

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención  
del título de Ingeniera Electrónica

**PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO:**

**IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE  
OPTIMIZACIÓN EN EL DISEÑO DE ANTENAS  
PLANARES**

**AUTORA:**

PAOLA MARIBEL GUAMÁN PEÑA

**TUTOR:**

ING. JUAN PABLO BERMEO MOYANO

CUENCA – ECUADOR

2018

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Paola Maribel Guamán Peña, con documento de identificación N° 0105725014, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de titulación: **IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN EN EL DISEÑO DE ANTENAS PLANARES**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniera Electrónica*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 03 de diciembre del 2018



Paola Maribel Guamán Peña

CI: 0105725014

AUTORA

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi **tutoría** fue desarrollado el trabajo de titulación: **IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN EN EL DISEÑO DE ANTENAS PLANARES**, realizado por Paola Maribel Guamán Peña, obteniendo el *Proyecto Técnico con Enfoque Investigativo* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 03 de Diciembre del 2018



Ing. Juan Pablo Bermeo Moyano

CI: 0102645884

**TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Paola Maribel Guamán Peña, con número de cédula CI.0105725014, autora del trabajo de titulación: **IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN EN EL DISEÑO DE ANTENAS PLANARES**, certifico que el total contenido del *Proyecto Técnico con Enfoque Investigativo* es de mi exclusiva responsabilidad y autoría

Cuenca, 03 de diciembre del 2018



Paola Maribel Guamán Peña

CI:0105725014

AUTORA

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por mis padres, por permitir que todo sucediera.

A mi papá José y mi mamá Susana quienes son mi fuerza, les agradezco infinitamente por todo su apoyo, sus sacrificios, para darme la oportunidad de tener una profesión, por todo el amor que siempre me han dado.

A mis hermanos y mi sobrino ya que su apoyo ha sido fundamental en todos los momentos que he tenido que pasar a lo largo de la carrera y siempre han estado ahí dándome ánimos.

A la Universidad Politécnica Salesiana por el tipo de formación que brinda a los estudiantes no solo profesional sino humana.

A mi tutor de tesis, Ing. Juan Pablo Bermeo, por su asesoría, recomendaciones y tiempo para llevar a cabo el proyecto de tesis.

Un agradecimiento especial al Ing. Fernando Guerrero, por confiar en mí, por permitirme realizar este proyecto, por todo su apoyo, así como también a la línea de investigación “Diseño, Construcción y Prueba de Antenas Fractales y de Ultra Ancho de Banda” y a todos sus miembros.

A mis amigos por los momentos compartidos, por estar ahí para escucharme y ayudarme en los momentos difíciles.

Sinceramente Muchas Gracias

***Paola Maribel Guamán Peña***

## **DEDICATORIAS**

Si a alguien le debo tanto en esta vida es a mis padres, por ustedes soy lo que soy y los quiero tanto, esta meta cumplida está dedicada a ustedes, todo este trabajo ha sido posible gracias a ustedes, porque a pesar de todos los obstáculos, hemos podido salir adelante y nada ha sido en vano. También quiero dedicar este trabajo a mis hermanos Pedro y Estefanía y de la misma forma a mi sobrino Josué, quién siendo tan pequeño me enseñó a luchar por la vida.

**Paola Maribel Guamán Peña**

# ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos .....	I
Dedicatorias.....	II
Índice General .....	III
Índice de Figuras .....	VIII
Índice de Tablas .....	XI
Resumen.....	XIII
Introducción .....	XIV
Antecedentes del Problema de Estudio .....	XVI
Justificación.....	XVIII
Objetivos .....	XIX
OBJETIVO GENERAL .....	XIX
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	XIX
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE. ....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. DEFINICIÓN DE ANTENA .....	2
1.3. PARÁMETROS BÁSICOS DE ANTENAS .....	2
1.3.1. Patrón de Radiación .....	2
1.3.2. Tipos de Patrones de Radiación .....	3
1.3.3. Factores de Análisis del Patrón de Radiación .....	4
1.3.4. Ancho de Haz.....	5
1.3.5. Densidad de Potencia Radiada.....	5
1.3.6. Intensidad de Radiación .....	6
1.3.7. Directividad y Ganancia.....	7
1.3.8. Eficiencia.....	8
1.3.9. Polarización.....	8
1.3.10. Impedancia de Entrada .....	10
1.3.11. Parámetros S .....	11
1.3.12. Coeficiente de Reflexión, SWR y Pérdidas de Retorno .....	13
1.3.13. Ancho de Banda .....	14
1.3.14. Factor de Antena .....	15
1.3.15. Área Efectiva .....	15
1.4. TIPOS DE ANTENAS .....	16
1.4.1. Antenas Alámbricas .....	16
1.4.2. Antenas de Apertura.....	16
1.4.3. Antenas Planares .....	17

1.4.4.	Antenas con Reflector .....	17
1.4.5.	Antenas de Banda Ancha .....	18
1.4.6.	Arreglos de Antenas .....	18
1.5.	ANTENAS PLANARES .....	20
1.5.1.	Características Generales .....	20
1.5.2.	Métodos de Alimentación .....	22
1.5.3.	Métodos de Análisis .....	24
1.6.	ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN.....	26
1.6.1.	Optimización .....	26
1.6.2.	Tipos de Algoritmos de Optimización Metaheurísticos.....	26
1.6.3.	Uso de Algoritmos de Optimización Metaheurísticos en el Diseño de Antenas 29	
1.7.	OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO, PARTICLE SWARM OPTIMIZATION) .....	31
1.7.1.	Terminología Utilizada en PSO .....	32
1.7.2.	Desarrollo del Algoritmo .....	32
1.8.	ALGORITMO DESTELLO DE LUCIÉRNAGAS (FA, FIREFLY ALGORITHM) .....	36
1.8.1.	Desarrollo del Algoritmo .....	37
1.9.	ALGORITMO DE ECOLOCALIZACIÓN DE LOS MURCIÉLAGOS (BA, BAT ALGORITHM) .....	40
1.9.1.	Algoritmo Estándar .....	41
1.9.2.	Algoritmo de Ecolocalización Direccional de los Murciélagos (dBA, Directional Bat Algorithm) .....	42
CAPÍTULO 2. CRITERIOS DE DISEÑO.....		47
2.1.	INTRODUCCIÓN.....	47
2.2.	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO.....	47
2.2.1.	Forma del Parche.....	47
2.2.2.	Frecuencia de Operación.....	48
2.3.	SUSTRATO .....	50
2.3.1.	Sustrato Dieléctrico FR-4.....	50
2.3.2.	Constante Dieléctrica del Sustrato .....	51
2.3.3.	Espesor del Sustrato .....	52
2.4.	DISEÑO DE ANTENA PATCH RECTANGULAR.....	53
2.4.1.	Diseño del Parche Radiador .....	53
2.4.2.	Distancia de la Alimentación .....	55
2.5.	DISEÑO DE ANTENA PATCH CIRCULAR .....	58



2.5.1.	Diseño del Parche Radiador .....	58
2.5.2.	Distancia de la Alimentación .....	59

**CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DISEÑO DE ANTENAS PLANARES .....** 61

3.1.	INTRODUCCIÓN.....	61
3.2.	MATLAB .....	62
3.3.	ANSYS HFSS .....	62
3.4.	MODELADO Y SIMULACIÓN EN ANSYS HFSS .....	63
3.4.1.	Modelado de la Estructura .....	63
3.4.2.	Asignación de Condiciones de Contorno.....	64
3.4.3.	Excitación.....	64
3.4.4.	Configuración de la Solución.....	64
3.4.5.	Ejecución de la Simulación por MEF (Validación y Análisis).....	65
3.4.6.	Postproceso .....	65
3.5.	SCRIPTING EN ANSYS HFSS .....	66
3.5.1.	Jerarquía .....	66
3.6.	COMUNICACIÓN ENTRE MATLAB Y ANSYS HFSS .....	68
3.6.1.	Dimensiones de la Estructura.....	69
3.6.2.	Generación del Fichero VBScript .....	69
3.6.3.	Ejecución del Script .....	74
3.6.4.	Datos en MATLAB.....	75
3.7.	EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS PARA EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN .....	76
3.7.1.	Fichero VBScript .....	78
3.7.2.	Ejecución.....	79
3.7.3.	Datos .....	79
3.8.	PROCEDIMIENTOS GENERALES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS.....	80
3.8.1.	Variables Establecidas de las Estructuras para la Optimización.....	80
3.8.2.	Función Objetivo.....	81
3.8.3.	Refrescar Programa.....	82
3.9.	IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PSO .....	83
3.9.1.	Parámetros de la Antena.....	84
3.9.2.	Problema de Optimización.....	84
3.9.3.	Parámetros del Algoritmo .....	85
3.9.4.	Inicialización .....	86
3.9.5.	Evaluación.....	86
3.9.6.	Comparación y Actualización .....	87

3.9.7.	Datos del Proceso de Optimización .....	88
3.10.	IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO FA .....	90
3.10.1.	Parámetros de la Antena .....	91
3.10.2.	Problema de Optimización .....	91
3.10.3.	Parámetros del Algoritmo .....	91
3.10.4.	Inicialización .....	92
3.10.5.	Evaluación .....	92
3.10.6.	Movimiento de las Luciérnagas .....	93
3.10.7.	Datos del Proceso de Optimización.....	93
3.11.	IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO dBA.....	96
3.11.1.	Parámetros de la Antena .....	97
3.11.2.	Problema de Optimización .....	97
3.11.3.	Parámetros del Algoritmo .....	97
3.11.4.	Inicialización .....	99
3.11.5.	Evaluación .....	99
3.11.6.	Movimiento de los Murciélagos .....	99
3.11.7.	Datos del Proceso de Optimización.....	100
CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS.....		103
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	103
4.2.	SIMULACION DE ANTENAS DISEÑADAS CON MÉTODOS CONVENCIONALES .....	104
4.2.1.	Antena Patch Rectangular .....	104
4.2.2.	Antena Patch Circular .....	105
4.3.	RESULTADOS OBTENIDOS DE LA OPTIMIZACIÓN PARA LA ANTENA PATCH RECTANGULAR .....	107
4.3.1.	PSO .....	107
4.3.2.	FA.....	110
4.3.3.	DBA .....	114
4.3.4.	Gráfica Comparativa .....	116
4.4.	RESULTADOS OBTENIDOS DE LA OPTIMIZACIÓN PARA ANTENA PATCH CIRCULAR .....	118
4.4.1.	PSO .....	118
4.4.2.	FA.....	121
4.4.3.	DBA .....	124
4.4.1.	Gráfica Comparativa .....	126
4.5.	CONSTRUCCIÓN DE LAS ANTENAS .....	128
4.6.	MEDICIÓN DE ANTENAS CONSTRUIDAS .....	130
4.7.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	136

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	141
5.1. CONCLUSIONES.....	141
5.2. RECOMENDACIONES .....	144
Referencias Bibliográficas .....	145
Apéndices.....	151
APÉNDICE A: FLUJOGRAMA DE LA COMUNICACIÓN ENTRE MATLAB Y ANSYS HFSS	152
APÉNDICE B: DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE MEDIDA.....	153
PXI.....	153
DIRECTIONAL COUPLER.....	154

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 (a) Patrón de radiación en coordenadas polares (b) Patrón de radiación tridimensional (c) Patrón de radiación en coordenadas cartesianas.....	3
Figura 1.2 Estereorradián.....	6
Figura 1.3 Directividad de una antena .....	7
Figura 1.4 Tipos de polarización .....	10
Figura 1.5 Antena en modo transmisión, en donde se representan los terminales ....	10
Figura 1.6 Esquema de la red de dos puertos .....	12
Figura 1.7 Esquema de antena conectada a generador.....	13
Figura 1.8 Ancho de banda .....	14
Figura 1.9 Antena Dipolo.....	16
Figura 1.10 Antena de apertura, bocina. ....	17
Figura 1.11 Antena Microstrip.....	17
Figura 1.12 Antena Parabólica.....	18
Figura 1.13 Antena Yagi.....	18
Figura 1.14 Ejemplo de Array Lineal de Antenas Parabólicas .....	19
Figura 1.15 Estructura de antena planar.....	20
Figura 1.16 Formas del parche .....	21
Figura 1.17 Alimentación mediante línea Microstrip .....	22
Figura 1.18 Alimentación con sonda coaxial.....	22
Figura 1.19 Acoplamiento de apertura .....	23
Figura 1.20 Acoplamiento por proximidad.....	23
Figura 1.21 Longitud efectiva de la antena planar.....	24
Figura 1.22 Desbordamiento del campo eléctrico .....	25
Figura 1.23 Ejemplo de distribución de campos en una cavidad .....	25
Figura 1.24 Clasificación de los algoritmos metaheurísticos, ejemplos y nomenclatura. ....	28
Figura 1.25 Bandadas de aves y bancos de peces.....	31
Figura 1.26 Partícula PSO.....	33
Figura 1.27 Luciérnagas .....	36
Figura 1.28 Ecolocalización de los murciélagos. ....	40
Figura 1.29 Esquema comportamiento de ecolocalización direccional. ....	43
Figura 2.1 Formas de parche, rectangular y circular con inserción.....	48

Figura 2.2 Circuito equivalente para el modelo de línea de transmisión.....	55
Figura 3.1 Modelado en Ansys HFSS.....	63
Figura 3.2 Jerarquía utilizada en Ansys HFSS.....	67
Figura 3.3 Diagrama de flujo general de la comunicación MATLAB-HFSS .....	68
Figura 3.4 Script para Ansys Electronics Desktop.....	71
Figura 3.5 Archivo de envío de datos desde HFSS a MATLAB .....	75
Figura 3.6 Diagrama de flujo del proceso de evaluación mediante la comunicación .....	76
Figura 3.7 Variables creadas para el proyecto en HFSS.....	77
Figura 3.8 Creación del parche mediante variables.....	77
Figura 3.9 Creación del feed mediante variables. ....	78
Figura 3.10 Variables para la optimización .....	80
Figura 3.11 Diagrama de flujo del proceso de optimización mediante PSO.....	83
Figura 3.12 Variación del peso inercial.....	86
Figura 3.13 Datos de evaluación de la primera iteración para PSO. ....	88
Figura 3.14 $S_{11}$ de las 10 partículas para la primera iteración a 3GHz. ....	89
Figura 3.15 Resultados del proceso de evaluación para la iteración 1.....	89
Figura 3.16 Diagrama de flujo del proceso de optimización mediante FA. ....	90
Figura 3.17 Comportamiento de alfa con respecto a las iteraciones. ....	92
Figura 3.18 Individuos de la primera iteración para la optimización mediante FA. ....	94
Figura 3.19 $S_{11}$ de las 10 fireflies de la primera iteración para 2.1GHz. ....	94
Figura 3.20 Resultados del proceso para la primera iteración .....	95
Figura 3.21 Diagrama de flujo del proceso de optimización mediante dBA. ....	96
Figura 3.22 Comportamiento de la tasa de pulso y del volumen con respecto a las iteraciones.....	98
Figura 3.23 Individuos de la primera iteración para la optimización mediante dBA. ....	100
Figura 3.24 $S_{11}$ de los 10 individuos, para la primera iteración a 2.4GHz.....	100
Figura 3.25 Resultados del proceso para la primera iteración con dBA. ....	101
Figura 4.1 Antena planar rectangular simulada.....	104
Figura 4.2 Parámetro de reflexión de la antena rectangular .....	105
Figura 4.3 Impedancia de la antena rectangular.....	105
Figura 4.4 Antena planar circular simulada.....	106
Figura 4.5 Parámetro de reflexión de la antena circular. ....	106

Figura 4.6 <i>Impedancia de la antena planar circular.</i> .....	107
Figura 4.7 <i>Procesos de optimización usando PSO.</i> .....	108
Figura 4.8 <i>Soluciones óptimas obtenidas para PSO.</i> .....	109
Figura 4.9 <i>Impedancia de las estructuras optimizadas en PSO.</i> .....	110
Figura 4.10 <i>Procesos de optimización usando FA.</i> .....	111
Figura 4.11 <i>Soluciones óptimas obtenidas para FA.</i> .....	112
Figura 4.12 <i>Impedancia de las estructuras optimizadas en FA.</i> .....	113
Figura 4.13 <i>Procesos de optimización usando dBA.</i> .....	114
Figura 4.14 <i>Soluciones óptimas obtenidas para dBA.</i> .....	115
Figura 4.15 <i>Impedancias de las estructuras optimizadas en dBA.</i> .....	116
Figura 4.16 <i>Comparativa de S11 para la antena rectangular de 2.4GHz.</i> .....	117
Figura 4.17 <i>Procesos de optimización de antena circular mediante PSO.</i> .....	118
Figura 4.18 <i>Soluciones óptimas obtenidas para PSO en la antena circular.</i> .....	119
Figura 4.19 <i>Impedancias obtenidas de las estructuras para PSO.</i> .....	120
Figura 4.20 <i>Procesos de optimización para antena circular mediante FA.</i> .....	121
Figura 4.21 <i>Soluciones óptimas obtenidas para la antena circular mediante FA.</i> ..	122
Figura 4.22 <i>Impedancias de las estructuras obtenidas mediante FA.</i> .....	123
Figura 4.23 <i>Procesos de optimización para la antena circular mediante dBA.</i> .....	124
Figura 4.24 <i>Soluciones óptimas obtenidas mediante dBA, para la antena circular.</i>	125
Figura 4.25 <i>Impedancias de las antenas circulares obtenidas mediante dBA.</i> .....	126
Figura 4.26 <i>Comparativa de S11 para la antena planar circular de 2.4GHz.</i> .....	127
Figura 4.27 <i>Antena planar rectangular en CAD.</i> .....	128
Figura 4.28 <i>Antena planar circular en CAD.</i> .....	129
Figura 4.29 <i>Conector SMA utilizado.</i> .....	129
Figura 4.30 <i>Antena planar rectangular construida.</i> .....	130
Figura 4.31 <i>Potencia reflejada por la antena.</i> .....	131
Figura 4.32 <i>Resultados de S11 para la antena planar rectangular.</i> .....	131
Figura 4.33 <i>Coefficiente de reflexión en función de la frecuencia.</i> .....	132
Figura 4.34 <i>SWR en función de la frecuencia.</i> .....	132
Figura 4.35 <i>Antena planar circular construida.</i> .....	133
Figura 4.36 <i>Potencia reflejada por la antena circular.</i> .....	133
Figura 4.37 <i>Resultados de S11 para la antena planar circular.</i> .....	134
Figura 4.38 <i>Coefficiente de reflexión de la antena planar circular.</i> .....	134
Figura 4.39 <i>SWR en función de la frecuencia de la antena planar circular.</i> .....	135

Figura 4.40 <i>Comparativa de convergencia de los algoritmos de optimización metaheurísticos.</i> .....	138
Figura 4.41 <i>Comparativa de convergencia para la antena planar circular.</i> .....	139
Figura 4.42 <i>Comparativa de S11 para la antena planar rectangular.</i> .....	139
Figura 4.43 <i>Comparativa de S11 para la antena planar circular.</i> .....	140
Figura A.1 <i>Flujograma de la comunicación MATLAB-Ansys HFSS.</i> .....	152
Figura B.2 <i>NI PXIe-1075 Laboratorio de Telecomunicaciones UPS</i> .....	154
Figura B.3 <i>Directional Coupler Laboratorio de Telecomunicaciones UPS.</i> .....	155

