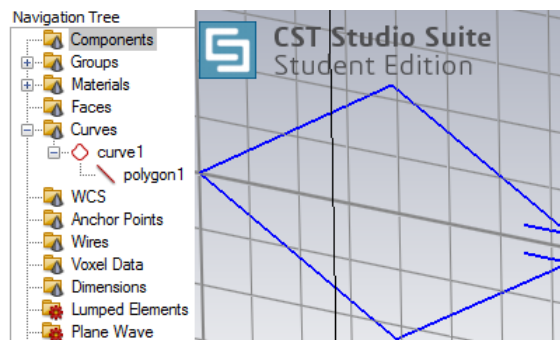


Figura 4.16: Creación de un polígono.

### 4.5.10. Wire

Esta herramienta brinda la posibilidad de convertir el contorno del polígono deseado por el diseñador, en un conductor cilíndrico o cable como su nombre lo indica. Entre las características fundamentales que requiere la herramienta, se encuentran: el radio, el material y el tipo de curva o polígono al que será aplicado. Cabe señalar, que para poder ejecutar la presente operación, debe haber sido creada previamente una curva o polígono.

```
1 Wire=invoke(mws, 'Wire'); %Objeto asociado a la operacion
```

```

2 invoke(Wire, 'Reset'); %Inicializacion del objeto
3 invoke(Wire, 'Name', 'wire1'); %Nombre con el que queda el objeto
4 invoke(Wire, 'Folder', 'curvel'); %Nombre de la carpeta que contendra el objeto
5 invoke(Wire, 'Radius', calibrecobre); %Radio del alambre
6 invoke(Wire, 'Type', 'CurveWire'); %Tipo de cable
7 invoke(Wire, 'Curve', 'curvel:polygon1'); %Seleccion curva previamente creada
8 invoke(Wire, 'Material', 'Copper (annealed)');
9 invoke(Wire, 'SolidWireModel', 'True'); %Selecion de material solido
10 invoke(Wire, 'Termination', 'Natural'); %'Rounded' opcion de terminado
11 invoke(Wire, 'AdvancedChainSelection', 'False');
12 invoke(Wire, 'Add'); %Ejecucion de la operacion
13 release(Wire);

```

En la Figura 4.17 se ve reflejado el resultado a partir del código ejecutado. Esta herramienta se puede realizar con cualquier tipo de polígono.

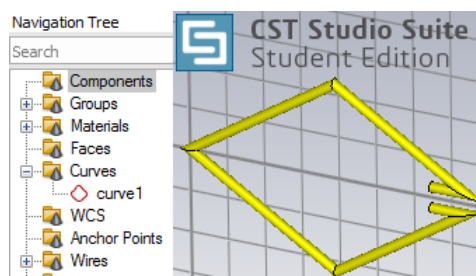


Figura 4.17: Creación del cable a partir de un polígono.

## 4.6. Puertos

La herramienta port cuenta con diversos tipos de puertos, para diferentes excitaciones dependientes de las estructuras a alimentar, dentro de los cuales se tienen dos en particular que permiten comprender el comportamiento general de los mismos. En primer lugar, se presenta el puerto *WaveguidePort*, o puerto de guía de onda, el cual simula una guía de ondas infinitamente larga conectada a la estructura, y es por eso que se aplica a estructuras como guías de onda, celdas metamaterial, etc. Para definir este puerto, se debe conocer las coordenadas de la posición donde se desea colocar, para el ejemplo mostrado a continuación, se crea sobre el plano  $XZ$ , dado que su orientación se encuentra sobre el valor mínimo del eje  $Y$ .

```

1 Port = invoke(mws, 'Port'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(Port, 'Reset'); %Inicializacion del objeto
3 invoke(Port, 'PortNumber', 'Numero_puerto');
4 invoke(Port, 'Label', ''); %Etiqueta, opcional
5 invoke(Port, 'NumberOfModes', '1');
6 invoke(Port, 'AdjustPolarization', 'False');
7 invoke(Port, 'PolarizationAngle', '0');
8 invoke(Port, 'ReferencePlaneDistance', '0');
9 invoke(Port, 'TextSize', '50');
10 invoke(Port, 'Coordinates', 'Full');
11 invoke(Port, 'Orientation', 'Ymin'); % para el plano XZ
12 invoke(Port, 'PortOnBound', 'True'); %se crea sobre los limites de los Boundaries
13 invoke(Port, 'ClipPickedPortToBound', 'False');
14 invoke(Port, 'Xrange', xmin, xmax); % lo mismo para Y y Z

```

```
15 invoke(Port, 'Create');
```

En la Figura 4.18 se evidencia la creación de dicho puerto, según las coordenadas y características requeridas por la geometría.

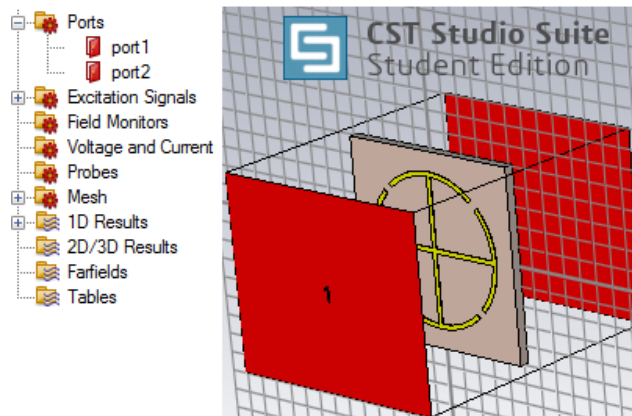


Figura 4.18: Creación del puerto.

Por otro lado, existe el puerto *Discreteport*, el cual presenta otra alternativa de alimentación de las estructuras, ya que deja ver una impedancia deseada entre dos puntos, permitiendo generar acople entre el elemento de diseño y el excitador. Este tipo de puerto es el que tradicionalmente se usa en algunas antenas como el dipolo. A continuación, se muestra la creación de dicho puerto.

```
1 DcPort = invoke(mws, 'DiscretePort'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(DcPort, 'Reset'); %Inicializacion del objeto
3 invoke(DcPort, 'PortNumber', 1); %Numero del puerto
4 invoke(DcPort, 'Type', 'SParameter'); %Tipo de parametros del puerto
5 invoke(DcPort, 'Impedance', '50'); %Impedancia del puerto
6 invoke(DcPort, 'VoltagePortImpedance', '0');
7 invoke(DcPort, 'Voltage', '1');
8 invoke(DcPort, 'Current', '1');
9 invoke(DcPort, 'SetP1', 'False', '25', '0', '-2'); %Coordenadas punto 1 del puerto
10 invoke(DcPort, 'SetP2', 'False', '25', '0', '2'); %Coordenadas punto 2 del puerto
11 invoke(DcPort, 'InvertDirection', 'False');
12 invoke(DcPort, 'LocalCoordinates', 'False');
13 invoke(DcPort, 'Monitor', 'True');
14 invoke(DcPort, 'Radius', '0'); %Radio del puerto, si se requiere
15 invoke(DcPort, 'Create'); %Ejecucion de la operacion
16 release(DcPort);
```

En la Figura 4.19, se muestra la creación del puerto discreto.

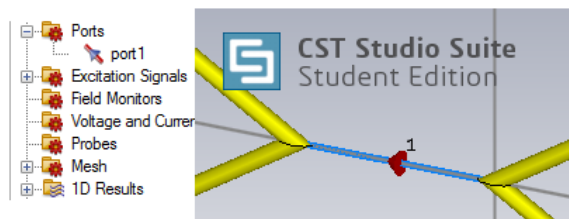


Figura 4.19: Creación de puerto discreto.

## 4.7. Solucionadores

Para los solucionadores o dominios de simulación, el software cuenta con seis opciones distintas, las cuales son: Time domain solver, Frequency domain solver, Eigenmode solver, Integral equation solver, Multilayer solver y Asymptotic solver. Los dos más usados son el del tiempo y la frecuencia, debido a que los demás se usan para simulaciones específicas como de circuitos impresos, análisis termodinámicos, entre otros. Los simuladores del dominio del tiempo y de la frecuencia, utilizan dos métodos diferentes para resolver el mismo problema. Ambos son originarios de la FIT -Técnica de Integración Finita, que trabaja sobre la formulación integral de las ecuaciones de Maxwell. Cabe señalar, que en este trabajo solo se emplean estos dos solucionadores, dado que son los que permiten realizar y obtener resultados de manera más acorde a las estructuras tratadas, teniendo en cuenta las limitaciones al hacer uso de la versión estudiantil de CST Studio.

### 4.7.1. Solucionador en el dominio de la Frecuencia

El solucionador en el dominio de la frecuencia utiliza el método de los elementos finitos (FEM) para resolver la ecuación de Maxwell. Los solucionadores en el dominio de la frecuencia son útiles para estructuras más pequeñas como celdas unitarias y metamaterial. A continuación, se presenta la configuración general para este dominio.

```

1 FDSolver = invoke(mws, 'FDSolver');
2 invoke(FDSolver, 'SetMethod', 'Tetrahedral', 'General purpose');
3 invoke(FDSolver, 'Stimulation', '1', 'All');
4 invoke(FDSolver, 'SweepMinimumSamples', '5');
5 invoke(FDSolver, 'ConsiderPortLossesTet', 'False');
6 invoke(FDSolver, 'Start'); %ini simulacion

```

### 4.7.2. Solucionador en el dominio del Tiempo

El solucionador del dominio del tiempo utiliza el método FDTD para resolver las ecuaciones de Maxwell. Se considera la herramienta fuerte del software electromagnético, y puede ser muy útil para simular estructuras grandes. En este simulador se encuentran dos opciones disponibles, ambas basadas en mallas hexaédricas. Estos solucionadores son notablemente eficientes para la



mayoría de las aplicaciones de alta frecuencia, como conectores, líneas de transmisión, filtros, antenas, etc, y pueden obtener el comportamiento completo de la frecuencia de banda ancha del dispositivo simulado a partir de una única ejecución de cálculo.

```

1 Mesh = invoke(mws, 'Mesh');
2 invoke(Mesh, 'SetCreator', 'High Frequency');
3 Solver = invoke(mws, 'Solver');
4 invoke(Solver, 'Method', 'Hexahedral');
5 invoke(Solver, 'CalculationType', 'TD-S');
6 invoke(Solver, 'StimulationPort', 'All');
7 invoke(Solver, 'StimulationMode', 'All');
8 invoke(Solver, 'SteadyStateLimit', -40);
9 invoke(Solver, 'MeshAdaption', 'False');
10 invoke(Solver, 'AutoNormImpedance', 'False');
11 invoke(Solver, 'NormingImpedance', '50');
12 invoke(Solver, 'CalculateModesOnly', 'False');
13 invoke(Solver, 'SParaSymmetry', 'False');
14 invoke(Solver, 'StoreTDResultsInCache', 'False');
15 invoke(Solver, 'FullDeembedding', 'False');
16 invoke(Solver, 'SuperimposePLWExcitation', 'False');
17 invoke(Solver, 'UseSensitivityAnalysis', 'False');
18 invoke(Solver, 'Start'); %ini simulacion

```

### 4.7.3. Frecuencia de trabajo

Para definir la frecuencia de trabajo, se deben tener en cuenta las unidades elegidas, también se debe seleccionar el valor mínimo y máximo de la misma. Este proceso se hace mediante la creación de dos variables  $f_{min}$  y  $f_{max}$ , las cuales son pasadas al programa como se ilustra en el ítem 6 y 7 de la Tabla 4.1.

## 4.8. Monitores

Los monitores son los que permiten realizar la configuración de visualizaciones especiales como: campo eléctrico, campo magnético, campo lejano, entre otros. A continuación, se presenta el ejemplo de cómo crear cualquier monitor, en donde se hace necesario cambiar el campo “FieldType”, bajo las opciones de, “Efield”, “Hfield”, “Powerflow”, “Current”, “Powerloss”, “Farfield”, según se requiera.

```

1 Monitor =invoke(mws, 'Monitor'); %Objeto asociado a la operacion
2 invoke(Monitor, 'Reset'); %Inicializacion de la operacion
3 invoke(Monitor, 'Name', 'Monitor');
4 invoke(Monitor, 'Domain', 'Frequency');
5 invoke(Monitor, 'FieldType', 'Farfield');
6 invoke(Monitor, 'Frequency', '10'); %Frecuencia a monitorear
7 invoke(Monitor, 'Create'); % Ejecucion de la operacion
8 release(Monitor);

```

De manera particular, para el monitor de campo lejano (Farfield), es posible configurar elementos como el ángulo de corte para graficar, variación de los ángulos theta y phi, sistema coordenado y paso de aumento en el barrido de los ángulos.

```

1 %Invocar:
2 FarfieldPlot = invoke(mws, 'FarfieldPlot'); %Objeto asociado a la operacion
3 invoke(FarfieldPlot, 'Plottype', 'Polar'); %Tipo de grafica visualizar
4 invoke(FarfieldPlot, 'Vary', 'angle1');
5 invoke(FarfieldPlot, 'Theta', '90'); %Valor de corte en theta
6 invoke(FarfieldPlot, 'Phi', '90'); %Valor de corte en Phi
7 invoke(FarfieldPlot, 'Step', '1'); %Paso de aumento en theta
8 invoke(FarfieldPlot, 'Step2', '1'); %Paso de aumento en phi
9 invoke(FarfieldPlot, 'SetLockSteps', 'False');
10 invoke(FarfieldPlot, 'SetPlotRangeOnly', 'False');
11 invoke(FarfieldPlot, 'SetThetaStart', '0'); %Inicio de theta
12 invoke(FarfieldPlot, 'SetThetaEnd', '180'); %Fin de theta
13 invoke(FarfieldPlot, 'SetPhiStart', '0');
14 invoke(FarfieldPlot, 'SetPhiEnd', '360');
15 invoke(FarfieldPlot, 'SetTheta360', 'True'); %Theta entre 0 y 360
16 invoke(FarfieldPlot, 'Phistart', '1', '0', '0');
17 invoke(FarfieldPlot, 'Thetastart', '0', '0', '1');
18 invoke(FarfieldPlot, 'SetCoordinateSystemType', 'spherical');
19 invoke(FarfieldPlot, 'Userorigin', '0', '0', '0');
20 invoke(FarfieldPlot, 'StoreSettings'); %Ejecutar operacion y guardar cambios

```

## 4.9. Exportar

La operación exportar resulta fundamental, ya que es la que permite acceder a la información relevante de las estructuras simuladas. Para poder ejecutarla, básicamente se requiere seleccionar el tipo de parámetro de interés, y su tipo de formato de salida según sea pertinente, por ejemplo, si se quisiera extraer el parámetro  $Z$ , se debe tener en cuenta que es posible tomar su parte real, su parte imaginaria, su magnitud, o todos al tiempo.