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Descripción de los parámetros S para una red de dos puertos [14]. .....	12
Tabla 2.1 Bandas de frecuencia [42]. .....	49
Tabla 2.2 Bandas de frecuencia microonda [42]. .....	49
Tabla 2.3 Sustratos para antenas parche [43]. .....	51
Tabla 2.4 Parámetros de diseño de la antena patch. ....	53
Tabla 3.1 Variables de la antena planar rectangular. ....	81
Tabla 3.2 Variables de la antena planar circular. ....	81
Tabla 3.3 Espacio de búsqueda para las variables de optimización (Antena Rectangular) .....	84
Tabla 3.4 Espacio de búsqueda para las variables de optimización (Antena Circular) .....	84
Tabla 3.5 Límites de velocidad (Antena Rectangular) .....	85
Tabla 3.6 Límites de velocidad (Antena Circular) .....	85
Tabla 3.7 Parámetros de PSO para la optimización. ....	85
Tabla 3.8 Parámetros de FA para la optimización. ....	91
Tabla 3.9 Parámetros de dBA para la optimización. ....	97
Tabla 4.1 Resultados obtenidos para PSO. ....	108
Tabla 4.2 Resultados obtenidos para FA. ....	111
Tabla 4.3 Resultados obtenidos para dBA. ....	114
Tabla 4.4 Resultados obtenidos para la antena circular mediante PSO. ....	119
Tabla 4.5 Resultados obtenidos para la antena circular mediante FA. ....	121
Tabla 4.6 Resultados obtenidos para la antena circular mediante dBA. ....	124

Tabla 4.7 Resultados de convergencia para la antena planar rectangular.....	137
Tabla 4.8 Resultados de convergencia para la antena planar circular.....	138



## RESUMEN

En este proyecto se presenta un estudio comparativo del funcionamiento de tres algoritmos de optimización metaheurísticos de inteligencia de enjambre denominados Optimización de Enjambre de Partículas (PSO, Particle Swarm Optimization), Destello de Luciérnagas (FA, Firefly Algorithm) y Ecolocalización Direccional de los Murciélagos (dBA, Directional Bat Algorithm), como técnicas de optimización para el diseño de antenas planares o también denominadas de tipo parche, en un entorno de comunicación, envío y recepción de datos para simulación, mediante MATLAB y Ansys HFSS. Para lo cual se realizó primeramente una investigación preliminar sobre antenas y sus características profundizando en el estudio de antenas planares, sus diferentes parámetros y el proceso de diseño convencional, luego se realiza una síntesis acerca de los algoritmos de optimización metaheurísticos, sus tipos y aplicaciones y las principales características de los algoritmos mencionados. Además, para la implementación también fue necesario recopilar información acerca del software de simulación Ansys HFSS y su funcionamiento en conjunto con el software MATLAB, para establecer el entorno de optimización realizando la evaluación mediante las simulaciones. El objetivo es realizar el diseño de las antenas mejorando las características de acoplamiento a una frecuencia deseada, para lo cual intervienen parámetros como las pérdidas de retorno y la impedancia, los cuales se introducen en una función de optimización de minimización, que ocupa los datos del simulador para obtener un valor de costo. Se realizó la implementación de los algoritmos para el diseño de antenas de tipo rectangular y circular con inserción, dentro de este proceso es necesario definir una población inicial, las variables a optimizar y su dominio, es decir el espacio de búsqueda, luego se realizan pruebas de funcionamiento para diferentes frecuencias establecidas, para cada uno de los algoritmos, logrando obtener resultados satisfactorios para el diseño de las antenas, posteriormente se realiza un análisis de los resultados de los algoritmos y para corroborar estos, se fabrican dos de las antenas diseñadas y se realiza la medición, de acuerdo con todo lo expuesto anteriormente se puede determinar que los procesos de diseño mediante los algoritmos metaheurísticos en conjunto con la simulación proporcionan una herramienta eficaz para el diseño de este tipo de estructuras.

# INTRODUCCIÓN

Las antenas planares son muy utilizadas actualmente y la investigación de su diseño está en auge por los nuevos sistemas de comunicación en las que se las utiliza, pero es importante que sus parámetros sean los adecuados, además el diseño teórico de este tipo de antenas no siempre resulta eficaz, por lo que se presentan los algoritmos de optimización metaheurísticos en conjunto con la simulación, como una herramienta muy eficiente para el proceso de diseño.

La inteligencia de enjambre es imitada de organismos de la naturaleza que presentan una organización entre sí y esta comunicación entre los miembros de una misma población hace que sea posible encontrar un valor óptimo global. En este proyecto se han utilizado algoritmos de optimización metaheurísticos de inteligencia de enjambre para el diseño de antenas tipo patch.

Siendo los objetivos principales el establecer el entorno entre dos softwares, la implementación de los algoritmos mencionados para el diseño de las antenas y evaluar los resultados, para este propósito se describe el desarrollo del proyecto estructurado en cinco capítulos para una mejor comprensión.

En el primer capítulo se presentan los fundamentos teóricos de las antenas, sus principales parámetros de estudio, se realiza también una revisión de los aspectos fundamentales de las antenas planares, luego se estudia de forma preliminar los procesos de optimización y se realiza una categorización de los diferentes algoritmos de optimización metaheurísticos, se presenta un conciso estado del arte de este tipo de técnicas en antenas y se realiza un análisis de las técnicas de optimización que se utilizarán para el diseño.

Antes de realizar la implementación es necesario establecer una base, este proceso se presenta en el segundo capítulo de esta tesis en donde se establecen los criterios de diseño que serán utilizados en la optimización, las formas y parámetros de diseño, el material utilizado y se describe el proceso de diseño teórico.

En el capítulo tres se presentan las herramientas utilizadas para la optimización, se describe el proceso necesario en el simulador para la evaluación de una estructura y cómo es posible realizarlo de forma automática desde MATLAB, se

definen procesos generales para los tres algoritmos y se detalla el proceso de implementación de los mismos.

Se realizan varias pruebas en los algoritmos implementados tanto para la antena rectangular como para la circular, los resultados de las simulaciones y de los procesos de optimización se presentan en el capítulo cuatro, en donde también se muestran las antenas fabricadas, los resultados de las mediciones y se realiza un análisis preciso de todos los resultados obtenidos.

Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones derivadas de todo el proceso de implementación de algoritmos y diseño de antenas expuestos en este trabajo, así como las posibles mejoras y líneas futuras del proyecto de investigación.

## ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

En la actualidad y gracias al acelerado desarrollo tecnológico, los sistemas de comunicación inalámbricos han crecido a gran velocidad, presentando avances que además de mejorar el desempeño de los dispositivos, impulsan la miniaturización, la eficiencia energética y reducen su costo de producción.

Una parte fundamental en los sistemas de telecomunicaciones son las antenas o elementos radiantes, que no han quedado de lado en el tema de la miniaturización, sin descuidar el mejoramiento del desempeño [1], [2]. Existen varios tipos de antenas que son utilizadas en función de los requerimientos de los sistemas. Uno de los modelos más utilizados actualmente, sobre todo en dispositivos móviles, es el de las antenas planares, también conocidas como antenas tipo parche o de tecnología Microstrip. Este tipo de antenas se utiliza en aplicaciones donde los requerimientos de espacio, peso, costo y facilidad de instalación son indispensables. Las principales aplicaciones donde pueden ser enfocadas son los equipos móviles inalámbricos, sistemas de seguridad, satélites, entre otros [3]. Las antenas planares presentan soluciones versátiles en múltiples aplicaciones en las que se necesita un elemento radiante, sin embargo, existe también inconvenientes relacionados con el ancho de banda reducido o la radiación espuria [4]. Las antenas planares operan generalmente en rangos de frecuencia altos con el objetivo de tener dimensiones reducidas, pero surge la necesidad de conseguir la ganancia adecuada en frecuencias de resonancia específicas y un buen nivel de adaptación según las aplicaciones [5].

La eficiencia de las antenas depende de su diseño, por lo que para mejorar las características se presenta el uso de algoritmos de optimización metaheurísticos que mejoran parámetros específicos de las antenas. Los algoritmos de optimización metaheurísticos son una nueva clase de algoritmos de búsqueda, los cuales combinan los métodos heurísticos con estructuras de mayor nivel con el objetivo de alcanzar índices de eficiencia y efectividad más altos en la exploración del espacio de búsqueda. A diferencia de los heurísticos, los metaheurísticos orientan la búsqueda dependiendo de la evolución del proceso. Los algoritmos de optimización metaheurísticos basados en la naturaleza simulan la selección natural y la adaptación que se encuentra en el medio ambiente, así como los comportamientos sociales de diferentes especies [6], [7].

Los algoritmos de optimización metaheurísticos han sido probados en la solución de varios tipos de problemas [8]. Sin embargo, en el ámbito de las telecomunicaciones, existen aún un amplio abanico de posibilidades y es preciso probar con diversas metodologías que nos permitan mejorar la eficiencia de los dispositivos.

## JUSTIFICACIÓN

El elemento radiante o antena, es una de las partes más importantes de un sistema de comunicación, por lo que parámetros como el ancho de banda, frecuencia de operación, diagrama de radiación, acoplamiento, ganancia y dimensiones deben presentar características adecuadas para aplicaciones específicas.

Los algoritmos de optimización metaheurísticos surgen como una técnica innovadora para mejorar las características de antenas planares, basada en procesos iterativos que logran converger en resultados próximos a los ideales.

Si bien los algoritmos de optimización metaheurísticos han sido utilizados en múltiples áreas de la ciencia, es preciso una incursión de mayor profundidad en el ámbito de las telecomunicaciones.

Es cierto que las simulaciones permiten realizar un buen análisis de las antenas, pero con los procedimientos de diseño generalmente establecidos en muchas ocasiones no se obtienen los resultados deseados y realizar una optimización de manera manual puede requerir horas de interacción sin resultados satisfactorios, es por esto que se hace necesario la implementación y estudio de diferentes técnicas de optimización que permitan automatizar el proceso de diseño.

Este proyecto tiene como finalidad obtener una base sólida para el estudio de Algoritmos de Optimización Metaheurísticos basados en la naturaleza y su aplicación en el diseño de las antenas planares. La investigación se enfatiza en este tipo de antenas debido a que en el campo de las comunicaciones inalámbricas presentan diversas aplicaciones, principalmente por la resistencia mecánica que poseen. Esta característica es fundamental para ser utilizada en los dispositivos inalámbricos. Otra particularidad que refleja la importancia de las antenas planares es el tamaño que pueden llegar a tener, que las convierte en soluciones idóneas para usos en UHF y frecuencias más altas.

# OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

- Diseñar antenas planares mediante la implementación de algoritmos de optimización metaheurísticos, evaluando los resultados obtenidos de cada uno de ellos.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la información bibliográfica con respecto a los Algoritmos de Optimización Metaheurísticos, seleccionando los tres más apropiados para la implementación.
- Desarrollar una comunicación entre Matlab y Ansys HFSS para la implementación de los algoritmos y simulación de los parámetros de las antenas.
- Implementar los algoritmos seleccionados en el diseño de antenas planares.
- Construir las antenas diseñadas para la medición de los diferentes parámetros de radiación.
- Validar los resultados medidos comparándolos con los simulados.





# **CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE.**

## **1.1. INTRODUCCIÓN**

La historia de las antenas tiene su origen en 1864 con James Clerk Maxwell, quien elaboró los principios de las ondas de radio y el espectro electromagnético, la invención de la primera antena se dio en el año 1887 gracias a Heinrich Hertz, asimismo, se conoce que el inicio de las comunicaciones inalámbricas se dio en 1897 gracias a Guglielmo Marconi [3], estos tres sucesos originaron lo que se conoce como la Era de la Antena, posteriormente durante la Segunda Guerra Mundial se introdujeron diferentes tipos de antenas para diversas aplicaciones, el acelerado desarrollo tecnológico desde esta época ha tenido un impacto significativo también en el campo de las antenas, por otra parte aunque el diseño de antenas al principio era considerado como algo secundario, en el presente juega un papel fundamental en el desarrollo de sistemas de comunicaciones, ya que en la actualidad el buen funcionamiento de los mismos depende en gran medida del diseño y rendimiento de la antena.

En este capítulo se tratan los principales conceptos sobre antenas necesarios para el análisis y comprensión del trabajo realizado en este estudio. Además, se presenta el fundamento teórico de los algoritmos de optimización que se utilizarán posteriormente para el diseño de las antenas.

## **1.2. DEFINICIÓN DE ANTENA**

El “Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos” (IEEE), mediante su publicación IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas (IEEE Std 145-2013) define a una antena como *"La parte de un sistema transmisor o receptor que está diseñado para radiar o recibir ondas electromagnéticas"*[9].

Como concepto fundamental la antena es aquella estructura en donde se produce la transición entre el dispositivo guía y el espacio libre o viceversa, esto depende de la función de la antena, la cual puede ser de transmisión o de recepción. En una antena transmisora el dispositivo guía o denominado también como línea de transmisión, se utiliza para el transporte de la energía electromagnética hacia la antena mientras que en recepción será desde la antena hacia el receptor [3].

Dependiendo del tipo de aplicación la antena deberá cumplir con diferentes parámetros o especificaciones tanto para la radiación de la energía o para la recepción en la que se realiza el sondeo de la señal, de allí la importancia del estudio de estos dispositivos, para describir el comportamiento es necesario la definición de varios parámetros fundamentales que caracterizan a la antena.

## **1.3. PARÁMETROS BÁSICOS DE ANTENAS**

La antena es uno de los elementos más importantes dentro del sistema de comunicaciones, debido a que en la mayor parte de aplicaciones son la única forma en la que se puede transmitir la información, pero este dispositivo tiene que trabajar en conjunto con los demás elementos del sistema, por lo que debe ser posible evaluar el efecto de la antena sobre el sistema. En esta sección se puntualizan los parámetros esenciales para la definición de una antena.

### **1.3.1. PATRÓN DE RADIACIÓN**

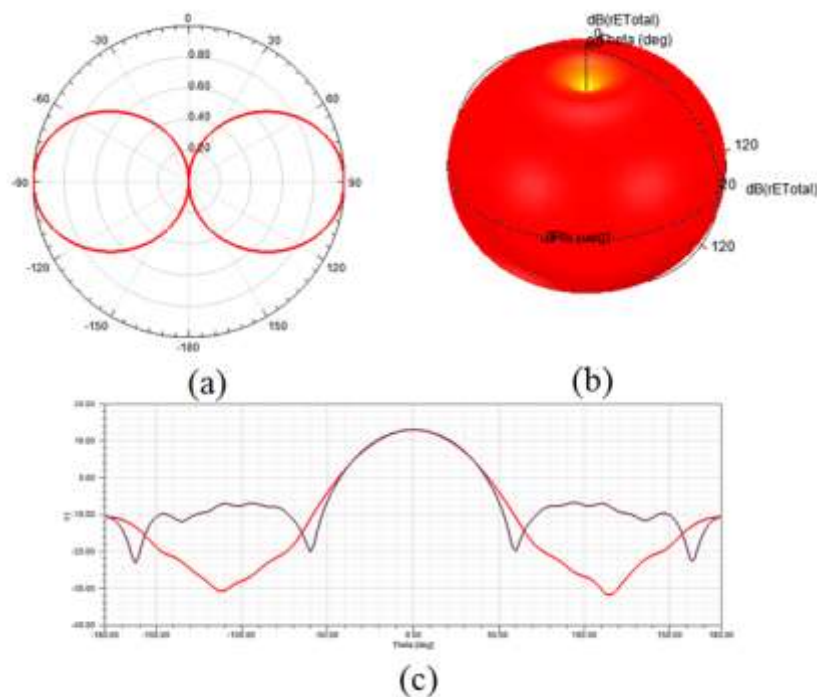
De acuerdo con [9] el patrón de radiación es la representación espacial de una cantidad que caracteriza el campo electromagnético generado por la antena, esta distribución puede expresarse tanto de forma matemática mediante una función como por medio de una representación gráfica, la cual es la más común. En otras palabras, el diagrama de radiación de una antena es una descripción de las características de radiación de la antena en función de las coordenadas que la ubican en el espacio, a una distancia fija. Las propiedades de radiación incluyen la densidad de flujo de

potencia, intensidad de radiación, de campo, directividad y fase, sin embargo es habitual la representación del campo eléctrico ya que de él se puede derivar el campo magnético y la densidad de potencia [10].

### 1.3.2. TIPOS DE PATRONES DE RADIACIÓN

El diagrama de radiación expresa las propiedades direccionales de radiación de la antena en el espacio, en donde la distribución de energía está en función de la posición de un observador y a lo largo de una superficie de radio constante. Existen diversas formas de representación.

De acuerdo con la magnitud que se representa el patrón puede representar diagramas de campo o de potencia, los primeros se encuentran en escala lineal normalizados respecto al valor máximo de la función representada, mientras que en el de potencia puede estar en escala lineal normalizada y también en escala logarítmica (dB).



**Figura 1.1** (a) Patrón de radiación en coordenadas polares (b) Patrón de radiación tridimensional (c) Patrón de radiación en coordenadas cartesianas.

Fuente: Autora

La representación gráfica tiene tres formas principales, la primera en tres dimensiones, en un sistema de coordenadas esféricas, tomando como variables las dos componentes angulares, la segunda se conoce como diagramas en dos

dimensiones en donde se observa las curvas de nivel de la representación anterior, para la tercera forma se realizan cortes del diagrama tridimensional en los planos principales (plano E y plano H), los cortes pueden mostrarse en coordenadas cartesianas o polares, en la Figura 1.1 se observa tres ejemplos de diagramas de radiación.

Las antenas se pueden clasificar de acuerdo a la forma que presenta su patrón de radiación, esto es:

- **Isotrópicas:** representa un modelo hipotético de una antena sin pérdidas, la cual radia la misma energía en todas las direcciones, se utiliza como referencia para expresar propiedades de antenas verdaderas ya que en la realidad no es posible su implementación.
- **Omnidireccionales:** en este patrón se muestra un comportamiento direccional en uno de los planos.
- **Directivas:** se denominan directivas cuando son capaces de concentrar la radiación en un pequeño sector angular, siendo más eficiente en esta dirección que en las otras.

### 1.3.3. FACTORES DE ANÁLISIS DEL PATRÓN DE RADIACIÓN

El patrón de radiación posee varios parámetros que son importantes para describir el comportamiento de la antena, se definen s continuación [3].

- **Lóbulo de radiación:** es la porción del diagrama que se encuentra rodeado por regiones de intensidad de radiación relativamente bajas.
- **Lóbulo mayor:** contiene la dirección de radiación máxima, también se denomina lóbulo principal.
- **Lóbulo menor:** o lóbulo secundario, es cualquier lóbulo excepto el principal.
- **Lóbulos laterales:** son los lóbulos de radiación que presentan una dirección diferente a la prevista, generalmente se encuentra junto al lóbulo mayor.
- **Lóbulo posterior:** es el lóbulo cuya radiación se encuentra en dirección opuesta a la del lóbulo mayor.

- **Nivel de lóbulos secundarios:** es el nivel del mayor lóbulo secundario con respecto al lóbulo principal.
- **Relación delante-atrás:** es la relación entre el lóbulo principal y el lóbulo posterior.

#### 1.3.4. ANCHO DE HAZ

El ancho de haz es la separación angular entre dos puntos idénticos y opuestos tomados en el lóbulo de radiación principal, por lo que pueden existir varios, sin embargo, los presentados a continuación son los más importantes:

- **HPBW:** (Half-Power Beamwidth), el ancho de haz de media potencia es el ángulo en el lóbulo principal entre los puntos de mitad de potencia, en un patrón de potencia, a escala lineal se mide a 0.5, en escala en dB a -3dB, y en el patrón de campo normalizado a escala lineal se mide a 0.707. Generalmente el término ancho de haz se utiliza para nombrar al HPBW, ya que se considera como un factor de calidad de mucha importancia por su uso en la descripción de la capacidad de resolución de las antenas.
- **FNBW:** (First-Null Beamwidth), separación angular entre los primeros nulos, por lo que representa el ancho completo del lóbulo principal.

#### 1.3.5. DENSIDAD DE POTENCIA RADIADA

La densidad de potencia radiada se define como la potencia por unidad de superficie que será asociada a la onda electromagnética, de ahí que sus unidades son  $\frac{W}{m^2}$ . Esta cantidad se describe a través del vector de Poynting instantáneo definido como:

$$\bar{W} = \bar{E} \times \bar{H} \quad (1)$$

En donde  $\bar{E}$  y  $\bar{H}$  representan los campos eléctrico y magnético respectivamente. El vector de Poynting equivale a la densidad instantánea de potencia que entrega la antena, la cual posee una parte real y una parte imaginaria, la parte real se denomina densidad promedio de potencia radiada, mientras que la parte imaginaria se conoce como densidad promedio de potencia reactiva. La densidad de

potencia radiada es el flujo de potencia por unidad de área esférica que efectivamente radia la antena por lo que es una cantidad vectorial, la potencia reactiva es aquella que disipa la antena en forma de calor [11]. Matemáticamente estas densidades se expresan de la siguiente forma:

$$\bar{P}_{rad} = \frac{1}{2} Re(\bar{E} \times \bar{H}^*): \frac{W}{m^2} \quad (2)$$

$$\bar{P}_{reac} = \frac{1}{2} Im(\bar{E} \times \bar{H}^*): \frac{W}{m^2} \quad (3)$$

Y la potencia promedio radiada está dada por:

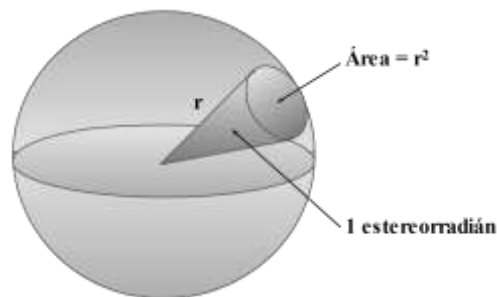
$$P_{rad} = \frac{1}{2} \iint_S Re(\bar{E} \times \bar{H}^*) \cdot ds: w \quad (4)$$

$$ds = r^2 * \sin \theta * d\theta d\phi \quad (5)$$

En donde  $ds$  representa el diferencial de ángulo sólido.

### 1.3.6. INTENSIDAD DE RADIACIÓN

La intensidad de radiación se define principalmente como la potencia radiada desde una antena por unidad de ángulo sólido en una dirección dada. El ángulo sólido es la zona del espacio que contiene una sucesión de líneas radiales con vértice en el centro de una esfera. La unidad de medida del ángulo sólido es el estereorradián, el cual es definido como el ángulo sólido con su vértice en el centro de una esfera de radio  $r$ , dentro de un área de superficie esférica igual a  $r^2$ , como se observa en la Figura 1.2.



**Figura 1.2** Estereorradián  
Fuente: Autora

La intensidad de radiación es una unidad escalar ya que equivale a la cantidad de potencia radiada concentrada en el haz de radiación por unidad de ángulo sólido [3]. Su expresión matemática se obtiene multiplicando la densidad de potencia radiada por el cuadrado de la distancia, como se expresa en:

$$U = r^2 \bar{P}_{rad} : \frac{W}{\text{unidad de ángulo sólido}} \quad (6)$$

### 1.3.7. DIRECTIVIDAD Y GANANCIA

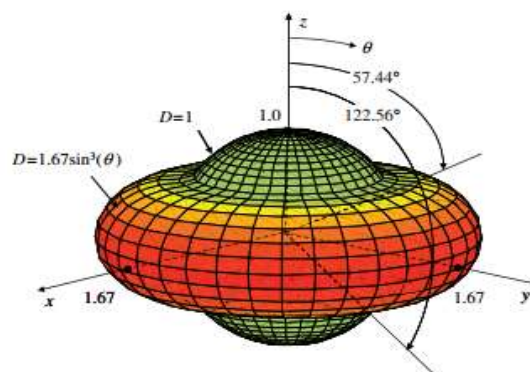
Se define a la directividad como una medida cuantitativa que expresa la capacidad de una antena para concentrar energía una dirección específica [12]. Matemáticamente equivale a la relación entre la intensidad de radiación dada desde la antena y la intensidad promedio radiada en todas las direcciones [11].

$$D = \frac{U}{U_0} \quad (7)$$

Cuando no se especifica la dirección se sobreentiende que se refiere a la máxima, por lo tanto, la directividad máxima se refiere a la radiación de una antena isotrópica de igual potencia radiada, de esta forma puede ser expresada en dB [3].

$$D_{max} = \frac{4\pi * U_{max}}{P_{rad}} \quad (8)$$

La directividad está determinada por el patrón de radiación de la antena, en la Figura 1.3 se observa mediante un patrón de radiación la directividad de una antena.



**Figura 1.3** Directividad de una antena  
Fuente: [3]

Es necesario determinar cuan eficiente resulta la antena al momento de transformar la potencia que llega hacia sus terminales de entrada en potencia que será irradiada y por supuesto la directividad que tendrá, para esto la ganancia es definida como  $4\pi$  veces la relación entre la intensidad de radiación en una dirección dada, que sale de la antena, a la potencia neta aceptada por la antena, la ganancia también se expresa mejor en dB [13].

$$G = \frac{4\pi * U}{P_{in}} \quad (9)$$

### 1.3.8. EFICIENCIA

Generalmente la eficiencia se conoce como un factor que expresa la relación entre la potencia deseada y la potencia suministrada, partiendo de este concepto la eficiencia de radiación de una antena se define como la relación entre la potencia radiada, que sería la potencia deseada, a la potencia neta aceptada por la antena [13].

$$e_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (10)$$

Despejando tanto la potencia radiada como la potencia de ingreso de ( 8) y ( 9), y remplazando en ( 10) se obtiene la siguiente relación:

$$e_{rad} = \frac{G}{D} \quad (11)$$

La eficiencia de radiación es  $e_{rad} \leq 1$ , esto obedece a que  $P_{rad} \leq P_{in}$  ya que la máxima potencia posible de radiar es la que el transmisor suministra a la antena considerando las pérdidas por calentamiento como despreciables.

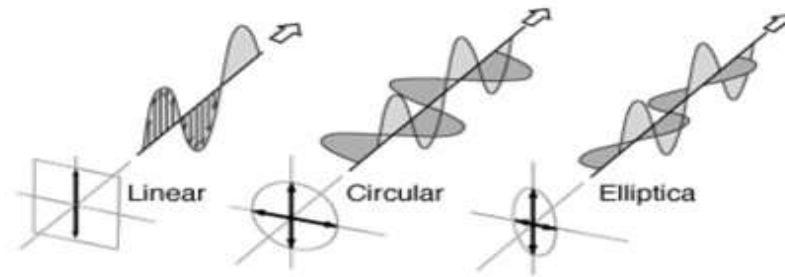
### 1.3.9. POLARIZACIÓN

La polarización de una antena en una dirección dada corresponde a la polarización de la onda transmitida por la antena, indica la orientación del vector de campo eléctrico  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  con respecto a la superficie de la tierra, como se observa el vector de campo depende de una posición y del tiempo. Los campos eléctricos describen una trayectoria, la forma geométrica que traza el extremo del vector de campo eléctrico a una cierta distancia de la antena y en función del tiempo define la polarización de la misma [14].



La polarización puede ser clasificada como lineal, circular o elíptica, sin embargo, se dice que el campo está polarizado elípticamente y que las polarizaciones lineales y circulares son casos especiales de la elíptica, de acuerdo con la definición de la relación axial de la onda con polarización elíptica; la cual representa la relación entre los ejes mayor y menor de la elipse, la relación axial tiene valores de  $\infty$  para la polarización lineal y 1 para la polarización circular. A continuación se describen las características de los tres tipos de polarización, las cuales están dadas en [3], y en la Figura 1.4, se observa de forma gráfica los tipos de polarización.

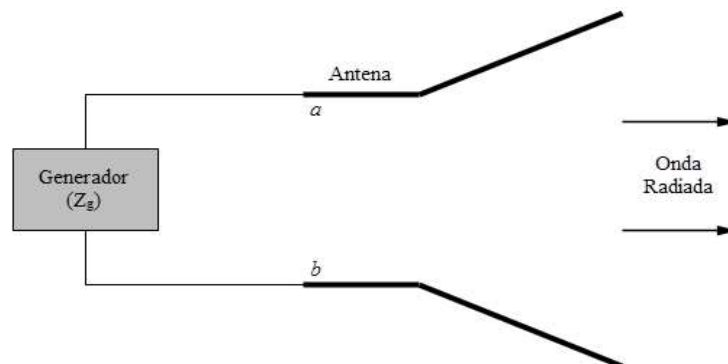
- **Polarización lineal:** una onda armónica en el tiempo está polarizada linealmente, cuando el vector de campo eléctrico en el punto se orienta a lo largo de la misma línea recta en cada instante de tiempo, se produce cuando existe solo un componente radiador o dos componentes lineales ortogonales en fase,  $180^\circ$  o múltiplos de este. Existe polarización vertical u horizontal si es perpendicular a la superficie terrestre o si es horizontal a la misma.
- **Polarización circular:** una onda armónica en el tiempo posee polarización circular, cuando el vector de campo eléctrico traza un círculo en el punto, en función del tiempo, esto se produce cuando el campo tiene dos componentes lineales ortogonales, con la misma magnitud y con diferencia de fase temporal de  $90^\circ$  o múltiplos impares. Puede ser de mano derecha o de mano izquierda según sea en sentido de las manecillas del reloj o contrario a este.
- **Polarización elíptica:** una onda armónica en el tiempo posee polarización elíptica cuando el vector de campo traza un lugar geométrico elíptico en el espacio, al igual que el circular puede ser de mano derecha o de mano izquierda, el concepto de polarización elíptica se usa generalmente para casos en los que la polarización no sea lineal ni circular, para que esto se dé, el vector de campo debe poseer dos componentes lineales ortogonales, los cuales pueden tener la misma o diferente magnitud y si no tienen la misma magnitud la diferencia de fase temporal no debe ser  $0^\circ$  o múltiplos de  $180^\circ$ , mientras que si poseen la misma magnitud la fase no debe ser múltiplos de  $90^\circ$ .



**Figura 1.4** Tipos de polarización  
Fuente: [15]

### 1.3.10. IMPEDANCIA DE ENTRADA

La impedancia de entrada se define como la relación entre la tensión y la corriente que presenta la antena en sus terminales, o la relación entre el campo eléctrico y magnético [3]. En la Figura 1.5 se presenta una antena en modo de transmisión en donde se observa el generador y los terminales en donde se mide la impedancia de entrada. Este parámetro es uno de los más importantes debido a que en un sistema de comunicaciones la antena y el transmisor deben estar adaptados para una máxima transferencia de potencia, además, esta impedancia dependerá también de la frecuencia [10].



**Figura 1.5** Antena en modo transmisión, en donde se representan los terminales  
Fuente: [3]

La impedancia de entrada se expresa de la siguiente forma:

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} \quad (12)$$

$Z_{in}$  representa la impedancia de entrada en los terminales y se expresa en ohms,  $R_{in}$  la resistencia de la antena, mientras que  $X_{in}$ , es la reactancia de la antena que representa la energía almacenada en los campos cercanos, también expresada en ohms; la parte resistiva de la antena se compone de la resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas de la antena, así:

$$R_{in} = R_r + R_L \quad (13)$$

La resistencia de radiación es aquella que disiparía la misma potencia de la antena si circulara por esta, la corriente que alimenta a la antena, mientras que la resistencia de pérdidas indica la energía disipada.

Si la impedancia no contiene la parte reactiva en una frecuencia dada, se dice que la antena es resonante a esa frecuencia. La potencia entregada a la antena se compone de la potencia radiada y la potencia disipada por la antena que en función de la corriente proporcionada a la antena se expresan así:

$$P_{rad} = \frac{1}{2} |I|^2 R_r \quad (14)$$

$$P_L = \frac{1}{2} |I|^2 R_L \quad (15)$$

Luego la eficiencia de radiación que de acuerdo a ( 10), se puede reemplazar de la siguiente forma para expresarla en función de las resistencias.

$$e_{rad} = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (16)$$

### 1.3.11. PARÁMETROS S

Las antenas son circuitos de microondas, que se pueden analizar como una red de dos puertos, siendo el primero el puerto de entrada y el otro el puerto de radiación. El análisis de los circuitos de microonda por medio de las matrices de impedancia o admitancia es complejo debido a que es necesario considerar circuitos abiertos o cortocircuitos en los puertos ya que consideran voltajes y corrientes, lo cual se vuelve difícil de lograr en altas frecuencias, por este motivo en la práctica se utilizan los parámetros S o parámetros de dispersión o scattering, los cuales son

válidos a cualquier frecuencia y estos consideran niveles de potencia en los terminales de los puertos.



**Figura 1.6** Esquema de la red de dos puertos  
Fuente:[14]

Para el análisis de los puertos se considera una onda incidente y una onda reflejada en cada puerto la cual se representarán con las letras  $a$  y  $b$  respectivamente [14]. Para un circuito de dos puertos existen cuatro parámetros  $S$ , las relaciones entre las ondas se expresan de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (17)$$

A continuación, en la Tabla 1.1 se describe el significado de cada uno de los parámetros  $S$  en la red de dos puertos:

**Tabla 1.1** Descripción de los parámetros  $S$  para una red de dos puertos [14].

Parámetro	Coefficiente	Descripción
$S_{11}$	Reflexión a la entrada	Potencia reflejada en el puerto 1, cuando se genera una onda incidente en el puerto.
$S_{12}$	Transmisión inversa	Potencia que llega al puerto 1 cuando se alimenta por el puerto 2.
$S_{21}$	Transmisión directa	Potencia que llega al puerto 2, cuando se alimenta por dicho puerto.
$S_{22}$	Reflexión a la salida	Potencia que refleja el puerto 2 cuando se genera una onda incidente en dicho puerto.

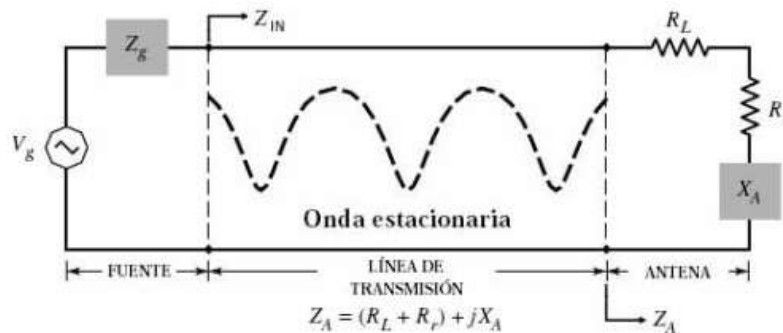
El parámetro  $S_{11}$  es el más importante ya que proporciona información de la transferencia de potencia del generador hacia la antena.

### 1.3.12. COEFICIENTE DE REFLEXIÓN, SWR Y PÉRDIDAS DE RETORNO

El coeficiente de reflexión se define como la relación entre las amplitudes de la onda de voltaje reflejada con respecto a la transmitida a la carga. En donde  $Z_L$  es la impedancia de la carga y  $Z_A$  es la impedancia característica de la línea de transmisión.

$$\Gamma = \frac{V_o^-}{V_o^+} = \frac{Z_L - Z_A}{Z_L + Z_A} \quad (18)$$

Una antena se une al transmisor o receptor mediante la línea de transmisión, y cuando están adaptados el coeficiente de reflexión debe ser igual a cero,  $\Gamma = 0$ , cuando esto no sucede la onda reflejada produce una onda estacionaria como se observa en la Figura 1.7.



**Figura 1.7** Esquema de antena conectada a generador.  
Fuente:[14]

La Relación de Onda Estacionaria (ROE) o por sus siglas en inglés Standing Wave Ratio (SWR), sería la relación entre la tensión máxima a la mínima de la onda estacionaria indicada anteriormente.

$$SWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (19)$$

También puede ser expresado de la siguiente forma:

$$SWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (20)$$

Demostrando que se encuentra directamente relacionado con las características de adaptación de la antena, ya que indica la reflexión que se ha producido debido a la falta de adaptación,  $SWR$  tendrá valores entre  $1 \leq SWR \leq \infty$ , 1 indica que la antena estaría perfectamente adaptada. Sin embargo, valores como  $SWR \leq 2$  y una reflexión  $|S_{11}| \leq -10dB$  son considerados para el buen funcionamiento de una antena [14].

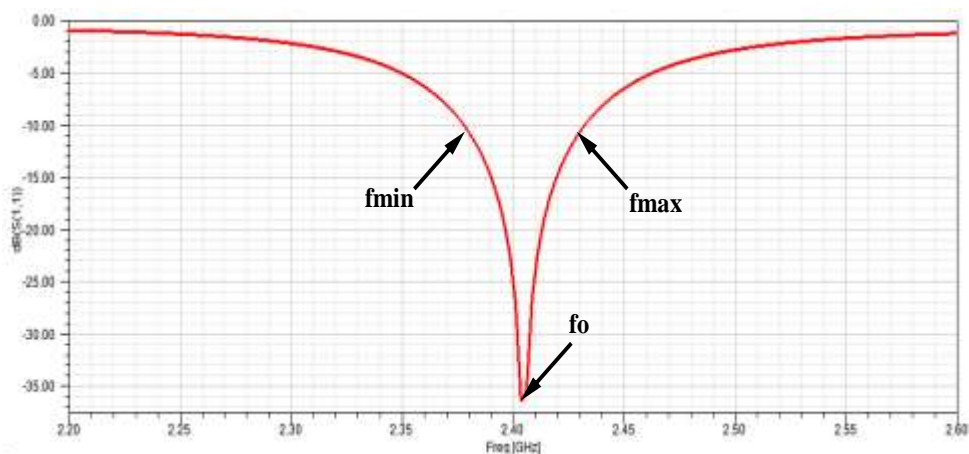
Las pérdidas de retorno se definen como el cociente entre la potencia de la onda reflejada y la potencia de la onda incidente, se expresan en dB.

$$PR(dB) = 10 \log \frac{P_{ref}}{P_{inc}} = 20 \log |\Gamma| \quad (21)$$

### 1.3.13. ANCHO DE BANDA

Se denomina ancho de banda al intervalo de frecuencias sobre el cual la antena funcionaría satisfactoriamente, de acuerdo a límites prefijados según el parámetro de la aplicación, se expresa comúnmente en Hz, aunque también puede ser expresado en porcentaje, como la relación entre el rango de frecuencias y la frecuencia central [10].

$$BW\% = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \quad (22)$$



**Figura 1.8** Ancho de banda  
Fuente: Autora

Generalmente hace referencia al ancho de banda de impedancia o de diagrama, en la gráfica del coeficiente de reflexión de una antena como el de la Figura 1.8, se define el ancho de banda cuando el parámetro de reflexión es menor a -10 dB.