Para realizar esta operación, se debe activar los elementos de pos procesamiento mediante los ítems 12-14, de la Tabla 4.1, en donde se deja de manera general los elementos para procesos como matrices de impedancia y parámetros  $S$ . Se debe especificar la ruta de extracción en donde se incluye el nombre del archivo txt que contendrá los elementos a exportar, como por ejemplo: “ruta = ‘C : \Users\GRECOUD\Desktop\Carpeta\Ejemplo.txt’ ”.

También, se debe seleccionar el elemento a exportar, para lo cual se presentan las siguientes opciones:

- *1DResults\S – Parameters\S1, 1*: Selecciona el parámetro S11. Los demás parámetros  $S$ , se seleccionan de manera análoga.
- *1DResults\ZMatrix* : Selecciona el parámetro de impedancia.
- *1DResults\VSWR* : Selecciona el parámetro VSWR.
- *Farfields\Pattern*: Selecciona el elemento de campo lejano.

Aquí, es de notar, como las opciones disponibles deben ser empleadas según el ejemplo del ítem 15 de la Tabla 4.1.

Finalmente, luego de realizar la configuración pertinente, se pide exportar dichos parámetros mediante el objeto ASCIIExport, con el cual se requieren una serie de parámetros por defecto, asociados a la selección realizada y la ruta de extracción.

```
1 ASCIIExport = invoke(mws, 'ASCIIExport'); %Selecion formato a exportar
2 invoke(ASCIIExport, 'Reset'); %Inicializacion de la operacion
3 invoke(ASCIIExport, 'SetVersion', '2010');
4 invoke(ASCIIExport, 'FileName', ruta); %Nombre del archivo de destino
5 invoke(ASCIIExport, 'Execute'); %Ejecucion de la operacion
```

Cabe señalar, que para los casos donde se requiera extraer la parte real e imaginaria de una gráfica o un formato distinto, como es el caso de la matriz de parámetros  $Z$ , en donde se requiere extraer por separado la parte real e imaginaria de dicha matriz, se debe acceder de manera adicional a las configuraciones del entorno gráfico del software mediante `invoke(Plot1D, 'PlotView', 'real')`, y hacerle saber al programa que se quiere extraer, en este caso ese campo puede variar entre: 'real', 'Imaginary', 'magnitude', 'magnitudedb', 'phase', 'polar'.

# Capítulo V

## Resultados

Aquí se detalla la construcción y simulación de algunas antenas y de unas celdas metamaterial, que resultan útiles para la comunidad académica, éstas estructuras son escogidas gracias a su complejidad geométrica, y la cantidad de operaciones que requieren para su creación. También se demuestra el enlace entre el programa de análisis electromagnético CST Studio versión estudiantil y el programa de análisis matemático Matlab. En los apartados relacionados a continuación se presentan los resultados de las simulaciones de diversas estructuras reportadas en la literatura como es el caso de antenas y celdas metamaterial, esto mediante la integración de los programas Matlab y CST. Los resultados finales se muestran en diagramas que luego son exportados a Matlab para su validación mediante comparación con los resultados reportados en cada caso.

### 5.1. Antenas

En esta sección se propone el diseño automatizado de las antenas de parche rectangular y dipolo de banda ancha Bow-Tie. Por otro lado, en el desarrollo del proyecto se decide agregar la antena bocina piramidal, gracias a su llamativa y compleja estructura, ya que su construcción requiere de herramientas no utilizadas en la construcción de geometrías planas.

#### 5.1.1. Parche rectangular

En este apartado se presentan los resultados de construcción y simulación de una antena tipo parche rectangular, de acuerdo con lo descrito en [44]. Esta antena tiene una frecuencia de trabajo de 28GHz, la geometría propuesta se ilustra en la Figura 5.1, para su simulación se hace uso del sustrato Taconic TLY-5, con un espesor de  $hs = 0,12\text{mm}$ , una constante dieléctrica  $\epsilon_r = 2,2$  y una tangente de pérdidas  $\tan\delta = 0,0009$ . En la Figura 5.1 se puede observar un eje coordenado centrado en el origen, así mismo, se muestran las dimensiones y puntos a tener en cuenta para la construcción de la geometría con respecto a esa referencia, la cual resulta de vital importancia para no alterar los valores de diseño.

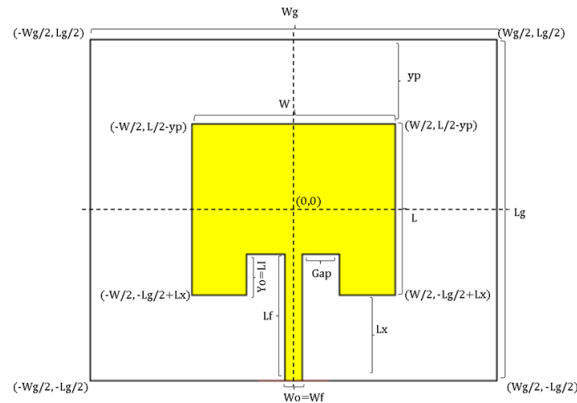


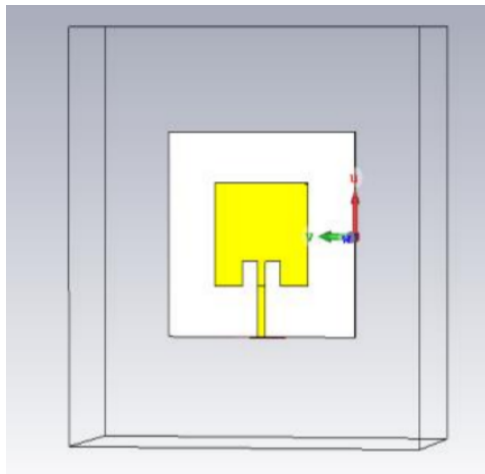
Figura 5.1: Consideraciones para la implementación del parche rectangular.

De manera adicional, en la Tabla 5.1, se muestran los parámetros del diseño reportado en [44] teniendo en cuenta la geometría propuesta. Cabe señalar, que dichos resultados y la selección de parámetros, son el resultado de realizar el diseño mediante los modelos de línea de transmisión y cavidad resonante, de la mano de un análisis paramétrico de la geometría en torno al ancho del gap. Dicho resultado, condujo a que la mejor relación ancho de banda y pérdidas de retorno, se obtuviera para un gap de 0,7mm.

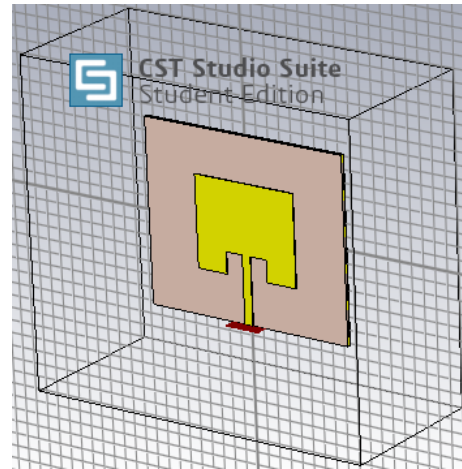
Tabla 5.1: Parámetros de diseño parche rectangular.

Parámetro	$W_g$	$L_g$	$W$	$L$	$L_I$	$L_F$	$GAP$	$W_F$
Valor [mm]	8.52	7.14	4.26	3.57	0.85	2.64	0.7	0.35

En la Figura 5.2, se puede observar la comparación de la geometría esperada, con la obtenida mediante la propuesta aquí detallada.



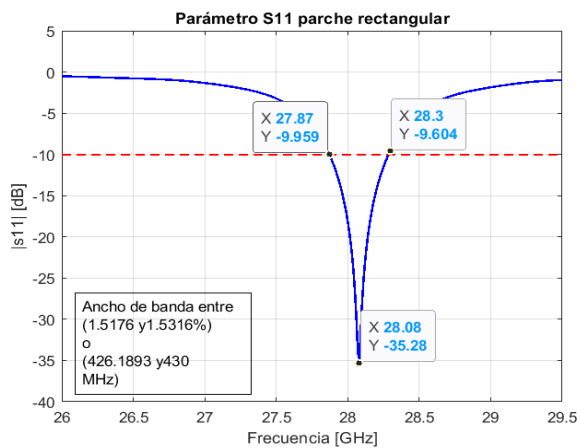
(a) Según [44]



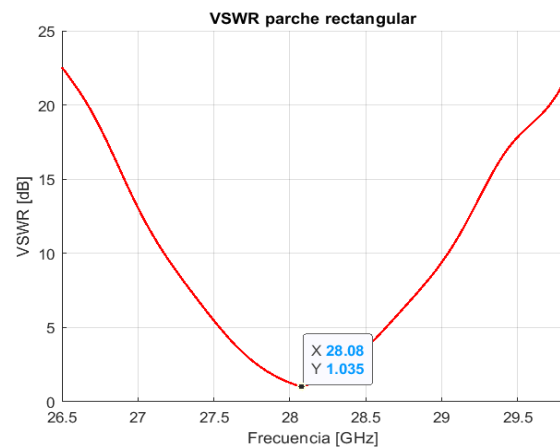
(b) Obtenido mediante propuesta

Figura 5.2: Comparación de geometrías del parche rectangular.

Por otra parte, se obtienen los resultados de las simulaciones de los parámetros S11, VSWR e impedancia para compararlos con lo reportado en [44]. Cabe señalar, que resulta de vital importancia hacer uso de las herramientas que tiene el software matemático para presentar de manera adecuada, todos los resultados que el software electromagnético entrega en un archivo de texto plano. La Figura 5.3, muestra lo obtenido para esta antena.



(a) Parámetro S11



(b) VSWR

Figura 5.3: Resultados obtenidos mediante la propuesta realizada para parche rectangular.

Adicionalmente, en la Figura 5.4 se logra extraer lo correspondiente al comportamiento en impedancia para la frecuencia de interés de la estructura construida, allí se presenta la parte real e imaginaria con respecto al barrido de simulación.

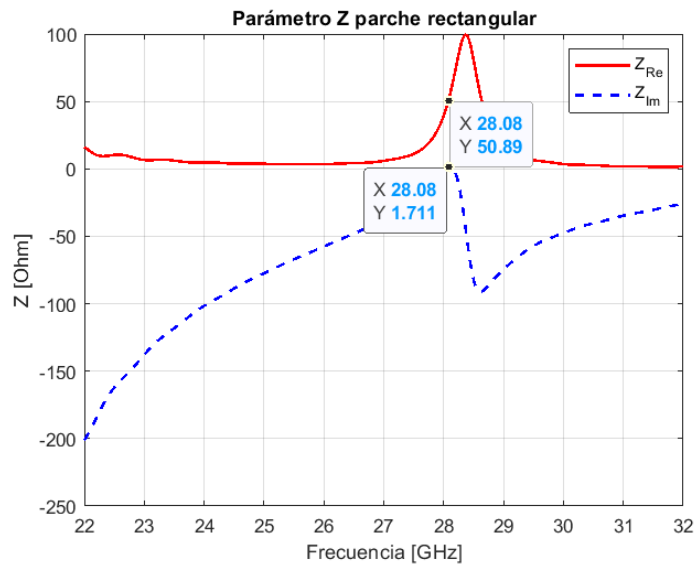
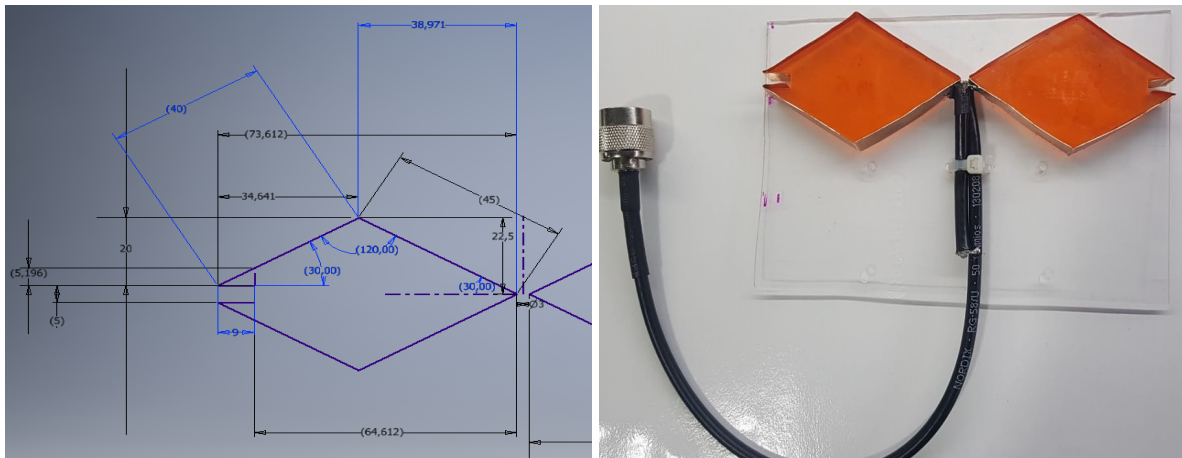


Figura 5.4: Impedancia parche rectangular obtenido mediante propuesta.

### 5.1.2. Antena Bow-Tie

En cuanto a las simulaciones de la antena Bow-tie mediante la metodología explorada en este trabajo, se aprovechan los resultados obtenidos en el laboratorio de telecomunicaciones II en la Universidad Francisco José de Caldas, donde se fabricó dicho dipolo para una frecuencia de 900MHz, en su construcción se debe tener en cuenta que se utilizó una lámina de cobre, gracias a su facilidad de soldar y moldear, además la geometría de color naranja es de material acrílico cortado con láser, y la alimentación del dipolo se lleva a cabo mediante un cable coaxial con un conector BNC, en la Figura 5.5 y en la Tabla 5.2 se detallan los valores utilizados para simular la estructura.



(a) Dimensiones de diseño

(b) Fabricación

Figura 5.5: Dipolo de banda ancha. Fuente propia.

Tabla 5.2: Dimensiones del dipolo de banda ancha.

Parámetro	Brazo W1 [cm]	Brazo W2 [cm]	Brazo W3 [cm]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	$\theta$ [°]
Dimensión	4.5	4	0.9	60	120	30

Por otro lado, en la Figura 5.6 se muestra el resultado geométrico de la ejecución del código. Los detalles de la construcción de la geometría y de selección de parámetros necesarios para la simulación se relacionan en la sección de metodología.

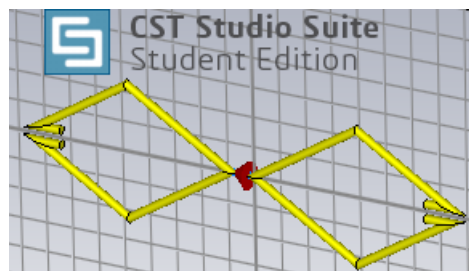


Figura 5.6: Geometría obtenida del dipolo corbatín.

En la Figura 5.7, se muestra el resultado obtenido en cuanto a el parámetro S del dipolo de banda ancha Bow-tie.



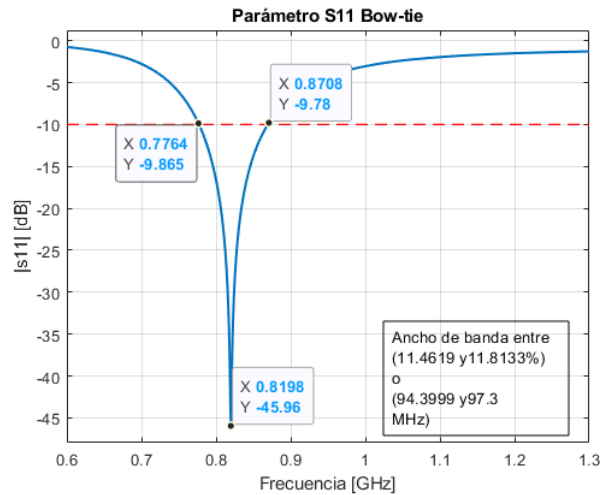


Figura 5.7: Resultado obtenido parámetro S11 de la Bow-tie

### 5.1.3. Bocina

En este apartado se validan los resultados obtenidos en [51], donde se muestran los parámetros y simulación de una antena tipo bocina piramidal en banda X, para la frecuencia de 11,47GHz. La geometría propuesta se ilustra en la Figura 5.8, con los datos de la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Dimensiones reportadas de la bocina piramidal. [51]

Parámetro	a	b	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>
Valor [mm]	22.86	10.16	54	31

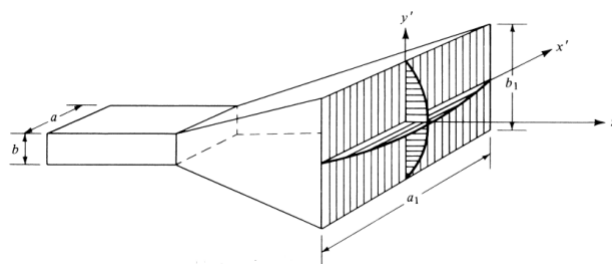


Figura 5.8: Dimensiones de bocina piramidal según. [51]

Con el fin de reproducir los resultados reportados en [51], se hizo uso de las dimensiones geométricas relacionadas en la Tabla 5.7 allí se hace referencia a otros parámetros como lo son: el grosor del cobre  $E_c = 1,1$  mm, la longitud de la guía  $L_g$  y la longitud del cono de la pirámide  $L$  los cuales no fueron detallados por el autor y que para fines de construcción geométrica se

hacen vitales, así que fueron obtenidos mediante medición de la bocina real que se encuentra en el laboratorio de ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de caldas. En la Figura 5.9 se encuentran demarcados los parámetros mencionados anteriormente.

Tabla 5.4: Dimensiones de implementación de la bocina piramidal.

Parámetro	a	b	L	W	H	$L_g$
Dimensión [mm]	22.86	10.16	30.1	54	31	39.527

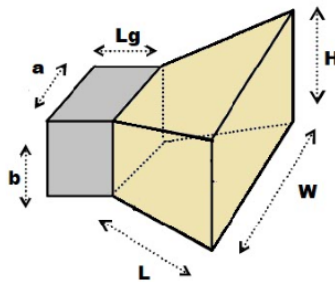


Figura 5.9: Dimensiones de implementación de bocina piramidal.

Adicionalmente, en la sección de metodología se detalla la conexión de los programas y demás parámetros que se necesitan para su creación. Debido a que la geometría de la bocina piramidal es una estructura volumétrica, obedece a un cambio en la creación de la rejilla o Mesh, que no se ha visto en las geometrías anteriormente descritas. La Figura 5.10, muestra la geometría final obtenida mediante la metodología estudiada en este trabajo.

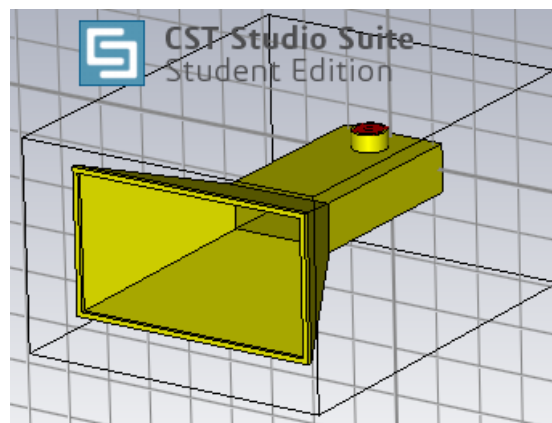
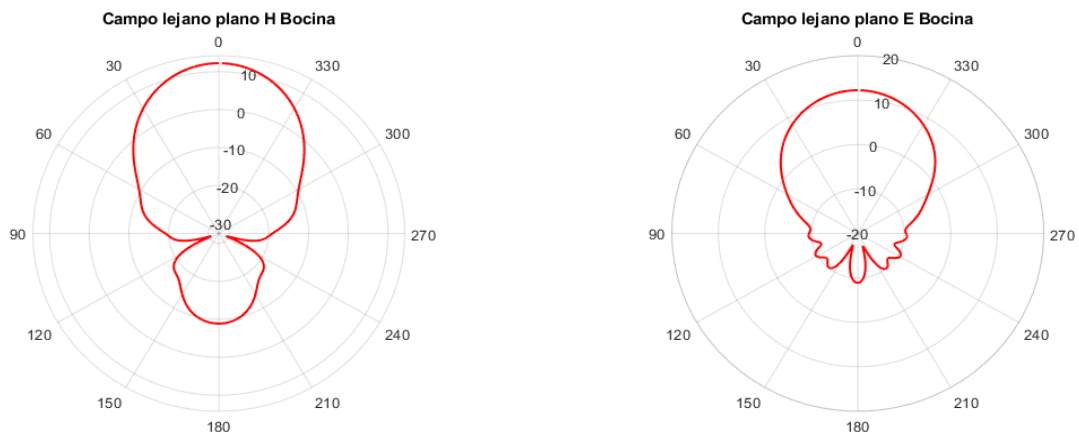


Figura 5.10: Geometría obtenida de la bocina piramidal.

En el caso de la bocina y cualquier tipo de estructura radiante el puerto es fundamental, ya que en este caso se excitó a partir de un cable coaxial con las siguientes características: un dieléctrico de teflón de radio 2,95mm, el radio del conductor es de 1mm, y el radio de la malla del cable

coaxial 3,8mm, por ello se debe crear el puerto mediante el uso de un pick el cual permite que la definición de puerto seleccione las dimensiones de manera automática de acuerdo a la selección hecha. La creación de este puerto se considera de carácter especial ya que es un puerto de tipo discreto.

Para la simulación de este tipo de estructuras, suele hacerse uso de simulación en dominio de la frecuencia, ya que permite un análisis más completo del comportamiento de esta, la configuración de este tipo de simulador se encuentra descrita en la sección de la metodología. Ya con los resultados, se procede a realizar la tarea de exportar datos relevantes, que para este caso resultan ser los parámetros de campo lejano en plano H y E, además del parámetro S11. Cabe señalar, que resulta de vital importancia hacer uso de las herramientas que tiene el programa matemático para presentar de manera adecuada, todos los resultados que el programas electro-magnético entrega en un archivo de texto plano. Las Figuras 5.11 y 6.3, muestra lo obtenido para esta antena.



(a) Resultado obtenido del campo plano H

(b) Resultado obtenido del campo plano E

Figura 5.11: Resultados obtenidos respecto al campo lejano de la bocina.

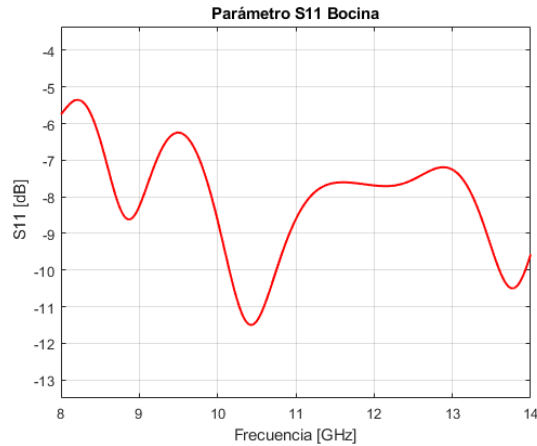


Figura 5.12: Resultado obtenido parámetro S11 de la bocina

## 5.2. Celdas metamaterial

Para las celdas metamaterial, se presenta la construcción y simulación de acuerdo con lo descrito en [51], las geometrías aquí tratadas, tienen una frecuencia de trabajo de 9,5 GHz, sustrato FR4, con un espesor de  $hs = 0,25$  y  $0,51$  mm para la celda SRR, ELC 4 y ELC 6, respectivamente, constante dieléctrica  $\epsilon_r = 4,3$ , tangente de pérdidas  $\tan\delta = 0,025$ , y una lámina de cobre con espesor de  $0,035$ mm.

Adicionalmente, se presentan los resultados de construcción geométrica, determinación de parámetros y simulación de otra celda metamaterial compuesta por dos anillos rectangulares ubicados en el mismo plano y con el mismo centro geométrico.

### 5.2.1. Resonador de anillo dividido (SRR)

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para la construcción y simulación de una celda metamaterial SRR. La geometría propuesta se ilustra en la Figura 5.13, con los datos de la Tabla 5.5, en donde  $P, W$  son el alto y ancho del sustrato,  $hs$  el espesor del mismo,  $w_i$  y  $w_e$  el ancho del anillo interior y exterior respectivamente,  $d$  es la separación entre anillos,  $g$  el gap,  $c$  el ancho de las pistas, y  $ec$ , el espesor de la lámina de cobre empleada.

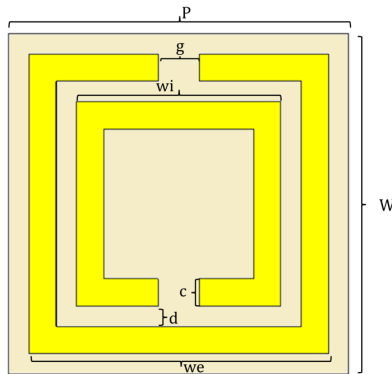


Figura 5.13: Dimensiones de implementación de la celda SRR.

Tabla 5.5: Dimensiones de la celda SRR.

Parámetro	hs	W,P	wi	we	d	g	c	Ec
Dimensión [mm]	0.25	2.5	2.2	1.5	0.15	0.3	0.2	0.035

En la Figura 5.14, se encuentra el resultado geométrico de la ejecución del código propuesto, allí se evidencian todos los elementos necesarios para la simulación y extracción de resultados acordes a esta estructura.

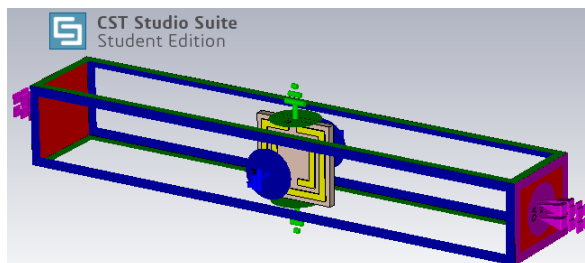


Figura 5.14: Geometría obtenida de la celda SRR.

Para la creación de esta celda, se deben tener en cuenta las condiciones referentes a unidades, frecuencia de operación, y demás configuraciones en cuanto a diseño, cuyas generalidades fueron detalladas anteriormente. Como particularidad, se presentan que las condiciones de contorno deben garantizar que la celda metamaterial sea atravesada por un campo magnético perpendicular al plano donde están ubicados sus anillos, es por eso que se realiza la configuración de los boundaries así: el contorno ubicado en la parte frontal se asigna de tipo magnético, lo cual implica que los campos eléctricos sean paralelos al límite y los flujos magnéticos son normales al mismo, por lo tanto, en dirección del eje z, por otro lado, el contorno ubicado en la parte superior, se asigna de tipo eléctrico, lo cual implica que los campos eléctricos son normales al límite y los flujos magnéticos son paralelos al mismo.

El siguiente detalle a tener en cuenta es la ubicación de los puertos, esta resulta ser de manera perpendicular al plano donde se encuentran los anillos, con el fin de reforzar el comportamiento requerido por esta celda en términos de campo magnético y eléctrico. Además, se requieren dos puertos, simétricos con respecto al origen a una distancia de un ancho de celda unitaria para cada lado y con unas dimensiones acordes al tamaño de esta. Para el primer puerto el procedimiento es el mismo, salvo que el nombre debe ser distinto, se debe reflejar con respecto al plano YZ, para eso se cambia de signo los valores en el rango Xrange =  $[W/2 \ W/2]$  y la orientación por un valor de 'Negative'.

En la Figura 5.15, se muestran los resultados obtenidos en cuanto a parámetros S de la celda SRR.