### 1.3.14. FACTOR DE ANTENA

El factor de antena es un parámetro utilizado para describir el comportamiento, cuando se la usa como un dispositivo de medición de campo, de forma concisa, es el factor por el cual se multiplicaría la tensión que se obtiene de una antena en recepción, para recuperar el campo eléctrico o magnético incidente [16]. Para campo eléctrico se expresa así:

$$A_{F^{electrico}} = \frac{E_{incidente}}{V_{recibido}} \text{ 1/m} \quad (23)$$

Mientras que para el campo magnético está dado por:

$$A_{F^{magnetico}} = \frac{H_{incidente}}{V_{recibido}} \text{ Siemens/m} \quad (24)$$

### 1.3.15. ÁREA EFECTIVA

En una antena que trabaja en modo recepción, la potencia colectada de la onda recibida que se transfiere hacia la carga, va a depender de un área geométrica propia de la antena y la potencia incidente por unidad de área, lo que se expresa de la siguiente forma:

$$A_e = \frac{P_r}{W_i} \text{ m}^2 \quad (25)$$

En donde  $P_r$  es la potencia entregada hacia la carga expresada en W, mientras que  $W_i$  es la densidad de potencia de la onda incidente y se mide en  $W/m^2$ .

## 1.4. TIPOS DE ANTENAS

Existen diversos tipos de antenas que se han desarrollado para diferentes fines, por lo que las antenas pueden ser clasificadas de diferentes formas ya sea por la aplicación, por la forma, modo de radiación o muchos otros criterios, a continuación, se presenta una revisión de los tipos de antenas más conocidos presentados en [3], [11].

### 1.4.1. ANTENAS ALÁMBRICAS

Son las antenas más utilizadas y se las puede ver en diferentes tipos de aplicaciones, consisten en hilos conductores delgados, con un diámetro menor a la longitud de onda, tienen formas variadas como dipolos lineales, como el que se observa en la Figura 1.9, en esta clasificación también están las antenas de lazo que puede ser circulares, cuadradas o de cualquier variada forma, también se encuentran espirales y hélices.



**Figura 1.9** Antena Dipolo  
Fuente:[17]

### 1.4.2. ANTENAS DE APERTURA

Son antenas muy utilizadas en aviones o naves espaciales, normalmente se alimentan con guías de onda, dentro de este tipo de antenas se encuentran las bocinas como la que se observa en Figura 1.10, pueden ser de diferentes formas como piramidales o cónicas, estas formas se utilizan generalmente como alimentador de antenas reflectoras, dentro de este grupo también se encuentran las ranuras sobre planos conductores las cuales poseen gran ancho de banda.

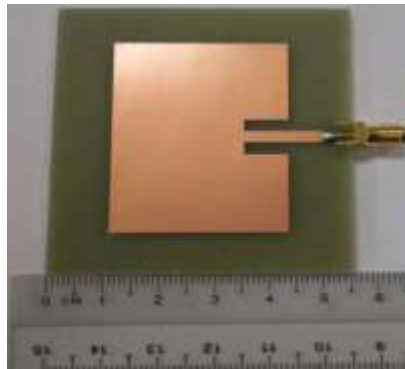




**Figura 1.10** Antena de apertura, bocina.  
Fuente:[18]

### 1.4.3. ANTENAS PLANARES

Se las conoce de diferentes formas como antenas planares, antenas parche o antenas Microstrip, utilizan la tecnología de circuito impreso, como se observa en la Figura 1.11, son muy utilizadas actualmente debido a varias razones como la facilidad de fabricación, características mecánicas de resistencia, aplicaciones que cada vez tienden a la miniaturización, por lo que su estudio es de mucho interés, en la siguiente sección se detallará este tipo de antena.



**Figura 1.11** Antena Microstrip  
Fuente:[19]

### 1.4.4. ANTENAS CON REFLECTOR

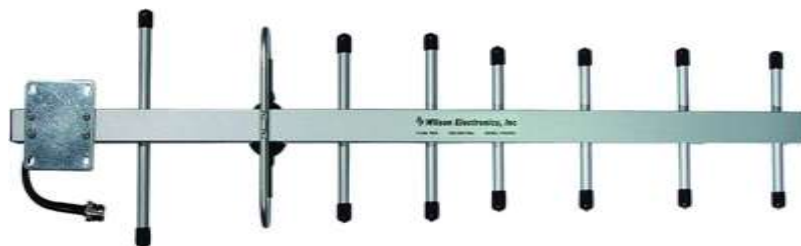
Se llaman también antenas parabólicas, constan de un foco que es el que irradia las ondas electromagnéticas en el caso de emisión o las recibe en el caso de recepción y un elemento pasivo reflector, su principal característica es su alta ganancia y directividad, su uso principalmente es en recepción, en señales satelitales, como la antena de la Figura 1.12 se clasifican de acuerdo al foco utilizado.



**Figura 1.12 Antena Parabólica**  
Fuente:[20]

#### **1.4.5. ANTENAS DE BANDA ANCHA**

Son desarrolladas para cubrir un gran ancho de banda, lo cual se consigue aumentando la superficie para la circulación de corriente, las antenas de elementos son una gran opción para lograr este objetivo, por lo que dentro de este tipo se encuentran las antenas Yagi que se muestra en la Figura 1.13, Bicónica o dipolo cilíndrico.



**Figura 1.13 Antena Yagi**  
Fuente:[21]

#### **1.4.6. ARREGLOS DE ANTENAS**

Los arreglos de antenas son grupos de antenas que se conectan entre sí y funcionan como una sola antena, tienen diferentes configuraciones y son capaces de cambiar sus propiedades de forma automatizada, generalmente se utilizan para mejorar el patrón de radiación, como por ejemplo en radares. En la Figura 1.14 se observa un ejemplo de un arreglo de antenas para una estación científica. Su funcionamiento se basa principalmente en las interferencias de los campos radiados que se produce por la interacción de las radiaciones de los elementos del array.

Su análisis parte de dos dipolos infinitesimales formando un arreglo lineal, el campo eléctrico total radiado se obtiene realizando la suma de los campos de cada uno de los dipolos. Realizando todas las operaciones matemáticas se obtiene lo que se conoce como el Factor de Arreglo (FA), el cual se define como el diagrama de radiación de una agrupación de elementos isotrópicos y representa el factor por el cual se multiplica el campo de un elemento situado en el origen, para obtener el campo total del arreglo.

$$\textit{Patrón Total} = \textit{Factor de elemento} * \textit{Factor de Array} \quad (26)$$

La expresión matemática del factor de array normalizado con respecto a su valor máximo, de un array de dos elementos infinitesimales es:

$$AF = \cos \left[ \frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (27)$$

Donde:

k: constante de propagación

d: distancia entre los dipolos

$\beta$ , es la diferencia de fase



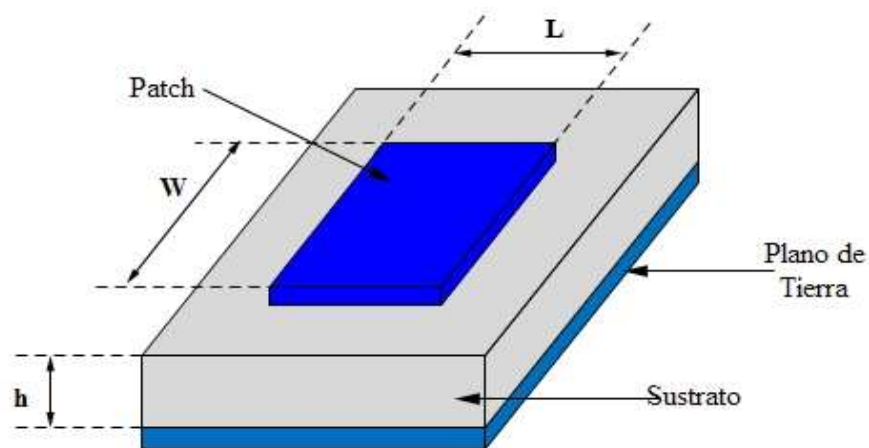
**Figura 1.14** Ejemplo de Array Lineal de Antenas Parabólicas  
Fuente:[22]

## 1.5. ANTENAS PLANARES

La antena planar o también denominada antena Microstrip, fue introducida por Deschamps en el año de 1953, sin embargo es hasta la década de 1970 cuando empiezan a tener considerable atención, debido a que en esta época se desarrollaron mejores sustratos, las primeras antenas fueron fabricadas por Howell y Munson [4]; en esta sección se describen las propiedades más importantes de este tipo de antenas.

### 1.5.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

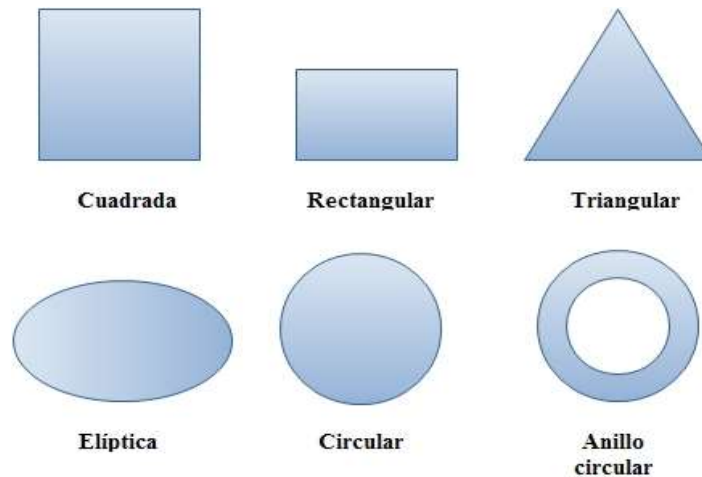
Las antenas planares son fabricadas sobre tecnología de circuito impreso y su estructura principal está compuesta por un parche metálico cuyas dimensiones son comparables a la  $\lambda$ , longitud de onda, este parche consiste en una lámina muy delgada mucho menor que la longitud de onda a la cual va a trabajar la antena, el parche se encuentra situado sobre el sustrato con una constante dieléctrica  $\epsilon$ , que puede tener valores entre  $2.2 \leq \epsilon \leq 12$ , el grosor del sustrato también puede variar entre  $0.003\lambda$  y  $0.05\lambda$ , ya que a partir de este límite las ondas superficiales afectan el comportamiento de la antena, el sustrato a su vez se ubica sobre un plano de masa [3]. En la Figura 1.15 se observa la estructura básica de la antena planar.



**Figura 1.15** Estructura de antena planar  
Fuente: [3]

Este tipo de antenas se utilizan en diversas aplicaciones como satélites, comunicaciones inalámbricas, telefonía móvil, sistemas de radares, sistemas GPS, entre otros, por lo que presentan variadas formas, las principales se pueden apreciar en la Figura 1.16. aunque las formas más utilizadas son el parche rectangular y el

parche circular. Las frecuencias en las que trabajan son generalmente entre 1 y 10 GHz.



**Figura 1.16** *Formas del parche*  
Fuente: [3]

Las principales ventajas de la utilización de este tipo de antenas según [4] son:

- Menor tamaño y peso ligero.
- Bajo costo y facilidad de fabricación
- Bajo perfil y robustez mecánica
- De fácil integración con circuitos integrados de microondas
- La línea de alimentación puede ser fabricada simultáneamente con la antena.
- Eficiencia de radiación en el modo fundamental

Debido a su configuración también presentan desventajas en comparación con otro tipo de antenas, como son:

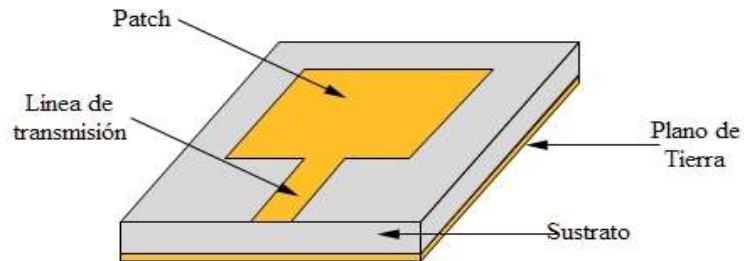
- Ancho de banda reducido
- Presencia de radiación espuria
- Baja ganancia
- Baja eficiencia

## 1.5.2. MÉTODOS DE ALIMENTACIÓN

Existen diferentes configuraciones utilizadas para alimentar las antenas planares, entre las más utilizadas están, la línea Microstrip, sonda coaxial, acoplamiento de apertura y acoplamiento de proximidad [3].

- **Alimentación con línea Microstrip**

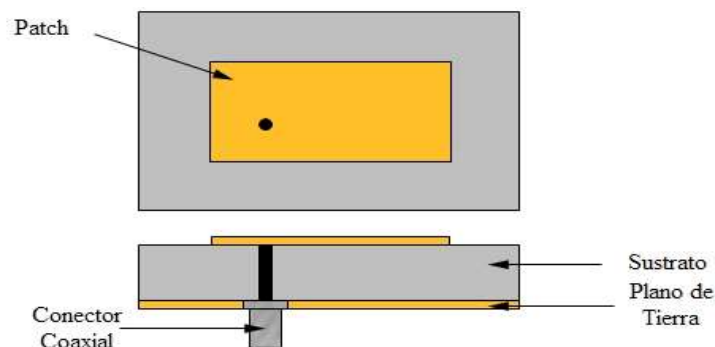
En este tipo de alimentación se utiliza una línea de microcinta para alimentar el parche, generalmente el ancho de esta línea es mucho menor que del parche, se lo conoce también como acoplamiento directo, para controlar la impedancia que aparece al borde del parche se manipula la posición en la cual se inserta la línea. En la Figura 1.17 se muestra una antena planar alimentada mediante este método.



**Figura 1.17** Alimentación mediante línea Microstrip  
Fuente: [3]

- **Alimentación con sonda coaxial**

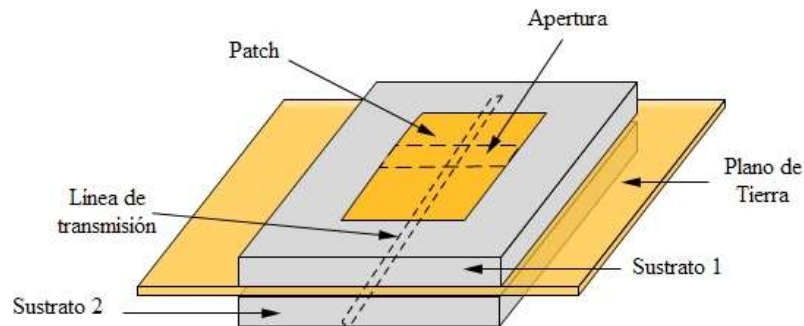
Esta es una técnica muy común, consiste en que el conductor interno del coaxial atraviesa el sustrato y se une al parche radiante, mientras que el conductor externo se conecta con el plano de tierra, el proceso de conexión debe realizarse con mucho cuidado. En la Figura 1.18 se observa esta estructura.



**Figura 1.18** Alimentación con sonda coaxial  
Fuente: [3]

- **Acoplamiento de apertura**

Este método surgió para tratar de eliminar las deficiencias de los dos métodos anteriores, esta configuración consiste en dos sustratos separados por un plano de tierra, en la parte inferior del sustrato dos se encuentra una línea Microstrip de alimentación, esta se acopla al parche mediante una ranura en el plano de tierra, este tipo de alimentación es el más difícil de fabricar sin embargo reduce la radiación espuria. En la Figura 1.19 se observa el esquema de este tipo de acoplamiento.

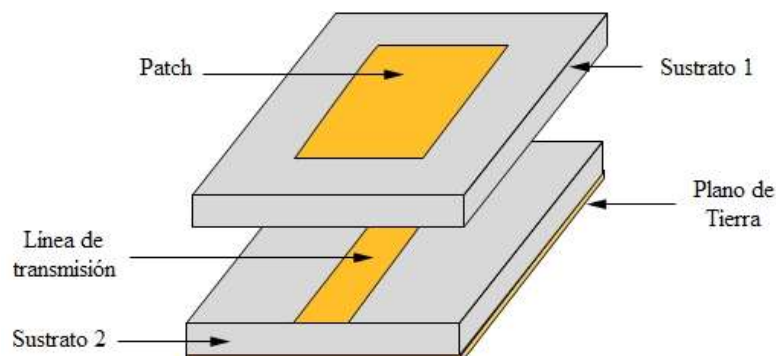


**Figura 1.19** *Acoplamiento de apertura*

Fuente: [3]

- **Acoplamiento de proximidad**

Se denomina también acoplamiento electromagnético, su estructura consta de dos sustratos dieléctricos, la línea de transmisión se encuentra en el sustrato inferior y el parche de radiación en el superior, como se observa en la Figura 1.20. También elimina la radiación espuria pero además presenta mejor ancho de banda.



**Figura 1.20** *Acoplamiento por proximidad*

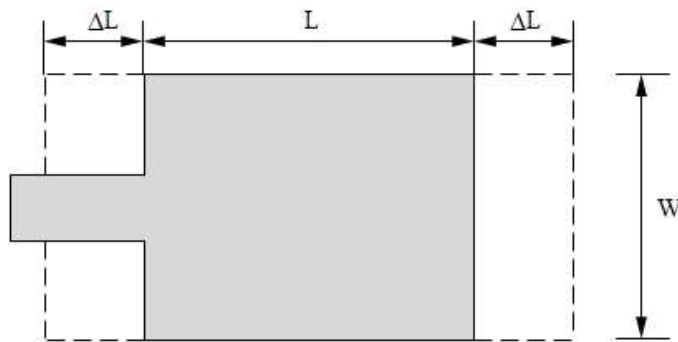
Fuente: [3]

### 1.5.3. Métodos de Análisis

Existen varios métodos para analizar el comportamiento de las antenas planares, estos modelos son aproximaciones que proporcionan información del funcionamiento de las mismas, los dos métodos que se presentarán son el de línea de transmisión y el modelo de cavidad, debido a que son los más comunes, sin embargo, existen otros métodos como el de onda completa que son muy precisos, pero son modelos generalmente mucho más complejos.

- **Modelo de línea de transmisión**

Las antenas planares se pueden considerar como una derivación o una extensión de las líneas de transmisión Microstrip, por lo que se utiliza la misma técnica para el análisis y el diseño de una antena planar de geometría rectangular. En este modelo la antena tiene una impedancia característica  $Z_o$  y se modela el parche como dos ranuras de una altura  $h$  y anchura  $W$ , que se encuentran separadas por una distancia  $L$ , por lo que las dimensiones de las ranuras presentan una longitud  $\Delta L$ . Conformando la longitud efectiva como se observa en la Figura 1.21.

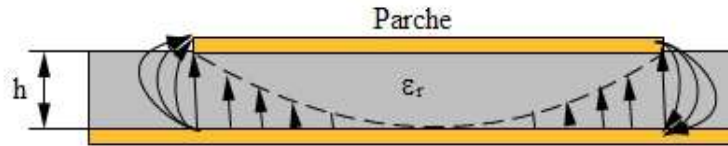


**Figura 1.21** Longitud efectiva de la antena planar

Fuente: [3]

Estas dimensiones son finitas y por este motivo se presenta el efecto de desbordamiento de los campos en los bordes, como se observa en Figura 1.22., en esto también influye la constante dieléctrica del sustrato y la relación de la longitud del parche a la altura para disminuir este efecto, ya que influye en la frecuencia de resonancia. Por el efecto de que algunas ondas viajan en el sustrato y otras en el aire se introduce el concepto de la constante dieléctrica efectiva  $\epsilon_{reff}$  para tomar en cuenta ambos sustratos [3].

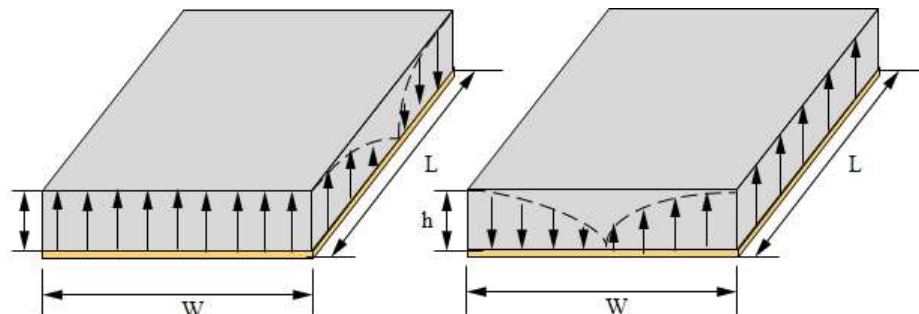




**Figura 1.22** Desbordamiento del campo eléctrico  
Fuente: [3]

- **Modelo de cavidad**

Las antenas planares son antenas resonantes y de banda estrecha. Se pueden analizar con el modelo de cavidad ya que se considera que son de cavidades con pérdidas, para el análisis se asume que los sustratos son muy delgados tomando en cuenta  $h \ll \lambda_0$ . Derivada de esta consideración se asume también que los campos en el interior del sustrato no variarán en el eje z, además, el campo eléctrico solo se propaga en dirección del eje z, y el magnético solo tiene componentes en x,y en el área entre el parche y el plano de tierra, la corriente eléctrica normal a los bordes del parche es cero. Por estas razones el modelo de cavidad presenta diferentes modos de acuerdo a las soluciones de la ecuación de onda homogénea, y las condiciones de frontera, se forman paredes eléctricas y magnéticas que en su interior se producen ondas estacionarias de ahí la definición de modelo de cavidad. El modo dominante es aquel que concuerda con la frecuencia de resonancia menor que aparece cuando la longitud del parche vale media longitud de onda, cuando la antena trabaja en este modo se dice que es igual a un circuito resonador con pérdidas, de esta forma se convierte en radiación, en la Figura 1.23 se presentan ejemplos de distribución de los campos en este modelo [4].



**Figura 1.23** Ejemplo de distribución de campos en una cavidad  
Fuente: [3]

## **1.6. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN**

### **1.6.1. OPTIMIZACIÓN**

Se define como optimización al proceso que consiste en encontrar la mejor solución disponible para un determinado problema, mediante la búsqueda de los valores precisos de las variables que intervienen en el sistema [23]; es un campo que cada vez ha ido cobrando mayor importancia en diferentes ámbitos de la investigación entre las cuales se encuentra el diseño en ingeniería, debido a las características de las aplicaciones, la precisión necesaria, además de recursos limitados, la optimización matemática es un medio para solucionar este tipo de problemas mediante algoritmos de búsqueda eficientes. En esta sección se presenta una revisión concisa de los tipos de algoritmos y los algoritmos utilizados para el diseño de antenas planares.

### **1.6.2. TIPOS DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN METAHEURÍSTICOS**

Existe muchos enfoques de categorización en el campo de la optimización, en primera instancia se pueden clasificar como algoritmos deterministas o tradicionales y los métodos estocásticos, los primeros se ha demostrado que no son aptos para problemas altamente no lineales y multimodales, mientras que los estocásticos al incorporar términos aleatorios aumentan la diversidad de soluciones obtenidas [24]. Dentro de los estocásticos se encuentran los heurísticos y metaheurísticos, la diferencia radica en que los heurísticos usan un enfoque de prueba y error, proporcionando soluciones aceptables, mientras que los algoritmos metaheurísticos comprenden un nivel superior, debido a que no necesitan de una información detallada del espacio de búsqueda, sino solo la función objetivo y el dominio de las variables [25], aunque suelen utilizarse ambos términos indistintamente. Los principales componentes de un algoritmo metaheurístico son la intensificación y la diversificación, o la explotación y la exploración, con la diversificación se presenta variedad de soluciones para la exploración del espacio de búsqueda a escala global, la intensificación es centrarse en una región en donde se obtuvo una buena solución, estos rasgos se combinan para la selección de la mejor solución.

La mayoría de algoritmos metaheurísticos son inspirados en la naturaleza, sin embargo la clasificación depende de los diferentes criterios, además un algoritmo puede ser clasificado en diferentes categorías de acuerdo a la perspectiva, si se toma en cuenta la trayectoria de la ruta de búsqueda se los clasifican en: algoritmos basados en la trayectoria o basados en la población [26].

Si considera la fuente de inspiración según [27], se divide a los algoritmos existentes en cuatro categorías principales:

- **Basados en Inteligencia de Enjambre (Swarm Intelligence SI)**

Se basa en el comportamiento de una población con múltiples agentes que interactúan de acuerdo a varias reglas establecidas, por ejemplo, el comportamiento colectivo de insectos y otros animales como pájaros o peces. La información que se comparte entre los múltiples agentes durante las iteraciones proporciona la alta eficiencia de estos algoritmos. El término “inteligencia de enjambre” hace referencia a la “inteligencia colectiva” de los agentes, se inicia en los años 1988-1999 [23].

- **Bio-inspirados, pero no basados en SI**

Dentro de este grupo se encuentran algoritmos de inspiración biológica pero que no utilizan de forma directa el comportamiento de conjunto, sino que utilizan diferentes procedimientos evolutivos, como la selección natural, lo que en otras revisiones bibliográficas se conoce como algoritmos evolutivos.

Para entender de mejor manera esta clasificación, se acude a la teoría de conjuntos y se expresa la relación de la siguiente forma:

$$\text{Basados en SI} \subset \text{Bio – Inspirados} \subset \text{Inspirados en la naturaleza} \\ [27]$$

En donde se aprecia que los algoritmos de inteligencia de enjambre son un subconjunto de los algoritmos bio inspirados y estos a su vez son un subconjunto de los algoritmos inspirados en la naturaleza. Por lo que existen algoritmos bio inspirados pero que no utilizan el comportamiento de una población, como es el caso de los Algoritmos Genéticos (GA, Genetic Algorithms), y Evolución Diferencial (DE, Differential Evolution). Por otra parte, no todos los algoritmos inspirados en la

naturaleza son bio inspirados ya que algunos se basan en fenómenos puramente físicos o químicos, de ahí se origina la siguiente categoría.

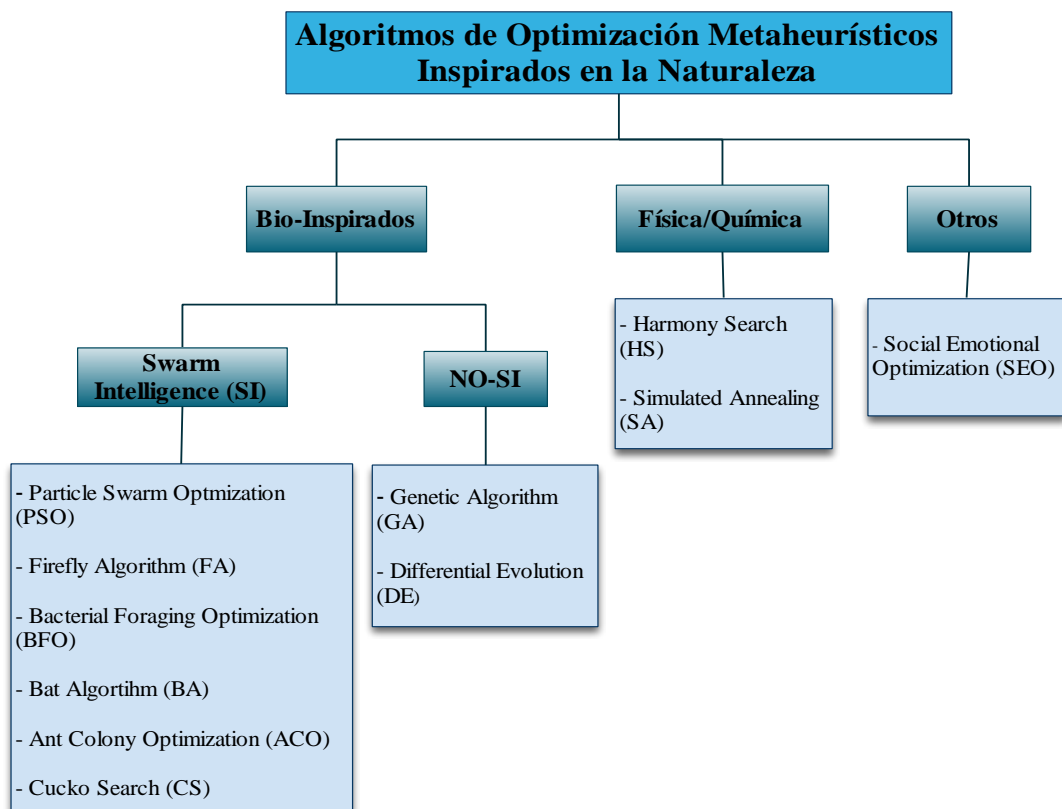
- **Basados en Física/Química**

Existen algoritmos metaheurísticos basados en leyes físicas o químicas como cargas eléctricas, la gravedad, sistemas fluviales, entre otros. Por lo que estos algoritmos son Inspirados en la naturaleza, pero no Bio-inspirados.

- **Otros**

En esta clasificación se encuentran aquellos algoritmos que no se pueden asociar a ninguna de las clasificaciones anteriores, en cambio utilizan fuentes como el comportamiento cultural o emociones.

En la Figura 1.24, se presenta la clasificación de los algoritmos de optimización metaheurísticos, en función de la fuente de inspiración, además se presentan varios ejemplos de algoritmos clasificados en las diferentes categorías y sus nomenclaturas.



**Figura 1.24** Clasificación de los algoritmos metaheurísticos, ejemplos y nomenclatura.  
Fuente: Autora

### 1.6.3. USO DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN METAHEURÍSTICOS EN EL DISEÑO DE ANTENAS

Debido al desarrollo tecnológico y a la variedad de sistemas inalámbricos cada vez más sofisticados, es necesario que en el campo del diseño de las antenas se aborden diferentes problemas los cuales tienen un elevado nivel de complejidad, por esta razón se ha motivado la aplicación de los algoritmos metaheurísticos, en el diseño de antenas y la optimización de diferentes parámetros. Existen varias implementaciones de algoritmos metaheurísticos para el diseño de antenas y arreglos de antenas, optimizando diferentes características de los dispositivos. En este apartado se presenta un breve resumen de los diferentes algoritmos utilizados en el campo de las telecomunicaciones para el diseño de antenas.

Los Algoritmos Genéticos son los algoritmos más antiguos en el ámbito de la optimización metaheurística, fueron creados por John Holland en 1975, están inspirados en las teorías evolutivas que Darwin escribió en el libro *El origen de las Especies* publicado en 1859, en el cual se explicaba como los seres vivos son el resultado de la evolución de un antepasado común, que debido a las diferentes condiciones de vida y a la selección natural se han convertido en diferentes especies, de las cuales solo sobrevive la mejor, estas premisas han sido utilizadas para el diseño de diferentes tipos de antenas existiendo ya numerosos estudios, como el presentado en [4], en donde se utilizan los algoritmos genéticos para optimizar diferentes parámetros como la frecuencia de operación, el ancho de banda y la dirección de radiación de lóbulo principal.

De acuerdo a [28] [29], el siguiente algoritmo importante en este campo de investigación, es el algoritmo de Optimización de Enjambre de Partículas (PSO, Particle Swarm Optimization), presentado por James Kennedy y Russell Eberhart en 1995, consiste en modelar el comportamiento de inteligencia de enjambre de animales como abejas, peces o bandadas de pájaros, enfatizándose en la interacción social de los individuos, en [30] se considera que los algoritmos genéticos son complejos para la implementación por lo que este algoritmo superaría a los algoritmos genéticos en este sentido, además existen varias mejoras a este algoritmo con las cuales se ha realizado diseño de antenas como por ejemplo el estudio presentado en [31]. Seguido de PSO se encuentra Differential Evolution (DE),

desarrollado por K.Price en el año de 1996, el cual es un algoritmo de tipo evolutivo pero que ha presentado un buen rendimiento en el campo de las antenas, centrándose principalmente en la miniaturización de las dimensiones [29],

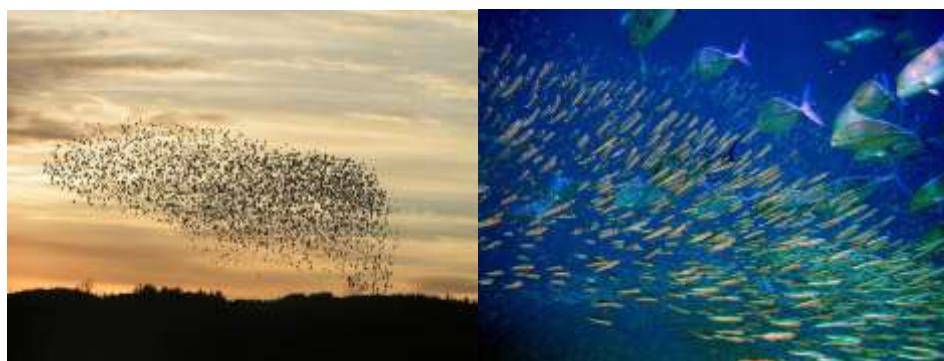
En la revisión presentada en [29], considera además entre los más influyentes junto a los mencionados anteriormente a la Optimización de Forrajeo Bacteriano (BFO, Bacterial Foraging Optimization), el cual fue introducido por K. Passino en 2002, también se basa en la selección natural. Sin embargo, existen algunos algoritmos que también han presentado un buen rendimiento respecto a los anteriores, como por ejemplo Búsqueda de Cuckoo (CS, Cuckoo Search) y Destello de Luciérnagas (FA, Firefly Algorithm), entre otros, pero no es posible determinar un algoritmo como el mejor debido a que existen diferentes objetivos de optimización, es decir, diferentes parámetros de interés en las antenas, existen también nuevos algoritmos desarrollados como el Algoritmo de Ecolocalización de los Murciélagos (BA, Bat Algorithm), Optimización de Malezas Invasivas (IWO, Invasive Weed Optimization), Optimización del Mono Araña (SMO, Spider Monkey Optimization), Optimización de la Araña Social (SSO, Social Spider Optimization), de los cuales debe considerarse realizar un mejor análisis, dentro del campo del diseño de antenas[29].

Las técnicas que serán analizadas en el presente estudio son la Optimización de Enjambre de Partículas (PSO), Destello de Luciérnagas (FA) y la Ecolocalización Direccional de los Murciélagos (dBA, Directional Bat Algorithm). En las próximas secciones se describen los fundamentos que caracterizan a los algoritmos mencionados.

## 1.7. OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO, PARTICLE SWARM OPTIMIZATION)

La optimización de enjambre de partículas es un algoritmo o técnica computacional, desarrollada por el psicólogo-sociólogo James Kennedy y por el ingeniero eléctrico Russell C. Eberhart en el año de 1995. Tiene sus orígenes en la simulación por computadora de los movimientos de organismos en una bandada de aves o en bancos de peces como los de la Figura 1.25, los científicos se interesaron en descubrir las reglas que permitían que grandes cantidades de aves se agruparan de forma sincrónica, cambiando de dirección, dispersándose y reagrupándose.

El concepto de enjambre de partículas se originó como una simulación de un sistema social, en donde el intercambio de información en la población ofrece una ventaja en la evolución por lo que esta hipótesis fue fundamental para el desarrollo del algoritmo. PSO es similar a GA en que ambos sistemas inicializan con una población de soluciones aleatorias, pero se diferencian en la forma en la que las soluciones potenciales denominadas partículas, “vuelan” a través del espacio de solución, mediante una velocidad [32], [33]. Muchos algoritmos se basan en la inteligencia de enjambre empleando diferentes fuentes de inspiración, sin embargo, es PSO el algoritmo más ampliamente utilizado.



**Figura 1.25** *Bandadas de aves y bancos de peces*  
**Fuente:** [34]

### 1.7.1. TERMINOLOGÍA UTILIZADA EN PSO

Para la comprensión del desarrollo del algoritmo es necesario conocer los términos que se mencionan a continuación:

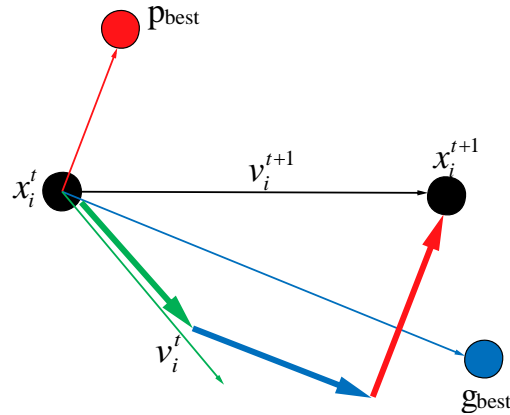
- **Partícula:** se conoce como partícula a cada individuo perteneciente al enjambre, todas las partículas actúan bajo el mismo principio de dirigirse hacia la localización del mejor personal y el mejor global.
- **Posición:** Se refiere a la ubicación de la partícula en un sistema de coordenadas N-dimensional, el área dimensional, es el espacio de solución para el problema de optimización, por lo que el conjunto de coordenadas representa una solución al problema.
- **Fitness:** función o método para evaluar la mejor posición, toma las posiciones de la partícula para evaluar la función y obtener un valor único que representa a la posición, es la interfaz entre el problema físico y el algoritmo de optimización, se lo define también como un criterio de evaluación del rendimiento de la posición de la partícula.
- **Pbest:** mejor posición personal, de cada partícula, en cada iteración del proceso de optimización la partícula compara el valor de fitness de su localización actual con la de pbest. Si es mejor la reemplaza.
- **Gbest:** mejor posición global, para todo el enjambre se escoge una localización que es la mejor de todas. En cada iteración del proceso de optimización también se compara el valor de fitness de la localización actual con el gbest, si es mejor se reemplaza.

### 1.7.2. DESARROLLO DEL ALGORITMO

Las partículas buscan optimizar la función de fitness de acuerdo con sus movimientos en el espacio de búsqueda, al principio se ubican al azar para ser evaluadas con la función de costo, luego, cada partícula se mueve a una nueva ubicación que proporcionará un mejor valor de la función de fitness. La posición de cada partícula representa una solución al problema de optimización, la cual será evaluada, la partícula se compone fundamentalmente de tres vectores principales, que son: el vector de posición  $x_i^t$ , que almacena la posición actual en la iteración t, el



vector  $pbest$  que guarda la mejor posición encontrada por la partícula y el vector velocidad  $v_i^t$ , que almacena la velocidad de la partícula.



**Figura 1.26** Partícula PSO  
Fuente: Autora

El concepto fundamental de este algoritmo es que, la velocidad de movimiento de cada partícula cambia, de acuerdo con la ubicación de las mejores posiciones tanto local como global, mientras más lejos se encuentre la mejor posición, mayor será la velocidad a la cual viajara la partícula, para de esta forma acercarse a el conjunto de partículas más cercanas al objetivo. El movimiento de la partícula se representa en la Figura 1.26, en la que se puede ver que se encuentra compuesta de tres factores principales: su propia inercia, mejor posición y la mejor posición global. En este algoritmo, la velocidad cambia de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$v_i^{t+1} = w * v_i^t + c_1 * rand * (pbest_i^t - x_i^t) + c_2 * rand * (gbest^t - x_i^t) \quad (28)$$

Mientras que la actualización de la posición se realiza mediante la posición anterior y la nueva velocidad calculada, lo cual se expresa en la siguiente ecuación:

$$x_i^{t+1} = v_i^{t+1} + x_i^t \quad (29)$$

En la ecuación ( 28), se puede notar que la velocidad se compone de tres partes que son [35]:

- **Momentum:** indica la tendencia de la partícula para mantenerse en la misma dirección de movimiento, se incorpora la velocidad previa en la velocidad actual de la partícula.
- **Parte cognitiva:** representa la atracción de las partículas hacia su mejor marca personal conocida como  $pbest$ . Se la conoce también como memoria, autoconocimiento o recuerdo.
- **Parte social:** representa la atracción de las partículas hacia el mejor global conocido como  $gbest$ . Se conoce también como cooperación o conocimiento social.