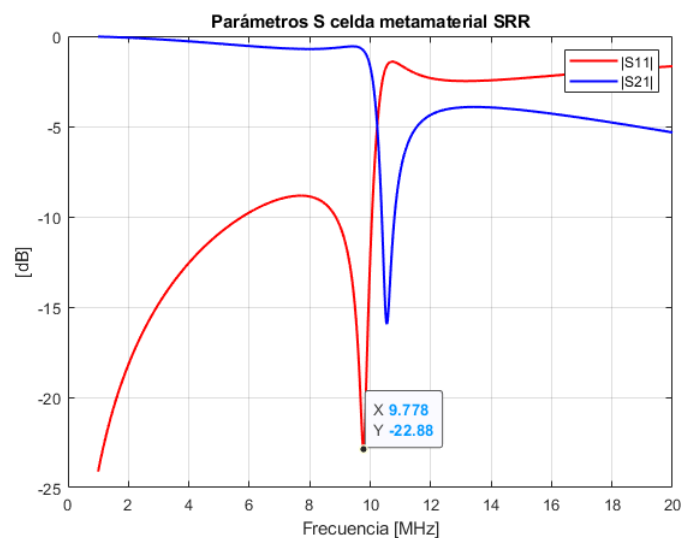


Figura 5.15: Resultados obtenidos parámetros S para SRR.

### 5.2.2. Celda ELC 4

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para la construcción y simulación de una celda metamaterial ELC 4, con los datos mencionados al inicio de esta sección. La geometría propuesta se presenta en la Figura 5.16, con los datos proporcionados en la Tabla 5.6.

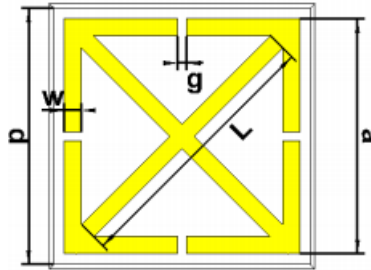


Figura 5.16: Dimensiones de implementación de la celda ELC 4. [51]

Tabla 5.6: Dimensiones de la celda ELC 4.

Parámetro	a	g	w	L	P	Ec	c
Dimensión [mm]	7.56	0.275	0.55	8.59	8.25	0.035	0.51

Para la creación de esta celda, se debe tener en cuenta que como su nombre lo indica, es de campo eléctrico acoplado, es decir, que tiene la particularidad de que un campo eléctrico debe atravesar sus anillos de forma perpendicular. Es por eso, que las condiciones de contorno que garantizan, ese comportamiento son: que en el plano XY o el orientado a la cara donde se encuentran los anillos de la celda, se tenga una condición de contorno de tipo abierto, esto con el fin de ubicar el puerto y de esta forma asegurar un flujo de campo eléctrico perpendicular a XY, y que en el plano YZ y XZ, se encuentre un boundary de tipo eléctrico y magnético respectivamente, lo cual refuerce la condición mencionada en cuanto a campo eléctrico en esta celda.

Finalmente, para la construcción y simulación de esta estructura se hizo uso de algunas de las herramientas expuestas en capítulos anteriores y en la Figura 5.17, se encuentra el resultado geométrico de la ejecución del código.

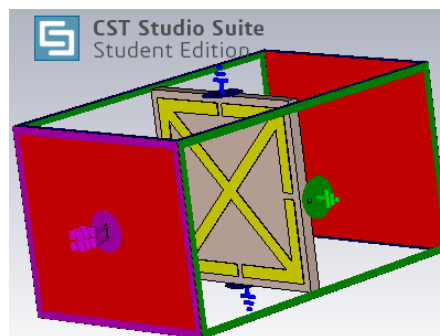


Figura 5.17: Geometría obtenida de la celda ELC 4.

En la Figura 5.18, se observan los resultados obtenidos en cuanto a parámetros S de la celda ELC 4.

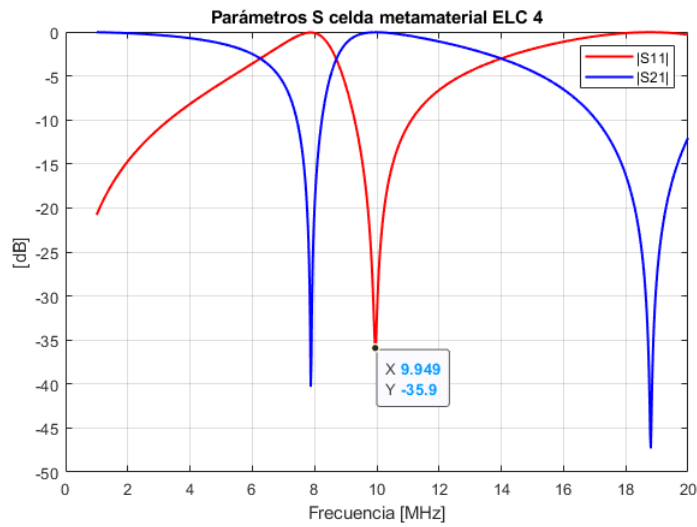


Figura 5.18: Resultado obtenido parámetros S de la celda ELC 4.

### 5.2.3. Celda ELC 6

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para la simulación de una celda metamaterial ELC 6. La geometría propuesta se muestra en la Figura 5.19, con los datos proporcionados en la Tabla 5.7.

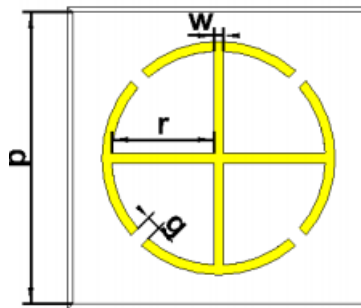


Figura 5.19: Dimensiones de implementación de la celda ELC 6. [51]

Tabla 5.7: Dimensiones de la celda ELC 6.

Parámetro	P	r	g	w	Ec	c
Dimensión [mm]	10	3.62	0.5	0.25	0.035	0.51

Esta geometría fue seleccionada debido a su diferencia en construcción pues por ser circular demuestra el paso a paso de su elaboración, y con respecto a su configuración en boundaries,



rejilla, puertos y dominio de simulación, obedece a la misma de la celda metamaterial ELC 4. En la Figura 5.20, se encuentra el resultado geométrico de la ejecución del código.

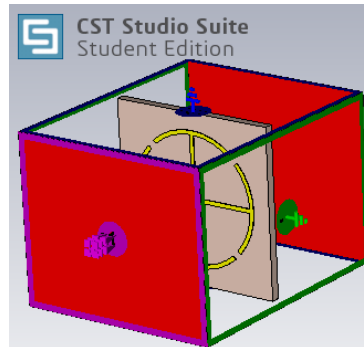


Figura 5.20: Geometría obtenida de la celda ELC 6.

En la Figura 5.20, se puede observar los resultados obtenidos en cuanto a parámetros S de la celda ELC 6.

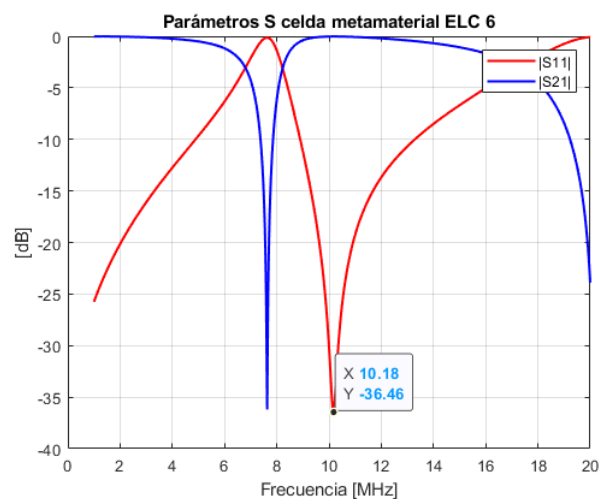


Figura 5.21: Resultado obtenido parámetros S de la celda ELC 6.

#### 5.2.4. Celda metamaterial para aplicaciones transmit-array (FSS)

Esta sección detalla un aporte adicional del proyecto, el cual es una celda unitaria para la construcción de una antena tipo lente, el objetivo de esta celda es permitir un cambio de fase en la onda incidente, de tal forma que se genere un frente de onda plano y permitir crear un haz de radiación enfocado de alta ganancia. Los resultados aquí reportados, obedecen a la simulación de una antena de doble anillo cuadrado, según [52], dicha celda resultó como el punto de partida para este proyecto, ya que por falta de algunos datos importantes para la creación de la geometría, se hizo necesario recurrir a una cantidad considerable de simulaciones, en las cuales,

a veces era necesario construir toda la geometría desde cero, para poder tener un mejor control de versiones conforme se avanzaba en el conocimiento de la estructura y su comportamiento. La Figura 5.22, muestra las dimensiones que se tuvieron en cuenta según [52], las cuales están condensados en la Tabla 5.8,  $T$  es el espesor de sustrato,  $E_c$  es el espesor de cobre,  $W$  el ancho de las pistas,  $S$  la separación entre anillos y  $L_2$  la longitud del anillo interno, la cual depende de  $L_1$ , mediante la relación  $L_2 = L_1 - (2W) - (2S)$ .

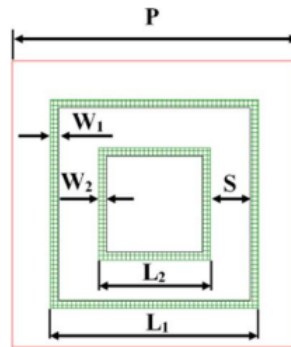


Figura 5.22: Dimensiones de implementación de la celda FSS. [52]

Tabla 5.8: Dimensiones de la celda Transmitarray.

Parámetro	W	S	L1	P	T	Ec
Dimensión [mm]	0.5	2.5	1-17.5	17.8625	0.5	0.017

En la Figura 5.23, se muestra la estructura totalmente construida, con sus condiciones de contorno de tipo eléctrico, esto quiere decir que como se explicó anteriormente, el campo debe atravesar perpendicularmente el plano donde están contenidos los anillos, y así se pueda evidenciar el comportamiento característico de esta estructura.

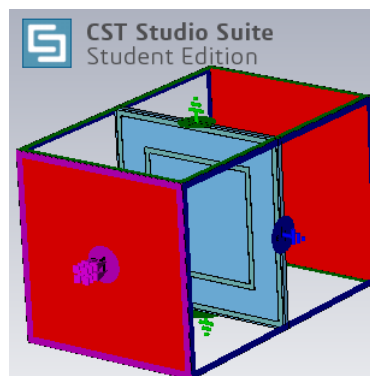
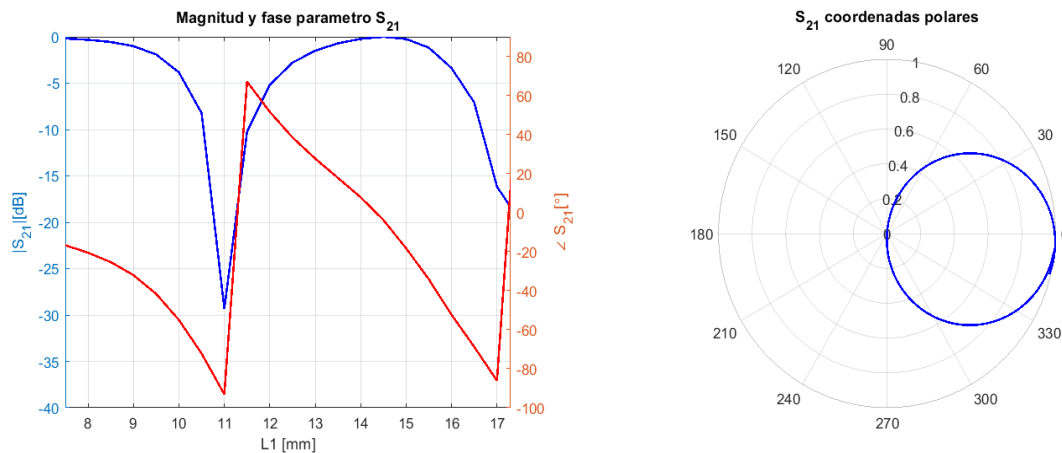


Figura 5.23: Geometría obtenida de la celda FSS.

En la Figura 5.24, se muestra el resultado obtenido en cuanto a el parámetro  $S_{21}$  de la celda Transmitarray, para un barrido en longitud de  $L1$  desde 7,5 a 17,5mm con un paso de 5mm y lo correspondiente a la fase de dicho parámetro, teniendo en cuenta los aportes de cada una de las longitudes mencionadas.



(a) Resultado obtenido en magnitud y fase. (b) Resultado obtenido en coordenada polar.

Figura 5.24: Resultado obtenido en parámetro S<sub>21</sub> de la celda FSS.

### 5.2.5. Algoritmo de optimización PSO

En esta sección se presenta otro aporte adicional al proyecto, mediante la elaboración de un algoritmo inicial que permita la optimización automática. El algoritmo aquí presentado, resulta como un primer paso en el uso de la metodología aquí tratada para el trabajo conjunto con Matlab y CST, para la ejecución de un algoritmo evolutivo, donde en rasgos generales se requiere encontrar la mejor geometría que satisfaga ciertos parámetros requeridos por el diseñador. Por consiguiente, se decide verificar la posibilidad de utilizar dicho algoritmo, el cual requiere los resultados de cada una de las interacciones o simulaciones exportadas desde el programa electromagnético para seleccionar el resultado óptimo que cumpla las necesidades. Presentando los resultados como precedente para posteriores proyectos académicos.

Se realiza una propuesta de algoritmo de optimización PSO con factor de inercia dinámico, para la evaluación del comportamiento de un parche rectangular, para la frecuencia de 2,4GHz, con un sustrato de tipo FR4 con espesor de 1,5mm, épsilon 2,55 y tangente de pérdidas de 0,0017. Específicamente, la optimización se realiza para 5 partículas con 5 iteraciones, y de esta forma, poder ver el comportamiento de cada una de ellas mediante la evolución del algoritmo aquí presentado, teniendo en cuenta la selección reducida del número de partículas y de iteraciones, dadas las limitaciones en cuanto a licencia del programa electromagnético. Adicionalmente, se toma un factor de inercia  $w$  que varía entre 0.4 y 0.9, y un coeficiente de aceleración que varía entre 0.5 y 2.5. La figura 5.25, ilustra el proceso de optimización utilizado.

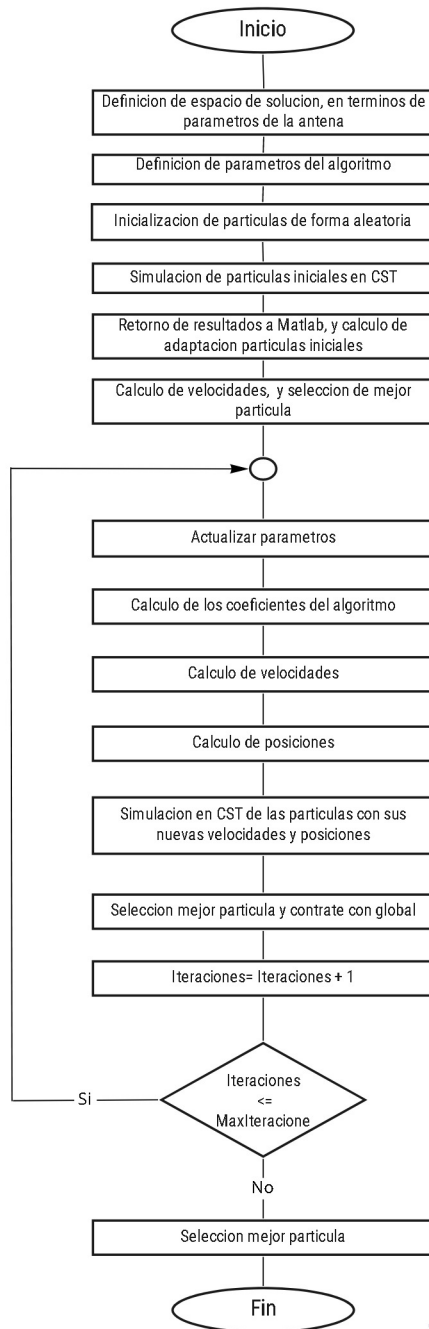
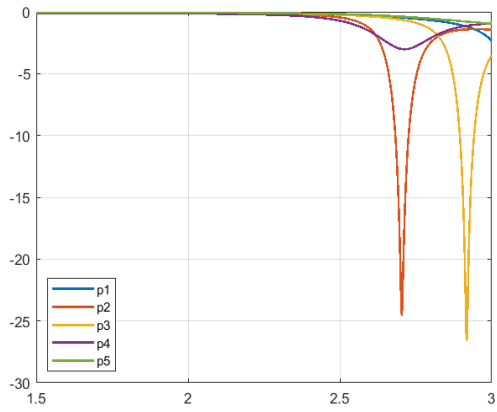
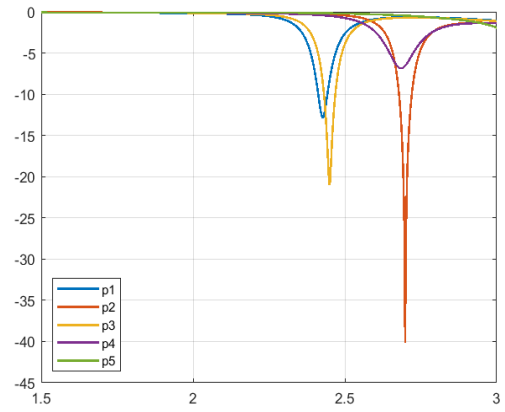


Figura 5.25: Diagrama de flujo de la implementación del algoritmo PSO con factor de inercia dinámico.

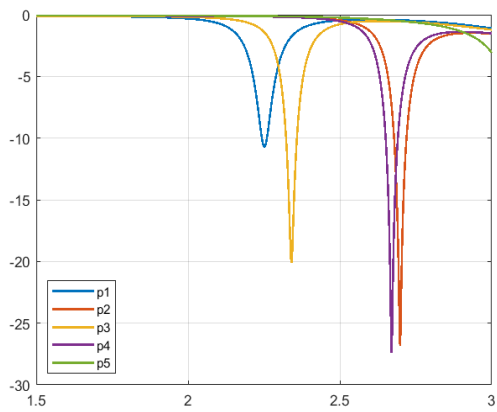
Finalmente, en la Figura 5.26, se presentan los resultados obtenidos mediante la ejecución del algoritmo, para las cinco partículas creadas y las cinco iteraciones, las cuales representan actualización de posiciones, y velocidades.



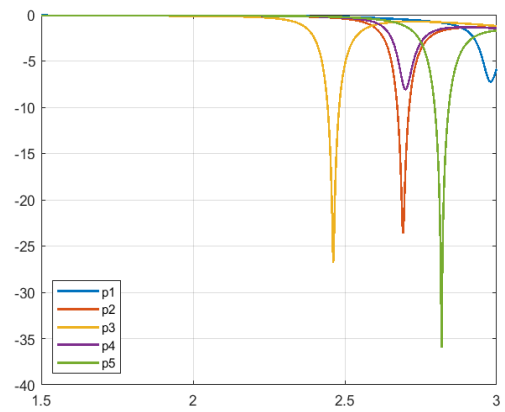
(a) Iteración 1.



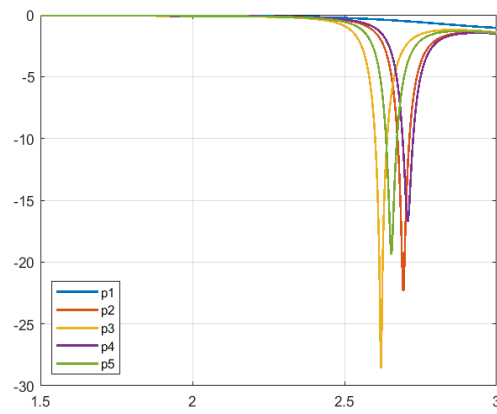
(b) Iteración 2.



(c) Iteración 3.



(d) Iteración 4.



(e) Iteración 5.

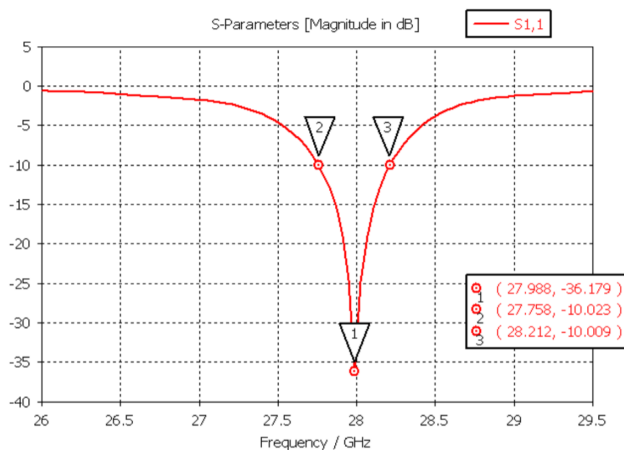
Figura 5.26: Resultados de evolución por partícula para 5 iteraciones.

# Capítulo VI

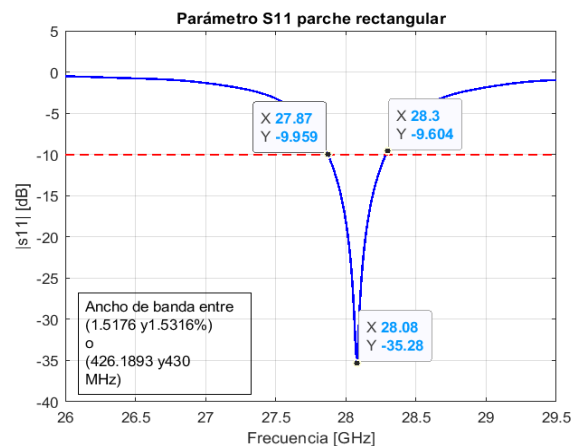
## Análisis de resultados

### Parche rectangular

En cuanto al parche rectangular, la Figura 6.1, muestra la comparación de los resultados obtenidos mediante la propuesta y lo reportado en [44], de allí se puede observar un comportamiento muy similar el cual se condensa en la Tabla 6.1, en donde se presentan los porcentajes de error asociados. Las pequeñas diferencias encontradas, hacen parte de que en [44], no se especifica el tamaño del puerto, lo cual, como se ha venido tratando a lo largo del documento, modifica el desempeño de las estructuras. Cabe señalar, que el criterio descrito en el Anexo B, resulta de gran utilidad, dado que la variación de este elemento ocasiona corrimientos en frecuencia y cambios bruscos en el parámetro S11 en la frecuencia de resonancia.



(a) Resultado reportado en [44].



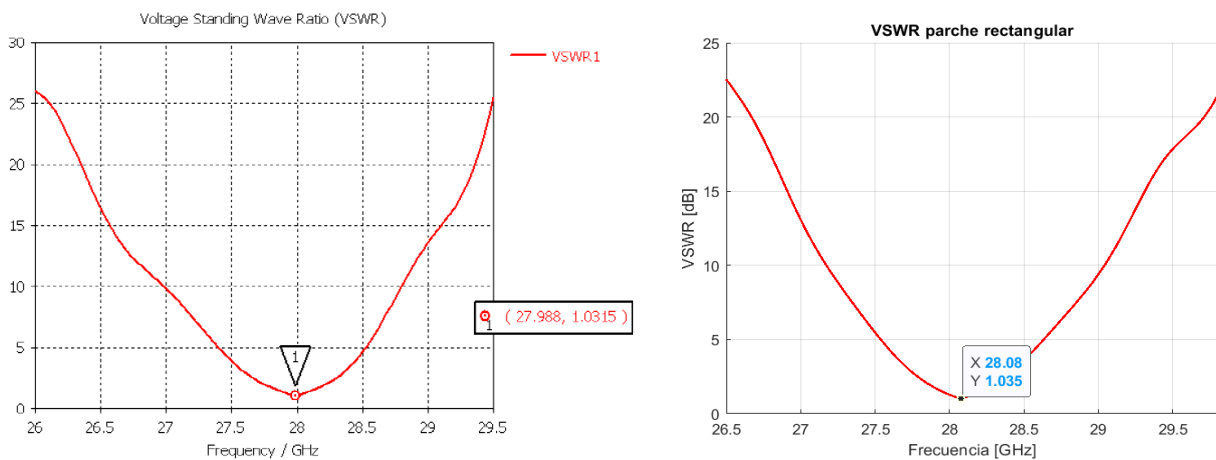
(b) Obtenido mediante propuesta.

Figura 6.1: Comparación parámetro S11 del parche rectangular.

Tabla 6.1: Comparación de resultados parche rectangular para S11.

Parámetro	$f_l$ [GHz]	$F_h$ [GHz]	$F_o$ [GHz]	BW[MHz]	S11 [dB]
Valor reportado en [44]	27.758	28.212	27.988	454	-36.179
Valor obtenido mediante propuesta	27.87	28.3	28.08	430	-35.28
% Error	0.403	0.794	0.329	5.286	2.485

En cuanto al VSWR, presenta un ligero corrimiento en frecuencia, tomando como referencia el parámetro S11, en donde el error en desadaptación de impedancias es mínimo y se atribuye a lo mencionado con respecto al parámetro anterior.



(a) Resultado reportado en [44].

(b) Obtenido mediante propuesta.

Figura 6.2: Comparación parámetro VSWR del parche rectangular.

### Antena Bow-tie

En cuanto a lo obtenido para la antena Bow-tie, por medio de la Figura 6.3, se puede observar la gran diferencia en cuanto al ancho de banda se refiere, esta situación se fundamenta en varios factores que son: cuando se propone la solución inicial en un software como mmanagal, resulta difícil aproximarse a la construcción real con radios de un alambre comercial y por ende, este requiere usar radios muy pequeños dada la inestabilidad de la simulación conforme aumenta este parámetro, haciendo difícil comparar los resultados aquí obtenidos con los de ese simulador. Adicionalmente, la manipulación de un alambre en calibre 10 o 12 AWG dificulta la construcción de un prototipo real basado este material, lo cual conduce a que éste sea construido mediante una aproximación de lámina de cobre plegada. Por otro lado, no existe en la literatura ecuaciones de diseño que estén definidas para este tipo de antenas, por lo tanto, los criterios de diseño resultan ser empíricos y como es común en la elaboración de estas estructuras, cualquier variación o consideración adicional de cualquier parámetro, resulta en un cambio considerable en el comportamiento electromagnético.

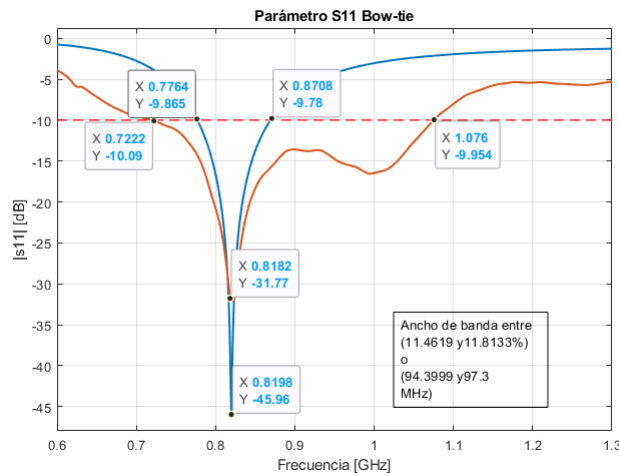
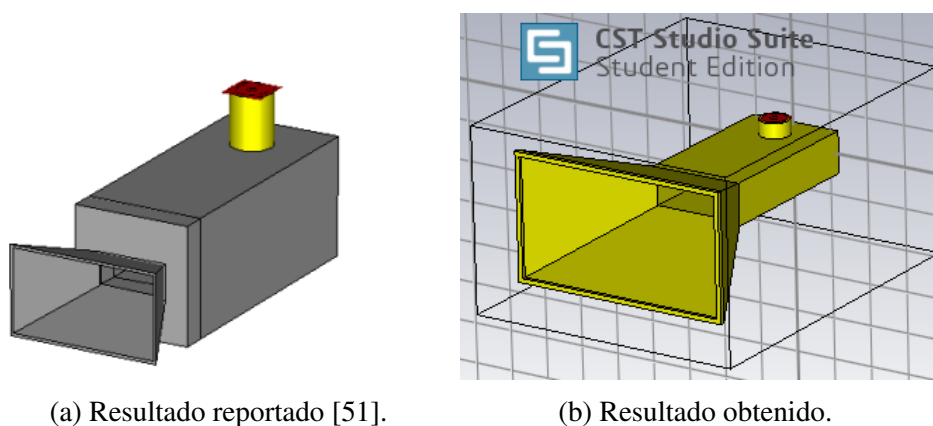


Figura 6.3: Resultados obtenidos parámetros S11 de la Bow-tie.