El momentum está regulado por un peso inercial conocido como  $w$ , el cual controla el efecto de la velocidad anterior en la nueva velocidad, la necesidad de incorporar este parámetro surgió por la velocidad máxima  $vmax$ , a la que se encuentran sujetas las partículas en el espacio de búsqueda, ya que si esta es demasiado alta las partículas podrían abandonar buenos lugares, mientras que si es demasiado baja una buena ubicación apartada, podría quedar fuera, por lo tanto para eliminar la trascendencia de  $vmax$ , en la actualización, se añade el término de peso a las ecuaciones. Lo que hace este parámetro es controlar de mejor forma la exploración y explotación del algoritmo, cabe destacar que en el algoritmo original no se incluía este parámetro, más bien fue incorporado en 1998, como una mejora del algoritmo [36]. De acuerdo con la experiencia de los investigadores,  $w$  toma valores entre 0.9 y 0.4, con un decrecimiento lineal, durante la ejecución del programa, lo que permite explorar ampliamente en áreas iniciales y en áreas cercanas en iteraciones posteriores. Puede considerarse a  $w$ , como la fluidez del medio en el que se desenvuelve la partícula, por lo que establecer un valor inicial alto de 0.9, significa un medio de baja viscosidad en el que las partículas pueden explorar libremente, mientras que al final un valor bajo de 0.4 hará que el sistema se vuelva más explotador. La velocidad máxima generalmente se establece entre el 10 y 20% del rango dinámico de la variable en cada dimensión.

En la parte cognitiva y social se encuentran dos parámetros conocidos como constantes de aceleración  $c_1$  y  $c_2$ , siendo  $c_1$  el factor cognitivo y  $c_2$  el factor social. Regulan la velocidad de vuelo de la partícula hacia su propia mejor posición y hacia

la mejor posición global. Es decir, funcionan como factores de escalamiento, determinando cuanto se influencia la nueva velocidad por *pbest* y *gbest*. Esta atracción también se encuentra regulada por el término *rand*, que representa la adición de números aleatorios entre 0 y 1, este componente aleatorio en el algoritmo ayuda a prevenir que se atasque en un mínimo local. Los pasos esenciales del algoritmo Particle Swarm Optimization pueden resumirse en el pseudocódigo presentado en el **Algoritmo 1**.

---

**Algoritmo 1: Particle Swarm Optimization**

---

Establecer la función objetivo:  $f(x)$ ,  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ ,  
 Definir los parámetros del algoritmo y el espacio solución:  
 $w = \text{peso inercial}$ ;  $c_1, c_2 = \text{factores de escalamiento}$ ;  $v_{max} = \text{velocidad máxima}$ ;  
 Inicializar la población, crear matrices de partículas con ubicaciones aleatorias en el espacio de búsqueda, para cada partícula se asigna una velocidad.  
 $t = 1$ ;  $iter = \text{número de iteraciones}$ ;  $i = \text{número de partículas}$ .  
**while** (número de iteraciones o criterio de parada):  
   **for all** (para cada partícula)  
     Evaluar cada partícula, con su conjunto de variables, según la función objetivo.  
     Comparar los valores de fitness de las partículas actuales con *pbest*;  
     **if**  $f_i(x_i) \leq f(pbest)$   
        $pbest = x_i$ ;  
     **End if**  
     Comparar los valores de fitness de las partículas actuales con *gbest*;  
     **if**  $f_i(x_i) \leq f(gbest)$   
        $gbest = x_i$ ;  
     **End if**  
     Actualizar las velocidades de las partículas mediante la ecuación ( 28) y las ubicaciones mediante la ecuación ( 29);  
   **End for**  
 $t = t + 1$ ;  
**End while**  
 Mostrar los resultados obtenidos de *pbest* y *gbest*.

---

El criterio de terminación de los algoritmos de optimización metaheurísticos generalmente es por número de iteraciones que deben cumplirse, sin embargo, existen otros criterios como una tolerancia en la función de fitness que significaría encontrar un candidato suficientemente bueno o cumplir un tiempo de optimización determinado.

El algoritmo PSO, tiene una amplia gama de aplicaciones en varias áreas, desde sistemas de economía y planificación urbana, medicina, control y automatización, telecomunicaciones, entre otros.

## 1.8. ALGORITMO DESTELLO DE LUCIÉRNAGAS (FA, FIREFLY ALGORITHM)

Es un algoritmo de inteligencia de enjambre, desarrollado por Dr. Xin-She Yang a finales del año 2007, en la Universidad de Cambridge. El fenómeno físico del comportamiento de las luciérnagas que inspira este algoritmo es la luz de los destellos que producen, hay cerca de dos mil especies de luciérnagas y su patrón de destellos son diferentes. La luz que producen las luciérnagas se origina por un proceso conocido como bioluminiscencia el mismo que está representado en la Figura 1.27, gracias a órganos fotogénicos especiales situados muy cerca de la superficie de su cuerpo, presenta dos funciones fundamentales que son atraer a una pareja o encontrar presas potenciales, aunque también se dice que puede servir como un mecanismo de defensa o advertencia de posibles depredadores, sincronizando sus flashes, formando así emergencias biológicas. El flash rítmico, la velocidad de parpadeo y el tiempo son parámetros de esta conducta, las hembras utilizan un patrón único para atraer al macho, pero también pueden imitar un patrón de otra especie para obtener alimento.



**Figura 1.27** *Luciérnagas*  
Fuente: [37], [38]

La intensidad de la luz  $I$ , decrece a una distancia particular a medida que la distancia  $r$  aumenta, debido a la ley del inverso cuadrado  $I \propto 1/r^2$ , el aire absorbe la luz la cual se hace cada vez más débil a medida que aumenta la distancia, es decir las características del medio de transmisión, por estos factores las luciérnagas pueden verse solo hasta una cierta distancia, generalmente varios cientos de metros en la noche, pero es suficiente para la comunicación entre ellas. La luz intermitente puede

modelarse como una función objetivo, utilizando este fenómeno para la formulación de este algoritmo de optimización [26].

En el algoritmo FA, se idealizan tres reglas principales, basadas en las características del comportamiento de las luciérnagas.

- 1) Todas las luciérnagas son independientes de género, para que la atracción entre una y otra luciérnaga se realice sin importar su sexo.
- 2) La atracción es proporcional al brillo, entonces para cualquier luciérnaga que destelle, la menos brillante se moverá hacia la más brillante. El atractivo disminuye a medida que aumenta la distancia, si no hay luciérnaga más brillante se mueven de manera aleatoria.
- 3) El brillo de la luciérnaga está condicionado por el paisaje de la función objetivo.

### 1.8.1. DESARROLLO DEL ALGORITMO

En el algoritmo FA, hay dos cuestiones importantes que son la variación de la intensidad de la luz y el modelamiento de la atracción. El atractivo de la luciérnaga está determinado por su brillo y este se asocia con la función objetivo del problema de optimización. Además, el objetivo debe variar con el grado de absorción.

Partiendo de la ley cuadrática inversa de la distancia, la intensidad de la luz se formula según la ecuación ( 30), en donde  $I_s$ , es la intensidad de la luz en la fuente,

$$I(r) = \frac{I_s}{r^2} \quad (30)$$

Si se especifica al medio con un coeficiente de absorción de luz fijo y la intensidad es dependiente de la distancia, el efecto de la combinación de la ecuación de la ley de la inversa del cuadrado, con la absorción puede modelarse con la siguiente forma Gaussiana:

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (31)$$

En donde  $I_0$ , es la intensidad a una distancia cero y  $\gamma$  es el coeficiente de absorción. La atracción de la luciérnaga es proporcional a la intensidad de la luz percibida por las luciérnagas cercanas, por lo tanto, también se puede definir a la atracción de la siguiente forma:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (32)$$

Para la implementación real, la atracción de una luciérnaga es una función monótonamente decreciente, que varía con la distancia  $r$  entre dos individuos,  $i$  y  $j$ , en donde  $\beta_0$  es el valor de atracción inicial en una distancia  $r = 0$ . La ubicación de una luciérnaga se expresa con las coordenadas cartesianas, por lo que la distancia  $r$  entre dos individuos, en el caso de dos dimensiones estará representada por:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (33)$$

Con ubicaciones  $x_i$  y  $x_j$ , de forma general la distancia euclidiana puede expresarse como:

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (34)$$

En consecuencia, el movimiento de una luciérnaga  $i$ , hacia otra  $j$ , está determinado por:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j^t - x_i^t) + \alpha \epsilon_i^t \quad (35)$$

En la ecuación ( 35), se encuentran tres términos que componen el movimiento de la luciérnaga, el primero corresponde a la posición actual, el segundo término es la atracción y el tercero es el componente aleatorio, en donde  $\alpha$ , es el parámetro que controla la aleatoriedad y  $\epsilon_i$  es un vector de números aleatorios extraídos de una distribución Gaussiana o de una distribución uniforme, para la implementación generalmente se sustituye por la expresión  $rand(-1/2)$ , donde  $rand$  es un número generado de una distribución uniforme. En el pseudocódigo presentado en **Algoritmo 2**, se presenta un resumen de los pasos fundamentales de este algoritmo.

---

**Algoritmo 2: Firefly Algorithm**

---

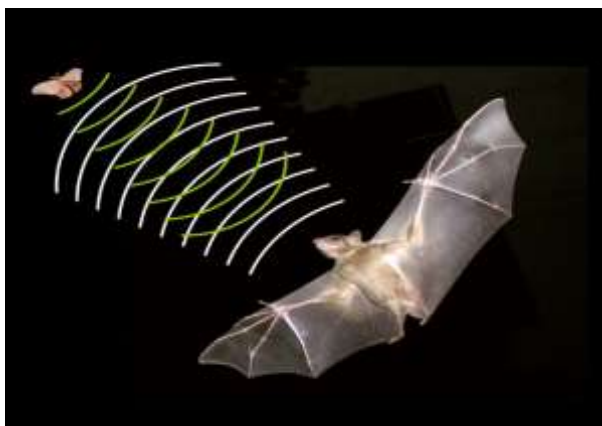
Establecer la función objetivo:  $f(x)$ ,  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ ,  
Definir los parámetros del algoritmo:  
 $I_i = \text{Intensidad de la luz}$ ; determinada por la función objetivo  
 $\gamma = \text{coeficiente de absorción}$ ;  $\alpha = \text{parámetro de aleatoriedad}$ ;  
Inicializar la población, crear matrices de partículas con ubicaciones aleatorias en el espacio de búsqueda.  
 $t = 1$ ;  $iter = \text{número de iteraciones}$ ;  $i = \text{número de partículas}$ .  
**while** (*número de iteraciones o criterio de parada*):  
    **for all** (para todas las luciérnagas)  
        Evaluar cada luciérnaga, con su conjunto de variables, según la función objetivo.  
    **End for**  
    Ordenar las luciérnagas y encontrar la mejor global  
  
    **for i=1: n** (todas las n luciérnagas)  
        **for j=1: n** (todas las n luciérnagas)  
            Calcular la distancia con la ecuación ( 34)  
            **if**  $I_i \leq I_j$   
                Variar la atracción de acuerdo con la distancia.  
                Mover la luciérnaga i hacia j con la ecuación ( 35)  
            **End if**  
        **End for**  
    **End for**  
  
 $t = t + 1$ ;  
**End while**  
Mostrar los resultados obtenidos del mejor global.

---

Este algoritmo tiene dos ventajas importantes que son la subdivisión automática y la capacidad de tratar con funciones multimodales [39]. Debido a que FA se basa en la atracción y que esta disminuye con la distancia, esto hace que la población automáticamente se subdivide en subgrupos y cada grupo puede enjambrar alrededor de cada óptimo local, logrando de esta forma obtener el óptimo global, pero mediante esta subdivisión es posible encontrar los óptimos simultáneamente, esto dependerá del tamaño de la población. De ahí su aplicación en problemas altamente multimodales.

## 1.9. ALGORITMO DE ECOLOCALIZACIÓN DE LOS MURCIÉLAGOS (BA, BAT ALGORITHM)

Es un algoritmo de inteligencia de enjambre inspirado en el comportamiento de ecolocalización de los micro murciélagos. Este algoritmo fue desarrollado por Dr. Xin-She Yang originalmente en el año 2010. Los murciélagos son animales muy interesantes ya que son los únicos mamíferos con alas y poseen una habilidad avanzada conocida como la ecolocalización, se estima que hay alrededor de 1000 especies diferentes de murciélagos de los cuales la principal diferencia es el tamaño. Para los procesos de optimización se utilizan generalmente las características de ecolocalización de los micro murciélagos ya que estos la usan ampliamente. La ecolocalización es utilizada para detectar presas, evitar obstáculos y localizar sus cuevas en la oscuridad para lo cual emiten un pulso de sonido muy fuerte y escuchan el eco que regresa al rebotar en los objetos circundantes [23]. En la Figura 1.28 se ilustra este comportamiento. Los pulsos tienen diferentes propiedades que pueden variar de acuerdo con la especie, como el ancho de banda y la frecuencia. Se dice que los murciélagos pueden detectar la distancia, la orientación del objetivo, el tipo de presa e inclusive la velocidad de movimiento del objetivo [26]. Cuando estos animales se encuentran en la búsqueda de presas aceleran la velocidad de emisión de los pulsos demostrando una capacidad de procesamiento de señales muy importante, el volumen también varía, aunque también combinan sus otros sentidos para la detección, sin embargo, el comportamiento de ecolocalización ha sido formulado de forma que pueda asociarse con una función objetivo y obtener así un nuevo algoritmo de optimización.



**Figura 1.28** *Ecolocalización de los murciélagos.*

**Fuente:** [40]



Para los algoritmos basados en inteligencia de enjambre, la búsqueda está fundamentada en dos componentes principales que son la exploración y la explotación, por lo que se han desarrollado estudios para mejorar el rendimiento en cuanto a estos temas de algoritmo BA estándar.

### 1.9.1. ALGORITMO ESTÁNDAR

En el algoritmo BA original se idealizan tres características importantes de la ecolocalización que se expresan en las siguientes reglas [26]:

- 1) Todos los murciélagos usan ecolocalización para detectar la distancia y la localización de un murciélago  $x_i$ , el cual es considerado como la solución de un problema de optimización.
- 2) Los murciélagos vuelan al azar con una velocidad  $v_i$  y una posición  $x_i$ , pueden ajustar de forma automática la frecuencia de los pulsos emitidos, la tasa de pulso  $r$ , dependiendo de la proximidad del objetivo.
- 3) El volumen varía de un valor positivo alto  $A_0$  a un valor mínimo constante  $A_{min}$ .

Para cada murciélago  $i$ , es necesario definir su posición y velocidad en espacio de búsqueda  $d$ -dimensional, además las reglas para la actualización de la posición y la velocidad de los murciélagos virtuales están dadas en [26] y son:

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})rand \quad (36)$$

$$v_i^{t+1} = v_i^t + (x^* - x_i^t)f_i \quad (37)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (38)$$

En donde  $rand$  es un vector de números aleatorios entre 0 y 1 de una distribución uniforme.  $x^*$  es la mejor solución global de entre todas las soluciones de los  $n$  murciélagos. Además, una nueva solución para cada murciélago se puede generar usando una búsqueda aleatoria alrededor de la anterior conocida como “random walk”, lo cual se expresa en la ecuación ( 39). En donde  $\epsilon \in [-1,1]$  representa un número aleatorio y  $\langle A^{t+1} \rangle$  es el promedio de volumen de todos los murciélagos en esa iteración.

$$x_{new} = x_{old} + \varepsilon \langle A^{t+1} \rangle \quad (39)$$

Para el algoritmo estándar el volumen  $A_i$  y la tasa de emisión de pulsos  $r_i$ , se actualizan a medida que avanzan las iteraciones, el volumen disminuye y la frecuencia del pulso aumenta cuando el murciélago se acerca a la presa. Las ecuaciones que representan la actualización de estos parámetros son las siguientes:

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (40)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^t [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (41)$$

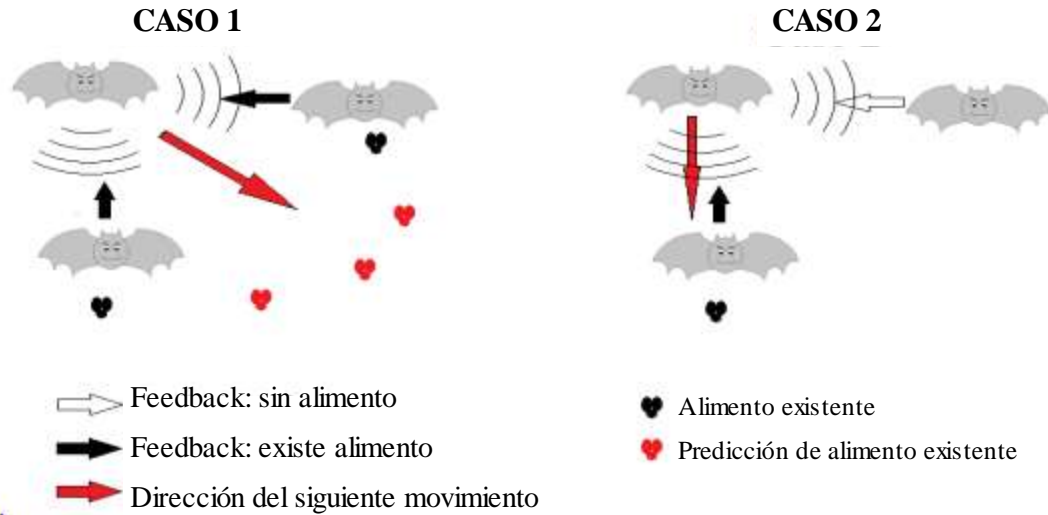
Donde  $\alpha$  y  $\gamma$  son valores constantes para el primero valores entre 0 y 1 mientras que para el segundo valores positivos. Se tiene que para  $t \rightarrow \infty$ ,  $A_i^t \rightarrow 0$  y  $r_i^t \rightarrow r_i^0$ .

### 1.9.2. ALGORITMO DE ECOLOCALIZACIÓN DIRECCIONAL DE LOS MURCIÉLAGOS (DBA, DIRECTIONAL BAT ALGORITHM)

Se han incrustado nuevas reglas y modificaciones a BA mediante el uso de la ecolocalización direccional y otras características al que se conoce como Directional Bat Algorithm (dBA), propuesto por Chakri et al en [41]. En esta propuesta el algoritmo presenta el mismo procedimiento que el algoritmo estándar, pero sugiere cuatro modificaciones con el objetivo de mejorar la capacidad de exploración y explotación.