## Bocina

Para esta geometría en particular, se realizó la comparación mediante dos propuestas, la primera, es una antena bocina excitada mediante su guía de onda, y la segunda es esta misma bocina, pero haciendo la excitación mediante un cable coaxial (caso real). Es importante dejar claro que en [51], no especifican a detalle los valores de las dimensiones, pero gracias a que la bocina se encuentra en el laboratorio de la Universidad Distrital, fue posible extraer algunas características para su construcción. Es por eso, que partiendo de esta incertidumbre de datos medidos y reportados, se encuentra una diferencia en cuanto a los resultados obtenidos de forma física, como se observa en la Figura 6.4, y por parte del comportamiento electromagnético, dichas diferencias se muestran en la Figura 6.5, 6.6 y 6.7.

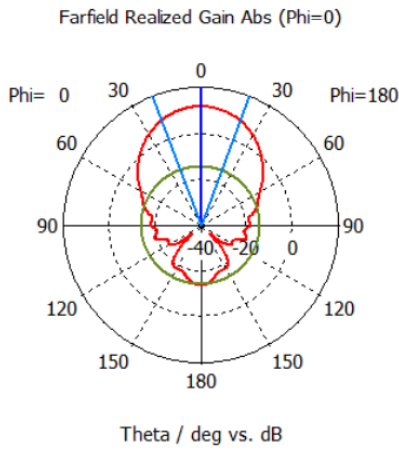


(a) Resultado reportado [51].

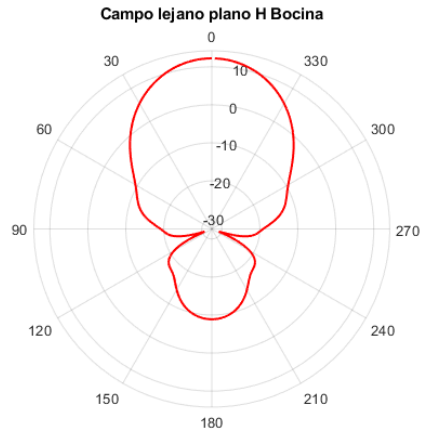
(b) Resultado obtenido.

Figura 6.4: Comparaciones geométricas de la bocina.



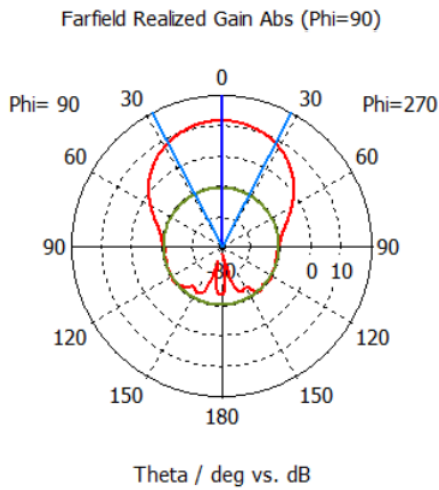


(a) Resultado reportado [51].

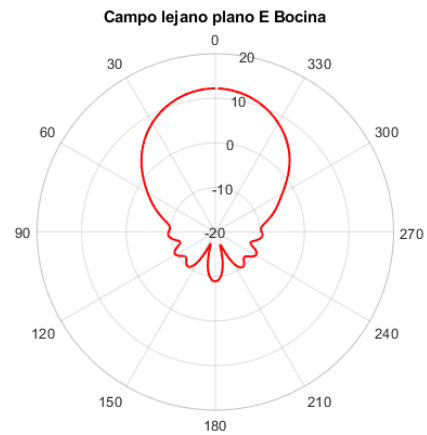


(b) Resultado obtenido.

Figura 6.5: Comparación campo lejano en plano H de la bocina.



(a) Resultado reportado [51].



(b) Resultado obtenido.

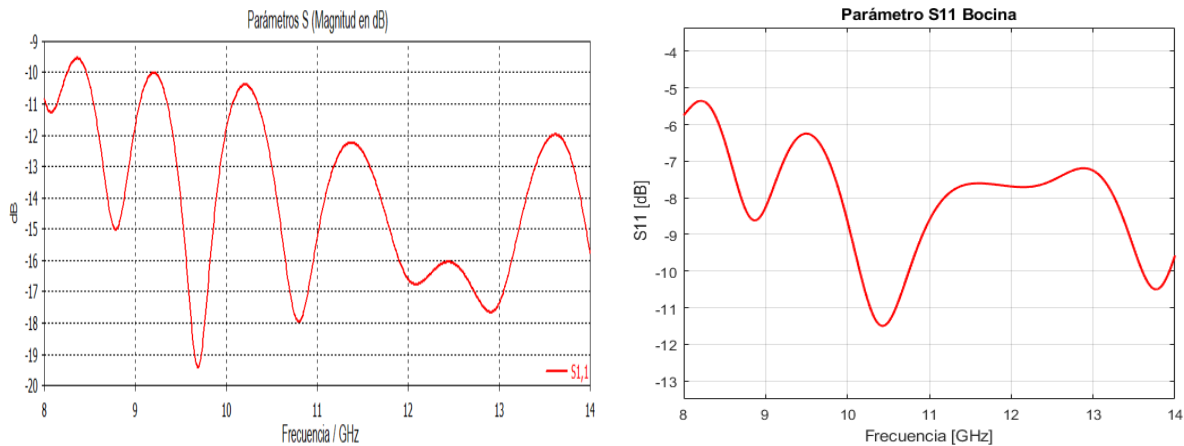
Figura 6.6: Comparación campo lejano en plano E de la bocina.

En la Tabla 6.2, se encuentra la comparación de resultados en torno a lo obtenido en [51], frente las dos propuestas realizadas, en donde se puede evidenciar un buen comportamiento de las antenas en cuanto directividad y ganancia. Además, con referencia al ancho de haz de media potencia, para plano E y plano H, se tiene un error mayor, debido a la distorsión del diagrama de radiación, dado por las notables diferencias en cuanto a la geometría se refiere.

Tabla 6.2: Comparación de resultados de la bocina.

Parámetro	Directividad [dBi]	Ganancia [dB]	HPBW E°	HPBW H°
Valor [51]	12.04	11.7	54.7	41.1
Valor guía	12.19	12.09	52.4	39.4
Valor coaxial	12.21	11.51	51.9	39.5
% Error guía	1.246	3.333	4.205	4.136
% Error coax	1.412	1.624	5.119	3.893

Finalmente, en la Figura 6.7, se puede observar las diferencias en torno al parámetro S11, en donde si bien son similares, el fundamento de estas se vuelve a encontrar la construcción mostrada anteriormente, ya que como en toda estructura radiante la longitud está relacionada con la frecuencia, mediante la longitud de onda.



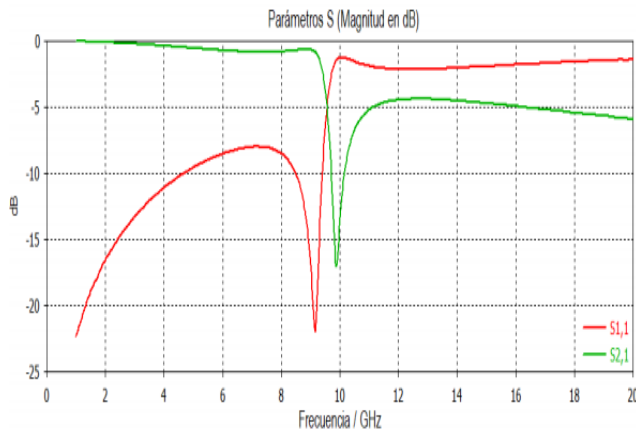
(a) Resultado reportado [51].

(b) Resultado obtenido.

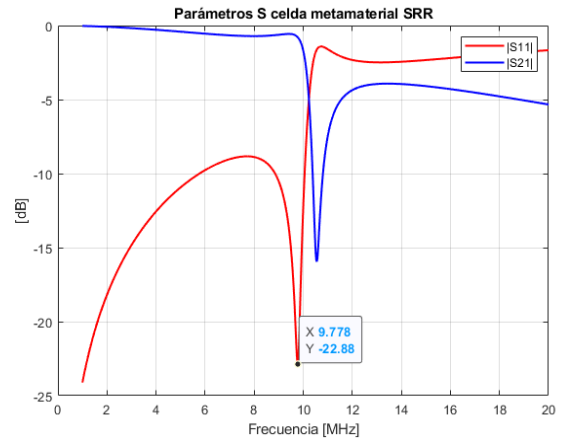
Figura 6.7: Comparación parámetro S11 de la bocina.

### Celda metamaterial SRR

En cuanto a lo obtenido para la celda SRR, los resultados se encuentran en la Figura 6.8, en donde es posible apreciar como estos se aproximan de muy buena forma, pese a que tienen un error asociado del 6.283 % teniendo en cuenta los valores medidos en la Tabla 6.3. Estos errores, nuevamente se asocian al tamaño de los puertos, ya que en [51], no se hace énfasis en dichas dimensiones, dicho error se ve reflejado de manera análoga para las dos celdas metamateriales restantes, en donde se encuentra un error de orden similar, asociado al mismo fenómeno. Por otro lado, cabe resaltar que la información suministrada en la referencia respecto a la tangente de pérdidas, aun cuando nos brinda el valor de  $\epsilon = 4,3$ , lo cual nos lleva a asumir que el material utilizado es FR4 (Lossy), pero asumir un valor tan importante puede aumentar de manera significativa o no, el porcentaje de error de los resultados obtenidos.



(a) Resultado reportado en [51].



(b) Resultado obtenido.

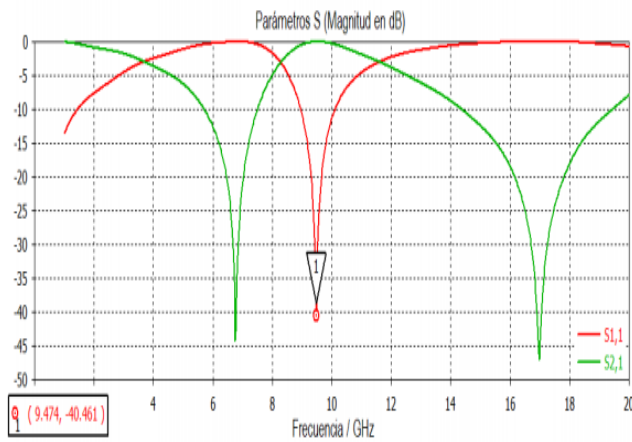
Figura 6.8: Comparación parámetros S de la celda SRR.

Tabla 6.3: Comparación de resultados parámetros S para celda metamaterial SRR.

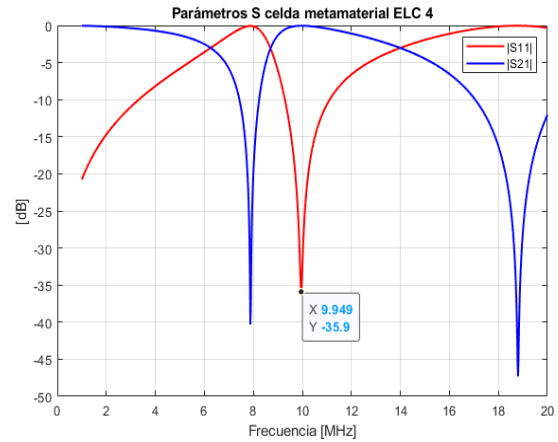
Parámetro	$f_o$ S11 [GHz]
Valor reportado en [51]	9.2
Valor obtenido mediante propuesta	9.778
% Error	6.283

### Celda metamaterial ELC4

En esta celda, los resultados son muy cercanos a lo esperado en [51], la descripción de características y parámetros de diseño fue más específica, pese a que el porcentaje de error corresponde a 5,014 % como se puede observar en la Tabla 6.4, básicamente, lo podemos atribuir al tamaño y distancia de creación de los puertos, como se ha venido mencionando anteriormente dicho parámetro es vital a la hora de simular. En la Figura 6.9b se puede observar cómo se logra replicar un comportamiento similar aprovechando la simbiosis entre software.



(a) Resultado reportado en [51].



(b) Resultado obtenido.

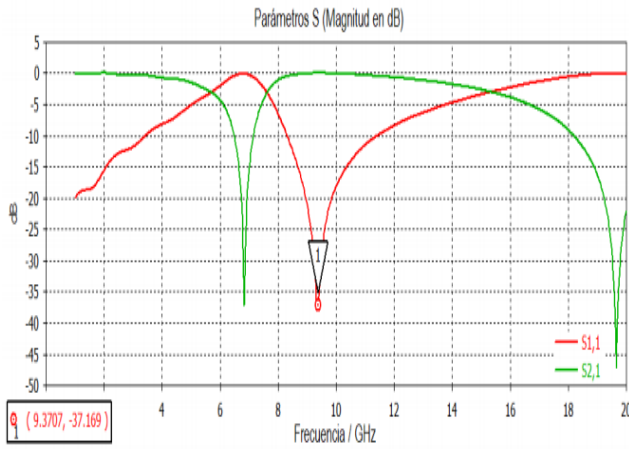
Figura 6.9: Comparación parámetros S de la celda ELC 4.

Tabla 6.4: Comparación de resultados parámetros S para celda metamaterial ELC 4.

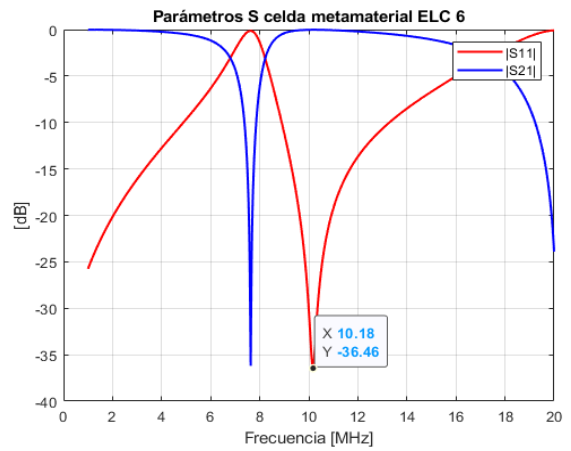
Parámetro	$f_o$ S11 [GHz]
Valor reportado en [51]	9.474
Valor obtenido mediante propuesta	9.949
% Error	5.014

### Celda metamaterial ELC 6

Esta celda, fue seleccionada gracias a que su geometría presenta retos interesantes en su construcción, lo cual resulta en un gran aporte a generalizar la definición y ejecución de operaciones. Respecto a sus resultados, es posible ver como son muy cercanos a lo esperado en [51], teniendo en cuenta que su porcentaje de error corresponde a 8,636 %, como se puede observar en la Tabla 6.5. Básicamente, el error se atribuye a la misma ausencia de algunos datos, como se hizo énfasis en las celdas SRR y ELC 4, que nos lleva a asumir valores que pueden provocar el aumento significativo de este margen de error. En la Figura 6.10 se puede observar cómo se logra replicar el comportamiento mediante la propuesta presentada.