La ecolocalización direccional es utilizada por los murciélagos como un sistema de navegación, los animales emiten de manera continua pulsos de corta duración y mediante el análisis de sus ecos pueden crear una imagen mental de sus alrededores, en esta modificación la información de otros murciélagos se puede utilizar para mejorar el proceso de búsqueda, los pulsos pueden viajar en diferentes direcciones, por lo que cada murciélago emite dos pulsos en direcciones diferentes, esta característica puede simular la diferencia de tiempo de retraso en los ecos recibidos por los dos oídos, la dirección de uno de los pulsos es la de la mejor ubicación o mejor solución, es decir donde se considera que existe alimento y la otra en la dirección de un alimento elegido al azar. Esto se puede observar en la Figura 1.29, en donde un murciélago emite dos pulsos en dos direcciones diferentes una de

ellas es la mejor posición y la otra es aleatoria, el eco recibido se conoce como feedback y mediante este los murciélagos pueden saber si existe alimento entre dos murciélagos, la mejor ubicación se determina por la función de fitness.



**Figura 1.29** Esquema comportamiento de ecolocalización direccional.  
Fuente: [41]

Existen dos casos, de acuerdo con la retroalimentación que perciben los murciélagos, cuando se confirma que existe comida entre los dos animales, el murciélago se mueve en una dirección en la región entre los dos murciélagos, donde se supone que existe abundante comida, mientras que en el segundo caso se mueve hacia la mejor posición. Estos movimientos se expresan en la ecuación (42). En donde  $x_k^t$  es la ubicación aleatoria seleccionada por el murciélago  $k \neq i$ ,  $x^*$  es la mejor solución global.

$$\begin{cases} x_i^{t+1} = x_i^t + (x^* - x_i^t)f_1 + (x_k^t - x_i^t)f_2 & \left( \text{si } F(x_k^t) < F(x_i^t) \right) \\ x_i^{t+1} = x_i^t + (x^* - x_i^t)f_1 & \text{otro} \end{cases} \quad (42)$$

Las frecuencias de los dos pulsos emitidos se representan mediante  $f_1$  y  $f_2$  y se actualizan mediante la ecuación (43).

$$\begin{cases} f_1 = f_{min} + (f_{max} - f_{min})rand1 \\ f_2 = f_{min} + (f_{max} - f_{min})rand2 \end{cases} \quad (43)$$

En donde  $rand1$  y  $rand2$  son vectores de números aleatorios de una distribución uniforme en el rango de 0 y 1. Para la búsqueda local los murciélagos

pueden pasar de sus posiciones actuales a nuevas posiciones aleatorias utilizando el denominado random walk, la ecuación utilizada para este movimiento es:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \langle A^t \rangle \varepsilon w_i^t \quad (44)$$

Donde  $\langle A^t \rangle$  es el promedio de volumen de todos los murciélagos y  $\varepsilon \in [-1,1]$  es un vector aleatorio. Se incorpora además un parámetro para regular la escala de búsqueda a medida que avanza el proceso iterativo, denominada  $w_i$ , la cual disminuye de acuerdo con la función presentada en (45). En donde  $w_{i0}$  y  $w_{i\infty}$  son los valores inicial y final respectivamente, mediante esta fórmula es posible controlar el proceso de actualización del algoritmo de acuerdo con el número de iteraciones,  $t$  representa la iteración en la que se encuentra el algoritmo, mientras que  $t_{max}$  es el máximo número de iteraciones.

$$w_i^t = \left( \frac{w_{i0} - w_{i\infty}}{1 - t_{max}} \right) (t - t_{max}) + w_{i\infty} \quad (45)$$

Las ecuaciones para actualizar la frecuencia de pulso y el volumen en el algoritmo estándar alcanzan su valor final muy rápidamente, reduciendo la capacidad de cambio de búsqueda global y búsqueda local, por lo que en dBA se utilizan la expresiones presentadas en (46) y (47), para la tasa de pulso y el volumen respectivamente, las cuales también actualizan los valores con relación al número de iteraciones máximo y la iteración actual del proceso de esta forma se el proceso se realiza de manera proporcional.

$$r^t = \left( \frac{r_0 - r_\infty}{1 - t_{max}} \right) (t - t_{max}) + r_\infty \quad (46)$$

$$A^t = \left( \frac{A_0 - A_\infty}{1 - t_{max}} \right) (t - t_{max}) + A_\infty \quad (47)$$

Donde 0 y  $\infty$  representan los valores iniciales y finales respectivamente. La tasa de pulso  $r$  controla el movimiento de los murciélagos, cambiando entre búsqueda local y búsqueda global, mientras que el volumen  $A$ , controla la aceptación o el rechazo de la nueva solución generada, al rechazar algunas soluciones es posible evitar que el algoritmo quede atrapado en un óptimo local. Finalmente, en dBA, a diferencia de BA es posible actualizar la tasa de pulso y el volumen y aceptar una

nueva solución si es mejor que la anterior. El proceso de optimización de dBA se encuentra resumido en el pseudocódigo mostrado en el **Algoritmo 3**.

---

**Algoritmo 3: Directional Bat Algorithm**

---

Establecer la función objetivo:  $f(x)$ ,  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ ,  
 Inicializar la población, crear matrices con ubicaciones aleatorias en el espacio de búsqueda.  
 Inicializar los parámetros del algoritmo:  
 $r_i = \text{tasa de emisión de pulso}$ ;  $A_i = \text{volúmen}$ ;  $w_i = \text{escala de búsqueda}$ ;  
 $f_{max}$  y  $f_{min} = \text{frecuencia máxima y mínima}$ ;  
 $t = 1$ ;  $iter = \text{número de iteraciones}$ ;  $i = \text{número de bats}$   
 Evaluar la función objetivo  
 Encontrar la mejor posición global  $x^*$   
**while** (número de iteraciones o criterio de parada):  
   **for all** (para todos los murciélagos)  
     Seleccionar un murciélago aleatorio  $x_k^t$ ;  $k \neq i$   
     Generar frecuencias con la ecuación ( 43)  
     Actualizar las ubicaciones con la ecuación ( 42)  
   **End for**  
  
   **if**  $rand > r_i$   
     Generar una solución local alrededor de la mejor solución mediante ( 44)  
     Actualizar  $w_i$ , con la ecuación ( 45)  
   **End if**  
  
   **for all** (para todos los murciélagos)  
     **if**  $rand < A_i \ \& \ F(x_k^t) < F(x_i^t)$   
       Aceptar la nueva solución  
       Incrementar  $r_i$ , con la ecuación ( 46)  
       Reducir  $A_i$ , con la ecuación ( 47)  
     **End if**  
  
     **if**  $F(x_i^{t+1}) < F(x^*)$   
       Actualizar la mejor solución  $x^*$   
     **End if**  
   **End for**  
  
 $t = t + 1$ ;  
**End while**  
 Mostrar los resultados obtenidos del mejor global.

---

En el estudio presentado en [41], se muestran varios experimentos realizados con funciones clásicas de referencia en las que se demuestra el rendimiento del algoritmo con las modificaciones realizadas, las variaciones y el control de las tasas de emisión de pulsos y el volumen proporcionan un mecanismo de control de la exploración y explotación del proceso de optimización de acuerdo a la cantidad máxima de iteraciones utilizadas.



# **CAPÍTULO 2. CRITERIOS DE DISEÑO**

## **2.1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se aborda aspectos tanto teóricos como prácticos que son necesarios tomar en cuenta en el diseño de las antenas planares. Es fundamental la elección de los parámetros para el diseño de las antenas, aquí se establecen los diseños teóricos para dos tipos de parches de donde se obtienen las variables que posteriormente se utilizarán en el proceso de optimización.

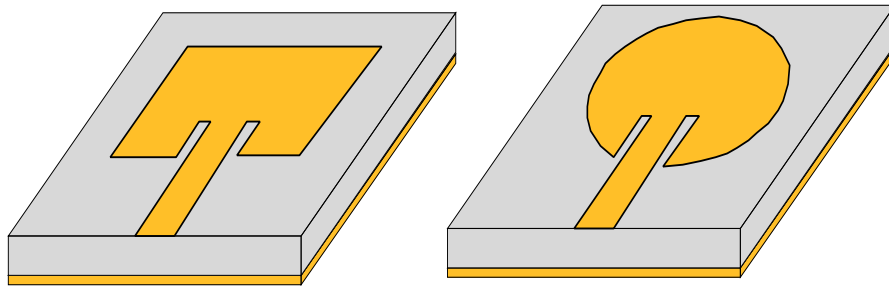
Para el diseño de un tipo de antena Microstrip es necesario iniciar con los parámetros de los elementos que componen la antena como el sustrato que se utilizará para su construcción, la frecuencia en la que debe operar de acuerdo con la aplicación, ya que esto influye en el comportamiento u operación de la antena, por lo que se debe partir de estos lineamientos para el proceso de diseño.

## **2.2. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO**

### **2.2.1. FORMA DEL PARCHES**

Como se ha especificado en el capítulo 1 sobre la síntesis de las antenas planares, existen diferentes formas de parches que se utilizan en varias aplicaciones, las más comunes son los parches de tipo rectangular y circular, los cuales serán objeto de este estudio, primero como un diseño general del tipo de parche y luego, de acuerdo a las dimensiones de cada una de las formas se realizará el perfeccionamiento con las técnicas de optimización mencionadas. Las antenas tanto

del parche rectangular como el parche circular tendrán una distancia de inserción para conectar la línea de alimentación, lo cual se conoce como inset-feed, de esta forma se acopla la antena a una impedancia de entrada deseada, en un lugar específico, para tener un acople. En la Figura 2.1 se observa la forma de los parches analizados en este estudio.



**Figura 2.1** Formas de parche, rectangular y circular con inserción.

**Fuente:** Autora

### **2.2.2. FRECUENCIA DE OPERACIÓN**

La frecuencia de operación de una antena es un parámetro fundamental debido a que las dimensiones de la antena y su comportamiento estarán ligados directamente a la frecuencia de trabajo de la antena. Se denomina también frecuencia de resonancia debido a que en esta frecuencia se anulan las componentes reactivas de la antena y se presentaría solo la componente resistiva.

Las frecuencias se dividen por intervalos que se conocen como bandas de frecuencia, que están contenidas dentro de lo que se denomina como el espectro electromagnético, las bandas de frecuencia se asignan para diferentes usos en las radiocomunicaciones. Se regulan mediante la Unión Internacional de las Telecomunicaciones (UIT). En la Tabla 2.1 se pueden identificar las bandas del espectro electromagnético, mientras que las bandas en el rango de microondas se encuentran en la Tabla 2.2. Sin embargo, cada país posee su espectro electromagnético en el cual se regula la asignación de cada rango para un servicio determinado, dentro de este también existen bandas libres reservadas a nivel internacional, para fines científicos, médicos, industriales u otros propósitos en telecomunicaciones [42].



**Tabla 2.1 Bandas de frecuencia [42]**

<b>Sigla</b>	<b>Denominación</b>	<b>Rango de Frecuencias</b>
VLF	VERY LOW FREQUENCY	10 KHz – 30 KHz
LF	LOW FREQUENCY	30 KHz – 300 KHz
MF	MEDIUM FREQUENCY	300 KHz – 3 MHz
HF	HIGH FREQUENCY	3 MHz – 30 MHz
VHF	VERY HIGH FREQUENCY	30 MHz – 300 MHz
UHF	ULTRA HIGH FREQUENCY	300 MHz – 3 GHz
SHF	SUPER HIGH FREQUENCY	3 GHz – 30 GHz
EHF	EXTRA HIGH FREQUENCY	30 GHz – 300 GHz

**Tabla 2.2 Bandas de frecuencia microonda [42]**

<b>Banda</b>	<b>Rango de Frecuencias</b>
L	1 GHz – 2 GHz
S	2 GHz – 4 GHz
C	4 GHz – 8 GHz
X	8 GHz – 12.4 GHz
Ku	12.4 GHz – 18 GHz
K	18 GHz – 26.5 GHz
Ka	26.5 GHz – 40 GHz
mm	40 GHz – 300 GHz

Las antenas de tipo parche se utilizan en diversos campos como en aplicaciones médicas, satelitales, militares, etc., que en general son aplicaciones inalámbricas de telemetría, redes inalámbricas de área local como Bluetooth, Zigbee, Wifi, entre otras, las aplicaciones incluyen sistemas de comunicaciones personales inalámbricos, las frecuencias típicas se encuentran en las bandas S, C y Ku. En este proyecto se trabajará en un rango de frecuencia libre y sin licencia primeramente para una frecuencia de resonancia de  $f = 2.4 \text{ GHz}$  y posteriormente el proceso de optimización tomará otras frecuencias para la verificación.

## **2.3. SUSTRATO**

En el diseño de antenas de microcinta una vez determinada la frecuencia de operación para la aplicación el siguiente paso es elegir un sustrato para el soporte mecánico de la antena, el sustrato consta de un material dieléctrico que debe satisfacer los requerimientos tanto eléctricos como mecánicos para el funcionamiento de la antena. Los sustratos tienen varios parámetros de importancia como la constante dieléctrica y la tangente de pérdidas ya que estas características varían en función de la frecuencia e incluso de la temperatura, dentro de estas características también se encuentra el espesor, además, el costo de producción de una antena parche tiene gran relación con el sustrato utilizado y el conector [2]. Evidentemente un sustrato adecuado dependerá de la aplicación, los sustratos utilizados para la elaboración de antenas planares pueden ser de varios materiales, entre los que se tienen:

- Sustratos cerámicos
- Sustratos ferromagnéticos
- Sustrato de semiconductores
- Sustratos sintéticos
- Sustratos compuestos

### **2.3.1. SUSTRATO DIELECTRICO FR-4**

El sustrato FR-4 está compuesto de fibra de vidrio, resinas con buenas propiedades aislantes que generan buena estabilidad térmica y mecánica. El sustrato de tipo Epoxy/fibra de vidrio o FR-4, ha sido ampliamente utilizado en circuitos digitales debido a sus características principalmente de bajo costo, disponibilidad en el mercado y la facilidad en la fabricación de los elementos. En la Tabla 2.3 se puede observar una lista de varios sustratos utilizados para la fabricación de antenas planares, algunos sustratos son de pérdidas bajas y bajo costo sin embargo se puede notar que existen otros sustratos considerados como óptimos, pero de los cuales su costo puede llegar a ser muy elevado y de muy difícil adquisición. Las principales características del sustrato son la constante dieléctrica y el ancho las mismas que se describen a continuación.

**Tabla 2.3 Sustratos para antenas parche [43]**

<b>Sustrato</b>	<b>Constante dieléctrica: <math>\epsilon_r</math></b>	<b>Pérdidas: <math>\tan(\delta)</math></b>
Epoxy fiberglass FR-4	4.4	0.01
Rohacell Foam	1.07	0.001
Honeycomb	1.02	<0.0001
Taconic	2.33	0.0009
Kapton	3.5	0.002
CuClad	2.17	0.0009
RT Duroid 5880	2.2	0.0009
RT Duroid 6010	10.5	0.002
GaAs	13	0.0006

### **2.3.2. CONSTANTE DIELECTRICA DEL SUSTRATO**

El efecto de la constante dieléctrica funciona igual que en la capacidad de carga de un capacitor, es uno de los parámetros más sensibles de las antenas tipo parche. De acuerdo al material utilizado en el sustrato, es decir tomando en cuenta la constante dieléctrica del material, se puede tener tres categorías [1]:

- Con  $\epsilon_r$  entre 1.0-2.0 los materiales generalmente son aire, espuma de polietileno o panel dieléctrico.
- Con  $\epsilon_r$  entre 2.0-4.0 el material es en su mayor parte de fibra de vidrio reforzado con teflón.
- Con  $\epsilon_r$  entre 4.0-10.0 el material puede ser cerámica o cuarzo.

Para una mayor eficiencia y ancho de banda de la antena se recomiendan materiales con una constante dieléctrica baja, pero debido a los tamaños pueden resultar altamente costosos, por lo que materiales comerciales se encuentran generalmente en el segundo rango mencionado. El material FR-4 trabaja dentro de un rango de 2 a 4 GHz y no puede trabajar en altas potencias a frecuencias de microondas, el valor de su coeficiente dieléctrico es  $\epsilon_r = 4.4$ , sin embargo, es comercial para trabajar en circuitería de microondas.

### 2.3.3. ESPESOR DEL SUSTRATO

El espesor o ancho del sustrato también es otro parámetro muy importante ya que la antena Microstrip debe ser ligera para varias aplicaciones que así lo requieren, sin embargo también debe ser resistente mecánicamente, esto indica que el tamaño debe ser compacto por lo que la altura del sustrato se transforma en una restricción de diseño dada por el sustrato específico utilizado, este valor se involucra directamente con la directividad y el ancho de banda de la antena para una alta directividad y un gran ancho de banda será necesario un sustrato grueso o de baja permeabilidad, pero escoger un sustrato grueso influye en la eficiencia de la antena y un valor de baja permeabilidad en las dimensiones de la antena. El grosor del sustrato es generalmente de 0.01 a 0.05 de la longitud de onda en el espacio libre  $\lambda_0$ . Para los diseños de antenas realizados en este estudio se considera un sustrato de FR-4, de 1,5 mm de espesor, la cual es una altura comercial común recubierto con material conductor en ambos lados.

## 2.4. DISEÑO DE ANTENA PATCH RECTANGULAR

En esta sección se presenta el diseño de la antena patch rectangular partiendo de los estudios teóricos realizados y de acuerdo a la forma especificada, tipo de sustrato y frecuencia de operación establecidos en las secciones anteriores. En el capítulo uno se determinó que existen varios métodos de análisis para las antenas de tipo Microstrip, sin embargo, son el modelo de línea de transmisión y el modelo de cavidad los que se utilizan para desarrollar el diseño convencional de las antenas. Para el diseño se tienen varios procesos como la estructura del parche radiador, el sustrato y la alimentación para la antena. Los datos necesarios para el diseño convencional se ilustran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Parámetros de diseño de la antena patch

Parámetro	Valor
Frecuencia de operación (fr)	2.4 GHz
Espesor del sustrato (h)	1.5 mm
Constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ )	4.4
Impedancia de entrada ( $Z_0$ )	50 ohmios

### 2.4.1. DISEÑO DEL PARCHE RADIADOR

Se busca obtener las dimensiones del parche empezando por el ancho del parche radiador de la antena rectangular, el cual está dado por:

$$W = \frac{1}{2fr\sqrt{u_0\epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (48)$$

En donde c es igual a la velocidad de la luz en el espacio libre y tiene un valor de  $c = 3 \times 10^8$  m/s, reemplazando los valores se obtiene:

$$W = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 * (2.4 \text{ GHz})} \sqrt{\frac{2}{4.4 + 1}}$$

$$W = 38.0363 \text{ mm}$$

El siguiente paso es encontrar la constante dieléctrica efectiva de la antena  $\epsilon_{reff}$ , la cual surge debido al efecto de desbordamiento que hace que algunas ondas viajen por el sustrato mientras que otras lo hacen por el aire, los valores se

encuentran en el rango  $1 < \varepsilon_{reff} < \varepsilon_r$ , se determina mediante la siguiente ecuación (49), varía de acuerdo a la frecuencia, es decir aumenta si la frecuencia de operación aumenta, mientras que para bajas frecuencias se mantiene constante.