(a) Resultado reportado en [51].



(b) Resultado obtenido.

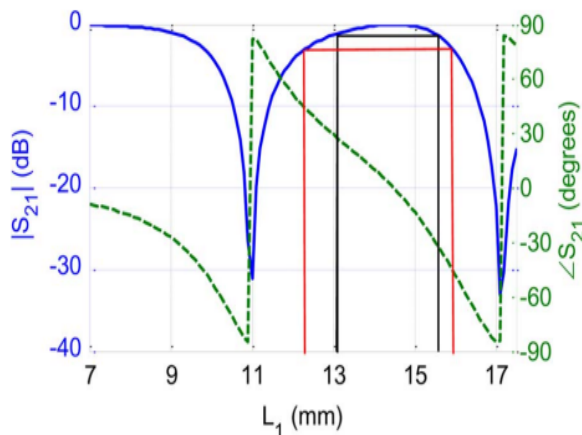
Figura 6.10: Comparación parámetros S de la celda ELC 6.

Tabla 6.5: Comparación de resultados parámetros S para celda metamaterial ELC 6.

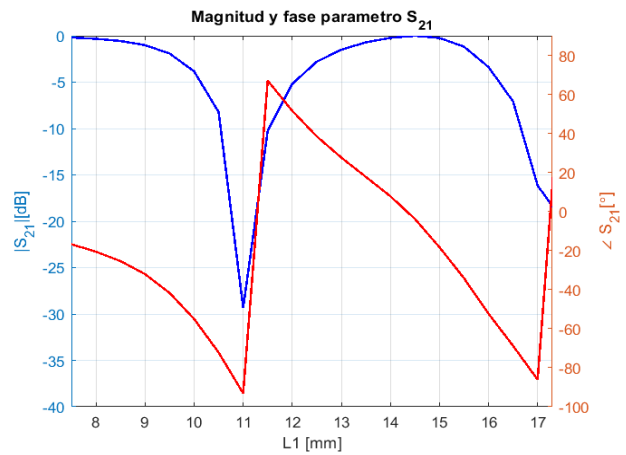
Parámetro	$f_o$ S11 [GHz]
Valor reportado en [51]	9.3707
Valor obtenido mediante propuesta	10.18
% Error	8.636

### Celda metamaterial para aplicaciones en transmit-array (FSS)

En la Figura 6.11 se puede observar la comparación de resultados para la celda unitaria. Lo reportado en [52], presenta una evaluación de desempeño teniendo en cuenta la magnitud del parámetro  $S_{21}$  con respecto a una referencia de  $-1\text{dB}$  y  $-3\text{dB}$ , allí se tiene un rango de transmisión de fase que va de  $-27^\circ$  a  $27^\circ$  (rango de fase de  $54^\circ$ ) y uno que va de  $-45^\circ$  a  $45^\circ$  (rango de fase de  $90^\circ$ ), respectivamente. Comparativamente, mediante los resultados logrados en esta propuesta, se obtuvo un rango de transmisión de  $22,35^\circ$  a  $-32,44^\circ$  (rango de fase de  $54,79^\circ$ ) para  $-1\text{dB}$  y otro de  $39,79^\circ$  a  $-49,41^\circ$  (rango de fase de  $89,2^\circ$ ) para  $-3\text{dB}$ . La diferencia en resultados es atribuida a las distancias y tamaño del puerto de simulación, los cuales no fueron reportados en [52], ya que, si bien los resultados resultan ser similares, se presenta asimetría en los rangos de fase para los resultados obtenidos, pero esto no afecta el comportamiento deseado de la celda.



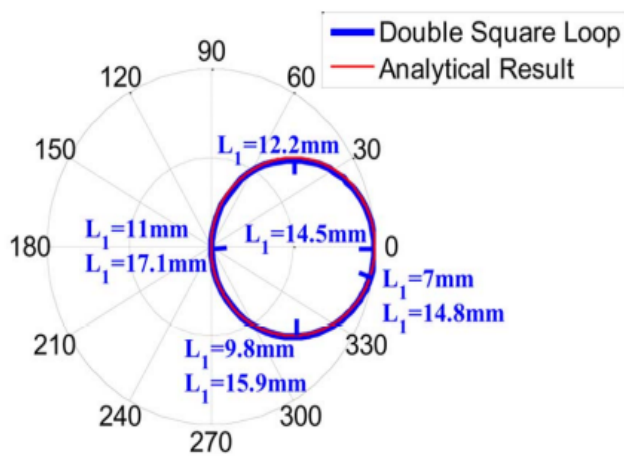
(a) Resultado reportado [52].



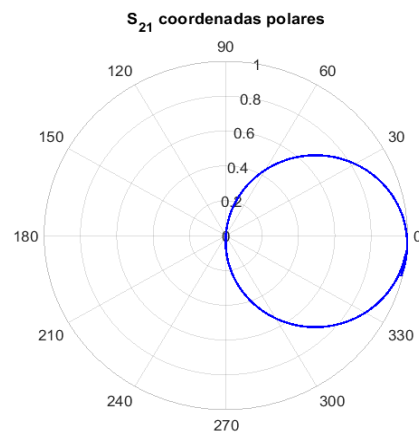
(b) Resultado obtenido.

Figura 6.11: Comparación magnitud y fase S21 de la celda FSS.

Por otro lado, en la Figura 6.12, se puede observar el comportamiento en fase de la estructura, en donde se ve como esta alcanza a cubrir  $360^\circ$ , lo que implica que, al construir un arreglo, este podrá cumplir con el criterio de  $-1$  o  $-3$  dB para cada una de las fases incidentes, es por eso que la asimetría no es tan relevante en cuanto a funcionamiento, pero sí en cuanto a pérdidas asociadas a la interferencia entre celdas dado el desfase mostrado anteriormente.



(a) Resultado reportado [52].



(b) Resultado obtenido.

Figura 6.12: Comparación en coordenadas polares del parámetro S21 de la celda FSS.

# Capítulo VII

## Conclusiones

El desarrollo de este tipo de herramientas enfocadas al diseño y optimización automatizado de estructuras de microondas permite reducir los tiempos de simulación hasta cerca del 85 % frente a los tiempos requeridos mediante el método tradicional de análisis paramétricos.

Cualquier metodología de automatización para el diseño de estructuras pasivas de microondas, requiere de un nivel de abstracción amplio y de conocimiento del comportamiento y limitaciones de las mismas, así como de la asignación apropiada de los parámetros de simulación, esto para evitar generar comportamientos inesperados en los elementos simulados o de resultados que pueden alejarse de la realidad. Es importante explorar diversos algoritmos de optimización hasta encontrar el mas apropiado para cada tipo de estructura (Antenas, celdas metamaterial, etc.), esto dado que cada estructura puede tener requerimientos diferentes.

La dificultad del uso de la herramienta presentada, radica en la familiarización con los programas y algoritmos utilizados como es el caso de Matlab, el programa de análisis electromagnético, los algoritmos de optimización, el conocimiento de la estructura a optimizar y todo lo relacionado con la ejecución de bloques de código para comprender rápidamente la lógica asociada a este proceso.

En el proceso de diseño y optimización de una estructura es importante partir de un modelo analítico de la misma, así como tener conocimiento de las especificaciones del material a utilizar, de las dimensiones iniciales mas apropiadas, de los parámetros de simulación más adecuados, esto junto con el conocimiento de los resultados esperados, así como el comportamiento esperado frente a algún parámetro particular, ya que, al realizar una optimización de ese proceso, se ve disminuido el rendimiento por la falta de información de algunos parámetros clave, como resulta ser el tamaño de un puerto, espesor de material, entre otras características geométricas.

La flexibilidad de la propuesta aquí realizada, permite realizar varias estructuras, cada una de ellas acompañada de una visualización de los resultados pertinentes para un posterior análisis, aquí se deja un precedente para las personas de la comunidad académica y del grupo Greco, que quieran aplicar esta propuesta para la implementación de algoritmos que aprovechen lo aquí presentado y lo integren con herramientas de inteligencia computacional.

# Bibliografía

- [1] Xu, F., Lin, Y., Huang, J., Wu, D., Shi, H., Song, J., Li, Y. (2016). Big Data Driven Mobile Traffic Understanding and Forecasting: A Time Series Approach. *IEEE Transactions on Services Computing*, 9(5), 796–805. <https://doi.org/10.1109/TSC.2016.2599878>
- [2] SUAREZ-FAJARDO Carlos Arturo; MENDEZ-MARIN, D. R. P.-R. A. y P.-L. G. A. (2016). Patch antenna with reconfigurable sense of rotation for CubeSat satellite applications. *DYNA*, 83, 157–164. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/dyna.v83n199.52449>
- [3] SUAREZ Carlos A; CARROLL, J. y P. G. A. (2016). Antena Compacta para Aplicaciones en Satélites de Reducido Tamaño. 27, 189–198. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642016000300018>.
- [4] SUAREZ FAJARDO Carlos Arturo; LOPEZ CARDENAS, J., PUERTO LEGUIZAMON, G. A. (2016). Antena plana para aplicaciones en las bandas L1 y L2 de GPS. *Ingeniería y Desarrollo*, 34, 248-265. <https://doi.org/https://doi.org/10.14482/inde.33.2.6368>
- [5] SUAREZ-FAJARDO Carlos Arturo; RODRIGUEZ-LEON, R., ANTONINO-DAVIU, E. (2015). Wideband PIFA antenna for higher LTE band applications. *DYNA*, 82, 84–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/dyna.v82n189.42103>.
- [6] SUAREZ Carlos; RODRIGUEZ, R., BATALLER, M. F. (2012). Broadband planar antenna with improved pattern bandwidth. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 74–84. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttextpid=S0120-62302012000400006nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttextpid=S0120-62302012000400006nrm=iso)
- [7] Ferrando-Bataller, E. A. C. A. S. M. C. M. (2006). Wideband antenna for mobile terminals based on the handset PCB resonance. *Microwave and Optical Technology Letters*, 48(7), 1408–1411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mop.21654>
- [8] Suárez, C., Ferrando Bataller, M., Valero-Nogueira, A., Gaona-García, E., Rincón, D. (2008). De la síntesis con Agrupaciones Lineales a la síntesis con Agrupaciones Circulares. *Ingeniería*, 8, 46–49.
- [9] Carlos Arturo Suárez F.Miguel, F. B. A. V. N. J. N. P. Z. (2002). Síntesis de diagramas de radiación con agrupaciones circulares de antenas aplicables en sistemas



UMTS 3G. Revista de Ingeniería Universidad Distrital, 7(2002-00-vol: nro:2), 104–108.  
<https://doi.org/10.14483/23448393.2827>

- [10] Bataller Ferrando; Nogueira, V. S. C. R. D. (2004). Antenas de múltiple haz conmutado. CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, 9, 17–19.
- [11] Suarez Carlos; Ferrando, M. G. E. A. V. (2004). Síntesis con Agrupaciones Circulares de Dipolos. Revista de Ingeniería Universidad Distrital, 30–34.  
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving/article/view/2742/3977>
- [12] Suarez Carlos A; Martin Jackson, C. D., Puerto Leguizamon, G. A. (2017). Short-Circuited Patch Antenna with Circular Polarization and Reconfigurable Sense of Rotation for Small-Sized Satellite Application. 28, 125–132. [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttextpid=S0718-07642017000600014nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttextpid=S0718-07642017000600014nrm=iso)
- [13] Rodríguez Barrera, B. E. (2019). Diseño y simulación de una antena microstrip de rango de operación de súper altas frecuencia (3.5 GHz a 6 GHz) para la evaluación de la tasa de absorción específica en tejidos humanos. <https://hdl.handle.net/10983/23934>
- [14] Werfelli, H., Tayari, K., Chaoui, M., Lahiani, M., Hamadi, G. (2016). Design of rectangular microstrip patch antenna. 798–803. <https://doi.org/10.1109/ATSIP.2016.7523197>
- [15] Balanis, C.(2005).- “Antenna Theory. Analysis and Design”.-John Wiley and Sons. Tercera Edición.
- [16] Alberto L J. (2012). DISEÑO Y DESARROLLO DE UN ARRAY BASADO EN PARCHES APILADOS PARA. <http://hdl.handle.net/10016/15601>
- [17] Yusop N.A., M. N. M. (2017). Design Optimization of Split Ring Resonator Array. 2017 Ibrahim H., Iqbal S., Teoh S., Mustaffa M. (Eds) 9th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing and Power Applications, 1–8. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-1721-6\\_56](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-1721-6_56)
- [18] Padilla, W. J., Aronsson, M. T., Highstrete, C., Lee, M., Taylor, A. J., Averitt, R. D. (2007). Electrically resonant terahertz metamaterials: Theoretical and experimental investigations. Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 75(4). <https://doi.org/10.1103/PHYSREVB.75.041102/FIGURES/2/THUMBNAI>
- [19] V. M. Jayakrishnan and M. L. Liya, “A Survey on Frequency Selective Surfaces in EM field,” 2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), 2020, pp. 671-675, doi: 10.1109/ICSSIT48917.2020.9214227.
- [20] C. Suarez. (2017). “Fundamentos para el análisis y diseño de agrupaciones de antenas”, Bogotá, Ediciones Universidad distrital.

- [21] Gomez, E. S. H. (2014). Desarrollo de un sensor de permitividad dieléctrica de bajo costo a la frecuencia de 2.45 GHz, journal = Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, url = <http://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/182>.
- [22] Brande Hernandez, D. (2012). Diseño de nuevas antenas Ultra Wideband con filtros notch integrados. Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Tecnología Electrónica y de Las Comunicaciones. <http://hdl.handle.net/10486/12103>
- [23] MATLAB. (2010). version 7.10.0 (R2010a). The MathWorks Inc.
- [24] Romeu Robert, J., Cardama Aznar, Á., Blanch Boris, S. (2004). Antenas. <https://books.google.com.co/books?id=MBGiCgAAQBAJ>
- [25] Hirtenfelder, F. (2007). Effective Antenna Simulations using CST MICRO-WAVE STUDIO®. 2007 2nd International ITG Conference on Antennas, 239. <https://doi.org/10.1109/INICA.2007.4353972>
- [26] Munteanu, I., Hänninen, I. (2012). Recent advances in CST STUDIO SUITE for antenna simulation. 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 1301–1305. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2012.6206600>
- [27] Valeria Tapia L., Patricio Mena M. Manual introductorio a HFSS. EL3002-Electromagnetismo aplicado Departamento de Ingeniería Eléctrica Facultad de ciencias físicas y matemáticas. [https://www.ucursos.cl/ingenieria/2012/1/EL3002/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=606069](https://www.ucursos.cl/ingenieria/2012/1/EL3002/1/material_docente/bajar?id_material=606069)
- [28] Introducción - FEKO - INDIELEC - Software CAD y CAE para ingeniería. (n.d.).
- [29] Alpha CLOUD - Optimización Algoritmos Programados con MATLAB. (n.d.). Retrieved September 22, 2021, from <https://www-alphaeditorialcloud-com.bdigital.udistrital.edu.co/reader/optimizacion-algoritmos-programados-con-matlab?location=32>
- [30] Universidad Politécnica, V. (2014). Manual Básico para empezar a trabajar con Macros de Visual Basic para Excel. ROGLE. <http://personales.upv.es/jpgarcia/LinkedDocuments/macrosVisualBasicParaExcel.pdf>
- [31] COM Objects in MATLAB - MATLAB Simulink. (n.d.). Retrieved September 22, 2021, from [https://www.mathworks.com/help/matlab/using-com-objects-in-matlab.html?s\\_tid=CRUX\\_lftnav](https://www.mathworks.com/help/matlab/using-com-objects-in-matlab.html?s_tid=CRUX_lftnav)
- [32] Lee, K., Kim, Y., Chung, Y. C. (2008). Design Automation of UHF RFID Tag Antenna Design Using a Genetic Algorithm Linked to MWS CST. 4th IEEE International Symposium on Electronic Design, Test and Applications (Delta 2008), 603–606. <https://doi.org/10.1109/DELTA.2008.125>

- [33] Zhong, C., Mu, X., He, X. (2019). Antenna Layout Optimization Method Based on MATLAB and CST Interactive Simulation. 2019 IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEEE), 327–329. <https://doi.org/10.1109/AUTEEEE48671.2019.9033440>
- [34] Lazović, L., Jovanović, A., Rubežić, V. (2018). Optimization of fractal antennas in CST with Chaotic optimization algorithm. 2018 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology (IT), 1–4. <https://doi.org/10.1109/SPIT.2018.8350843>
- [35] Bansal, A., Sethi, G., Sharma, S. (2018). PSO Optimized Nested Slot Structure RFID Tag Antenna at 5.8 GHz for Metallic Applications. 2018 2nd International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE), 81–84. <https://doi.org/10.1109/ICMETE.2018.00029>
- [36] Nguyen, T. D., Vuong, T. P., Duroc, Y., Vu, V. Y. (2010). Optimization Of PIFA antenna using an auto-embedded Genetic Algorithm. International Conference on Communications and Electronics 2010, 367–372. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2010.5670652>
- [37] Sahoo, A. B., Jha, S. K., Jena, M. R., Mohanty, S. K. (2015). Optimization of Circular Patch Antenna at 5GHz Using Firefly Algorithm. 2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies, 64–67. <https://doi.org/10.1109/CSNT.2015.79>
- [38] Sahoo, A. B., Mangaraj, B. B., Nag, T. S., Soni, K. (2017). Application of gravitational search algorithm in optimization of microstrip antenna at 5 GHz. 2017 2nd International Conference on Man and Machine Interfacing (MAMI), 1–4. <https://doi.org/10.1109/MAMI.2017.8307863>
- [39] Vilović, I., Burum, N., Brailo, M. (2013). Microstrip antenna design using neural networks optimized by PSO. ICECom 2013, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICECom.2013.6684759>
- [40] Nayak, C., Kumar, P. (2017). Optimized Design and Analysis of Microstrip Antenna using Artificial Neural Network. 2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC), 114–118. <https://doi.org/10.1109/CTCEEC.2017.8455084>
- [41] Kumar, M., Sahoo, A. B., Sao, R., Mangaraj, B. B. (2015). Optimization of Rectangular Patch Antenna at 5GHz Using Bat Search Algorithm. 2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies, 68–72. <https://doi.org/10.1109/CSNT.2015.47>
- [42] Mohammed, H. J., Abdulsalam, F., Abdulla, A. S., Ali, R. S., Abd-Alhameed, R. A., Noras, J. M., Abdulraheem, Y. I., Ali, A., Rodriguez, J., Abdalla, A. M. (2016). Evaluation of genetic algorithms, particle swarm optimisation, and firefly algorithms in antenna design. 2016 13th International Conference on Synthesis, Modeling,

Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), 1–4. <https://doi.org/10.1109/SMACD.2016.7520747>

- [43] Garima, Bansal, A., Sharma, S. (2017). MATLAB-CST Interfacing for a Micro-strip Patch Antenna. *Indian Journal of Science and Technology*, 10. <https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i44/120576>
- [44] Darsono, M., Wijaya, A. R. (2020). Design and simulation of a rectangular patch microstrip antenna for the frequency of 28 GHz in 5G technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1469, 12107. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1469/1/012107>
- [45] Montaser, A. M., Mahmoud, K. R., Elmikati, H. A. (2011). Slotted bow-tie antenna design for RFID readers using hybrid optimization techniques. 2011 28th National Radio Science Conference (NRSC), 1–8. <https://doi.org/10.1109/NRSC.2011.5873584>
- [46] M. Abdolahi, G. Askari and H. M. Sadeghi, "A new wideband modified biquad antenna at VHF for communication systems," 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/MMS.2016.7803873
- [47] Sayidmarie, K., Fadhel, Y. (2013). A PLANAR SELF-COMPLEMENTARY BOW-TIE ANTENNA FOR UWB APPLICATIONS. *Progress in Electromagnetics Research C*, 35, 253–267.
- [48] E. Rajo-Iglesias, O. Quevedo-Teruel and M. N. Mou-Kehn, "Optimized Design of a Miniaturized Waveguide with SRR-Loaded Lateral Walls," The Second European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2007, 2007, pp. 1-5, doi: 10.1049/ic.2007.1381.
- [49] K. Sarmah, K. K. Sarma and S. Baruah, "ANN based optimization of resonating frequency of split ring resonator," 2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Communication Systems and Networks (CICOMMS), 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/CI-CommS.2014.7014633.
- [50] Saha, C., Siddiqui, J. Y., Antar, Y. M. M. (2011). Square split ring resonator backed coplanar waveguide for filter applications. 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, 1–4. <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2011.6050665>
- [51] López Agudelo, S. Bohórquez Camacho, A.A. (2018). Caracterización de celdas metamateriales para aplicaciones en antenas - hdl:11349/14797.(n.d.). <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/14797>
- [52] A. H. Abdelrahman, A. Z. Elsherbeni and F. Yang, "Transmission Phase Limit of Multilayer Frequency-Selective Surfaces for Transmitarray Designs," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 2, pp. 690-697, Feb. 2014, doi: 10.1109/TAP.2013.2289313.

## Anexo A

### Cálculo de impedancia

Para hacer uso de la herramienta que permite el cálculo de impedancia, se debe ir a la ventana de macros del programa CST Studio versión estudiantil, ubicar la sección de cálculo y posteriormente dar clic en ‘Ímpedance calculation’, esto desplegará la ventana de la Figura A.1. Esta herramienta permite, como su nombre lo dice, realizar el cálculo de impedancia, para varios tipos de línea de transmisión (12 opciones en total), dentro de las cuales están el cable coaxial, líneas microstrip, stripline, entre otras.

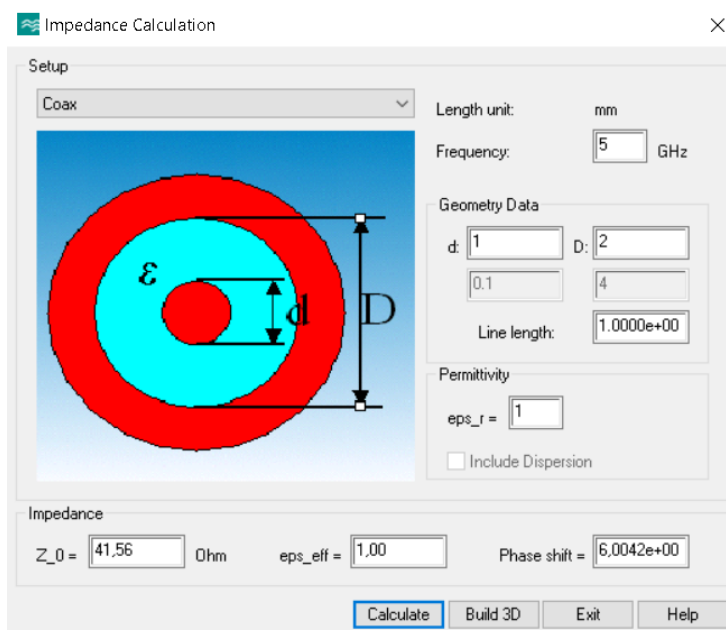


Figura A.1: Herramienta para cálculo de impedancia, según el software electromagnético.

De manera general, cada una de las líneas, tienen una posible configuración en cuanto a su geometría, frecuencia, y condiciones de dieléctrico, cada una de estas opciones permite ser modificada de acuerdo con las unidades configuradas en el entorno de trabajo. Finalmente, mediante

el botón calcular, la herramienta permite encontrar el valor de la impedancia característica de la línea, la cual resulta de utilidad para verificar los cálculos propios, etc.

## Anexo B

### Coeficiente de extensión

Para hacer uso de la herramienta que permite calcular el coeficiente de extensión, se debe ir a la ventana de macros del programa CST Studio versión estudiantil, ubicar la sección solver, luego ports y por último dar clic en ‘Calculate port extension coefficient’, esto desplegará la ventana de la Figura B.1.

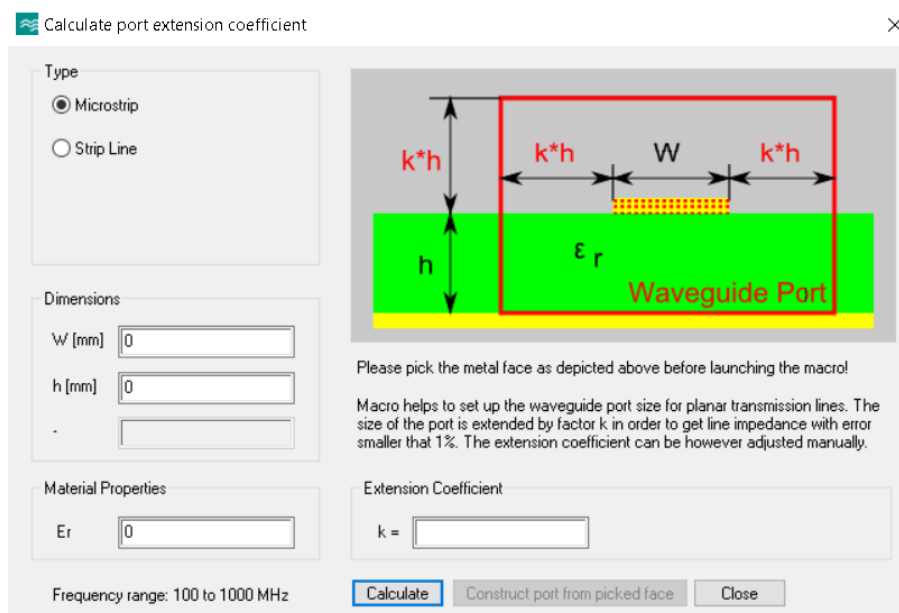
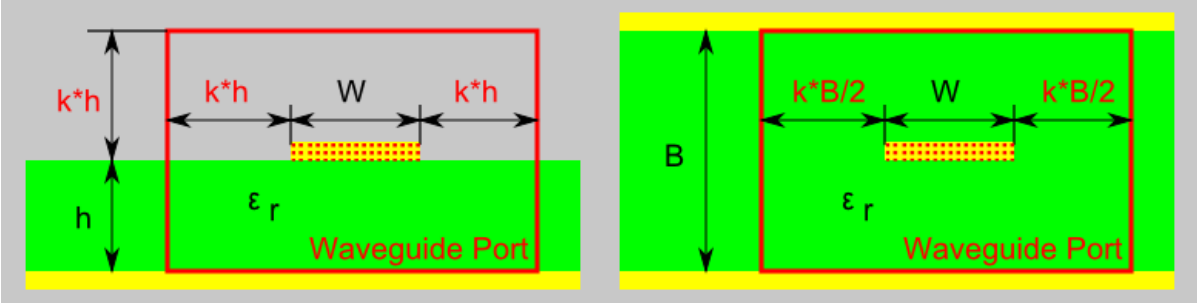


Figura B.1: Herramienta para cálculo de coeficiente K.

Esta herramienta permite realizar el cálculo del coeficiente K para líneas Microstrip y Strip line, de acuerdo con los diagramas de la Figura B.2. Para efectuar la operación deseada, la herramienta requiere que el usuario ingrese el ancho de la línea W, el espesor del sustrato h o B según corresponda, y la constante dieléctrica del material de trabajo  $\epsilon_r$ . Una vez dichos parámetros sean proporcionados, y se presione el botón de calcular, se calcula el coeficiente k, y por ende ya es posible realizar la construcción del puerto para cada una de estas líneas,

teniendo en cuenta las dimensiones especificadas.



(a) Microstrip

(b) Stripline

Figura B.2: Opciones de cálculo disponibles, según el software electromagnético.