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (49)$$

$$\varepsilon_{reff} = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{1.5}{38.03} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\varepsilon_{reff} = 4.1006$$

Posteriormente de acuerdo al modelo de línea de transmisión es necesario determinar la extensión real del parche ya que, por el efecto de desbordamiento, eléctricamente parece más grande que sus dimensiones reales, la longitud del parche se extiende una distancia  $\Delta L$ , la cual se puede aproximar con la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\varepsilon_{reff} + 0.3) + \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\varepsilon_{reff} - 0.258) + \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (50)$$

$$\Delta L = h * 0.412 \frac{(\varepsilon_{reff} + 0.3) + \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\varepsilon_{reff} - 0.258) + \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$$

$$\Delta L = 1.5 * 0.412 \frac{(4.1006 + 0.3) + \left(\frac{38.03}{1.5} + 0.264\right)}{(4.1006 - 0.258) + \left(\frac{38.03}{1.5} + 0.8\right)}$$

$$\Delta L = 0.6932 \text{ mm}$$

El parche se extiende  $\Delta L$ , por lo que la longitud efectiva del parche se indica ahora en la siguiente ecuación.

$$L_e = L + 2\Delta L \quad (51)$$

La longitud real del parche se puede determinar en función de la frecuencia de resonancia de la antena, para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$L = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (52)$$

$$L = \frac{300}{2(2.4)\sqrt{4.1006}} - 2(0.6932)$$

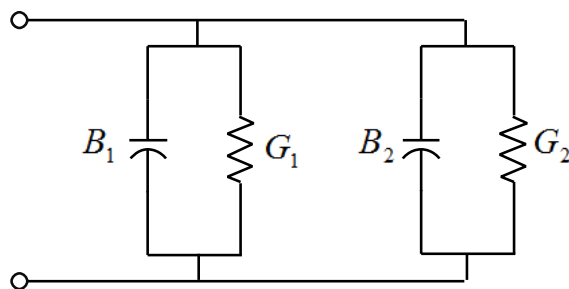
$$L = 29.4778 \text{ mm}$$

Por lo que la longitud efectiva según la ecuación ( 51), sería:

$$L_e = 30.8643 \text{ mm}$$

### 2.4.2. DISTANCIA DE LA ALIMENTACIÓN

La técnica de inserción permite efectivamente el acoplamiento de la antena con una línea Microstrip con una impedancia característica que en este caso es de 50 ohmios ya que se ha demostrado que la impedancia de entrada depende del punto de alimentación. Para encontrar la posición de inserción, se parte del modelo de línea de transmisión de la antena planar, en la Figura 2.2 se observa el modelo equivalente de línea de transmisión de la antena. El circuito representa al parche planar como dos ranuras radiantes, con un ancho  $W$  y una altura  $h$ , separados por una línea de transmisión de baja impedancia de longitud  $L$ , cada ranura se representa en el modelo equivalente con una conductancia  $G$  y susceptancia  $B$  en paralelo [3].



**Figura 2.2** Circuito equivalente para el modelo de línea de transmisión  
Fuente: [3]

Para calcular la impedancia de entrada de la antena primero se calcula la longitud de onda de acuerdo a la frecuencia de operación utilizada con la ecuación ( 53).

$$\lambda_0 = \frac{c}{fr} \quad (53)$$

Luego, la conductancia de una sola ranura se puede obtener a partir del análisis del modelo de cavidad, de donde se deriva la ecuación (54).

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (54)$$

En donde:

$$I_1 = -2 + \cos(X) + XS_i(X) + \frac{\sin(X)}{X} \quad (55)$$

$$X = k_0W \quad (56)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (57)$$

Es necesario tomar en cuenta el efecto de acoplamiento entre las ranuras de la antena, para el cálculo de la impedancia de entrada, este acoplamiento se define como  $G_{12}$  y se calcula en términos de la zona lejana, representada en la ecuación (58), en donde  $J_0$ , es la función de Bessel de tipo uno, de orden cero.

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 J_0(k_0L \sin \theta) \sin^3 \theta \, d\theta \quad (58)$$

Con lo cual se puede obtener la resistencia de entrada de la antena planar, mediante la ecuación (59).

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad (59)$$

Obteniendo el siguiente valor para la antena patch rectangular.

$$R_{in} = 321.6709 \, \Omega$$



La resistencia de entrada para una distancia de inserción se calcula con la formula presentada en ( 60), de donde se despeja el valor de  $y_0$ , el cual es la distancia de inserción de la alimentación.

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2 \left( \frac{\pi}{L} y_0 \right) \quad ( 60)$$

$$= R_{in}(y = 0) \cos^2 \left( \frac{\pi}{L} y_0 \right)$$

$$y_0 = 10.9363 \text{ mm}$$

## 2.5. DISEÑO DE ANTENA PATCH CIRCULAR

Al igual que en la sección anterior en esta parte se presenta el diseño teórico para la antena patch circular el cual parte del modelamiento de cavidad para el parche circular. Se toman además los parámetros de diseño presentados en la Tabla 2.4, para el cálculo del diseño.

### 2.5.1. DISEÑO DEL PARCHE RADIADOR

Para el diseño de tipo circular se toma al plano de tierra y al material conductor como una cavidad circular, los modos soportados tanto para el parche rectangular como para el circular son aquellos en los que la altura del sustrato es menor que la longitud de onda. En el caso del parche circular existe solo un grado de libertad para controlar en el diseño, este es el radio. El proceso de diseño basado en el análisis del modelo de cavidad para el parche circular se asume que se tiene, la constante dieléctrica, la frecuencia de operación y la altura del sustrato ya establecidas previamente. El radio se calcula mediante la fórmula presentada en la ecuación ( 61).

$$a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (61)$$

En donde:

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{fr\sqrt{\epsilon_r}} \quad (62)$$

Reemplazando los datos, para la antena diseñada en este caso se obtiene un radio de:

$$a = 17.367 \text{ mm}$$

Al igual que en la antena patch rectangular el efecto del desbordamiento hace que la antena se vea eléctricamente más larga, por lo que aquí también se introduce un radio efectivo denominado  $a_e$ , para reemplazar al radio original

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (63)$$

Para la antena diseñada el radio efectivo es igual a:

$$a_e = 17.462$$

### 2.5.2. DISTANCIA DE LA ALIMENTACIÓN

De acuerdo al modelo de cavidad en una antena patch de forma circular se puede calcular la resistencia de entrada mediante un extenso análisis matemático, sin embargo, existen aproximaciones que permiten calcular la distancia de inserción como la fórmula presentada en la ecuación ( 64), la misma que se utilizará para el diseño teórico de la antena patch circular [44].

$$y_0 = 10^{-4} [0.001699 \epsilon_r^7 + 0.13761 \epsilon_r^6 - 6.1783 \epsilon_r^5 + 93.187 \epsilon_r^4 - 682.69 \epsilon_r^3 + 2561.9 \epsilon_r^2 - 4043 \epsilon_r^1 + 6697] \frac{a}{2} \quad (64)$$

De la cual se obtiene un valor de:

$$y_0 = 5.334 \text{ mm}$$

De esta forma se obtienen las dimensiones principales para el diseño de estos dos tipos de formas, para el cálculo de los valores presentados se desarrollan dos scripts en Matlab, los resultados de simulación de los dos diseños serán presentados posteriormente y se contrastarán con los obtenidos mediante los algoritmos de optimización elegidos para el diseño.



# **CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DISEÑO DE ANTENAS PLANARES**

## **3.1. INTRODUCCIÓN**

En el capítulo anterior se presentó los modelos ya establecidos para el análisis de antenas de tipo parche, sin embargo, se considera a estos como poco exactos, pero se presentan como un punto de partida para el análisis. En este capítulo se presenta la implementación de tres algoritmos de optimización metaheurísticos enfocados en el diseño de antenas planares con los cuales se pretende mejorar las características del diseño en antenas. Mediante un método que incorpora la simulación de los candidatos obtenidos en los procesos de optimización. Como primer paso para realizar la optimización de la antena planar se realiza la comunicación entre dos herramientas de análisis, conocidas como MATLAB y ANSYS HFSS. La primera contiene la parte de los algoritmos como tal y la gestión de los datos para el modelo, la otra realiza la simulación para la calificación del modelo. Para el entorno creado entre las dos herramientas se utiliza los algoritmos de optimización PSO, FA, dBA, especificados en el capítulo uno de forma teórica, para encontrar la solución óptima de diseño, en base a los parámetros especificados.

### 3.2. MATLAB

MATLAB deriva su nombre de “*MATrix LABoratory*”, es un entorno de computación técnica, para programación y ejecución de cálculo numérico o simbólico mediante procedimientos rápidos y precisos, posee un lenguaje de programación de alto nivel mediante el cual expresa matemáticas en forma de vectores, matrices y arrays [45], [4], [46].

Gracias a su entorno interactivo, MATLAB es utilizado en una amplia variedad de actividades, incluyendo desarrollo de algoritmos, modelado, simulación, creación de prototipos, análisis de datos, visualización de gráficos en ingeniería y construcción de interfaz gráfica de usuario [47], además el código MATLAB se puede integrar con otros lenguajes, permitiendo obtener diferentes algoritmos y aplicaciones [48], en diferentes campos como comunicaciones, sistemas de control, sistemas de prueba, modelado y medición, sistemas financieros, entre otros.

### 3.3. ANSYS HFSS

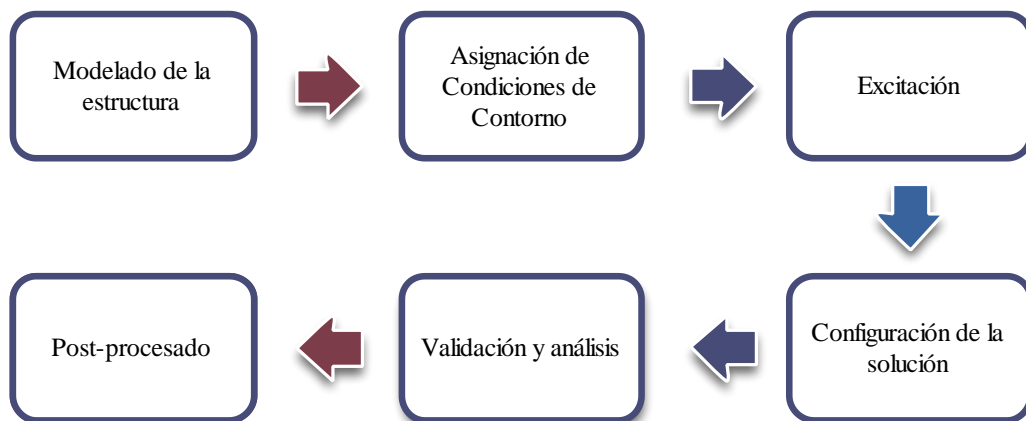
High Frequency Structure Simulator (HFSS) es una herramienta de simulación de campos electromagnéticos 3D, utilizada para el diseño de diferentes productos en alta frecuencia. HFSS ofrece métodos de resolución mediante elementos finitos y otros métodos de ecuaciones integrales, permitiendo resolver una amplia gama de aplicaciones en microondas, RF y de alta velocidad [49].

El método de elementos finitos (FEM) utilizado por HFSS como técnica numérica, divide la estructura en muchas subsecciones denominadas elementos finitos, los cuales tienen forma de tetraedros, el programa encuentra la solución al interior de estos tetraedros, luego, estos campos están interrelacionados de modo que las ecuaciones de Maxwell se satisfacen a través de los límites entre elementos, dando como resultado una solución de campo para toda la estructura original. Posteriormente se determina la solución de la matriz S [50]. Utiliza un proceso de refinamiento de malla adaptable el cual produce resultados altamente precisos para las estructuras.

HFSS es una aplicación que se encuentra dentro de la plataforma ANSYS *Electronics Desktop*, la cual funciona como un paquete unificado de las diferentes herramientas que proporciona ANSYS.

### 3.4. MODELADO Y SIMULACIÓN EN ANSYS HFSS

El software Ansys HFSS se usa para el diseño, modelamiento y análisis de sistemas electromagnéticos, el modelado de estas estructuras tiene un procedimiento que se encuentra dividido en seis etapas las cuales se observan en la Figura 3.1. Para cualquier análisis realizado en este software es necesario el desarrollo de cada una de estas etapas desde el modelado hasta la presentación de resultados.



**Figura 3.1** Modelado en Ansys HFSS.  
Fuente: Autora.

#### 3.4.1. MODELADO DE LA ESTRUCTURA

Es la primera etapa de una simulación en el programa, aquí se deberá dar forma a la estructura o crear el modelo geométrico que se desea analizar y especificar aspectos como las dimensiones físicas y partes que componen el sistema. Para esta etapa se pueden utilizar las herramientas de dibujo localizadas en las Toolbars existentes en la interfaz del programa, existen diversas posibilidades como curvas, polígonos y cuerpos geométricos, además es posible modificar las estructuras mediante herramientas como unir, sustraer, dividir, girar o reflejar los diferentes elementos creados. Existen varias formas de modelar las estructuras, mediante la interfaz gráfica antes mencionada, asignando la posición de inicio y las medidas físicas en la barra inferior de la ventana de modelado 3D y también accediendo a las propiedades de los objetos creados, cuando se crea una estructura se añade a una lista en la parte izquierda de la ventana, mediante la cual se accede a la ventana de

propiedades, en donde es posible cambiar las medidas, la posición, el color, el material y hasta el nombre del objeto creado. El modelador de HFSS permite también una opción avanzada como es crear una estructura mediante variables a las cuales se puede asignar valores para definir las dimensiones geométricas de la estructura, a esto se lo conoce como estructura parametrizada y es de gran utilidad para el objetivo de este estudio.

### **3.4.2. ASIGNACIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO**

La asignación de las condiciones de contorno son el siguiente paso, estos límites deben definirse para cada uno de los objetos creados que formen parte de la estructura, existen varios tipos de condiciones de contorno que se pueden utilizar en HFSS que se utilizaran de acuerdo al problema, estas son, Perfect E, Perfect H, Radiation, Máster, entre otras, para el caso de la antena patch se utiliza tanto para el parche como para el plano de tierra el tipo Perfect E, que significa Perfect Electric Conductor, se lo conoce también como material PEC, es una condición predeterminada, que representa a los conductores sin pérdidas dentro de la simulación.

### **3.4.3. EXCITACIÓN**

Cuando se ha escogido el modelado y tipo de materiales de la estructura se debe caracterizar la misma de manera que sea posible su análisis para lo cual es necesario incluir excitaciones o fuentes de campo electromagnético, voltaje o corriente que alimenten la estructura. De la misma forma que la anterior existe varios tipos de configuración en HFSS, como, Wave Port, Lumped Port, Terminal, Floquet Ports entre otros, la excitación adecuada para la antena patch es de tipo Lumped Port.

### **3.4.4. CONFIGURACIÓN DE LA SOLUCIÓN**

Una vez terminado el modelado y los demás elementos es necesario la configuración del análisis el cual se conoce como Analisis Setup, al cual se puede acceder mediante el árbol del proyecto, en este paso se debe seleccionar la frecuencia para la cual se ha diseñado el dispositivo, los pasos máximos que utilizará el simulador para el análisis, el máximo error permitido, en el mallado de los elementos finitos. Además, es necesario asignar un rango para el barrido de frecuencias donde se realizará el análisis, el cual puede ser de tipo Discret, Interpolation o Fast.



### **3.4.5. EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN POR MEF (VALIDACIÓN Y ANÁLISIS)**

Luego de cumplir con los pasos anteriores es necesario realizar la validación del proyecto de simulación para verificar que todos los datos ingresados sean adecuados, es decir se enlistan las características de diseño y se verifica la consistencia de las propiedades, si la validación produce un resultado favorable es posible realizar el análisis el cual dependerá de la geometría, el barrido de frecuencia y principalmente de los recursos informáticos disponibles. La herramienta informática, al seleccionar la opción “Validación y análisis” valida la configuración y realiza los cálculos de todos los nodos de la malla configurada y permite realizar el análisis de la estructura. Además, el software permite asignar los recursos computacionales disponibles para la simulación, el número de núcleos y la cantidad de memoria a utilizar. Además, se puede configurar la prioridad del análisis para que este se realice a una mayor velocidad.

### **3.4.6. POSTPROCESO**

Esta última etapa debe realizarse luego de que haya terminado el análisis de la estructura en el paso anterior, consiste principalmente en el trazado de los diferentes parámetros que caracterizan la estructura en este caso la antena, en el árbol del proyecto se encuentra localizada la pestaña *Results* que permite observar parámetros como el S11, la impedancia de entrada, VSWR, entre otros. Es posible también exportar los resultados obtenidos del análisis hacia otros softwares para utilizar la información en otros procesos que requieran de la misma.

En los manuales y guías proporcionadas por Ansys HFSS es posible obtener una explicación más detallada y profunda de las diferentes opciones que posee el programa para cada una de sus etapas, algunas de las cuales no se encuentran en este instrumento ya que no son objeto de este estudio.

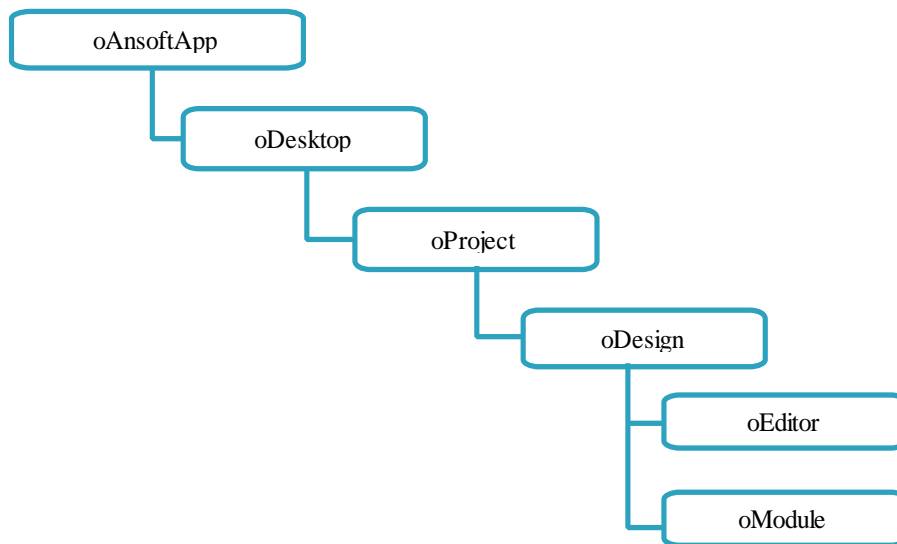
### **3.5. SCRIPTING EN ANSYS HFSS**

En la sección anterior se ha descrito el modelado de una estructura en el software a partir de la interfaz general del programa, sin embargo ANSYS Electronics Desktop puede utilizar el lenguaje de Microsoft Visual Basic Scripting Edition o denominado VBScript, para crear macros, que consisten en una secuencia de comandos que ejecutará el programa, es decir, es posible escribir una secuencia de comandos y ejecutar el script, incluso de modo automático de ejecución el cual es adecuado para tareas que se desea repetir [51]. Cualquier operación que se realice en la interfaz gráfica es posible realizarla mediante scripting, es necesario realizar todas las etapas descritas para el modelado de un dispositivo desde su origen caracterización, análisis y muestra de resultados.

Ansyes HFSS proporciona una guía del lenguaje de programación orientado a objetos, de forma que se pueden establecer las herramientas necesarias para la implementación de las simulaciones completas mediante scripts además el programa posee una herramienta de generador de código de las actividades realizadas en el software, para que después se pueda ejecutar de acuerdo con un orden. Todos los comandos y consultas se pueden realizar en la documentación de Ansys HFSS que se presenta en [51]. En donde también se puede observar que el lenguaje de programación utilizado para la generación de scripts posee una estructura característica, en la subsección siguiente se expondrán los aspectos principales de este tema.

#### **3.5.1. JERARQUÍA**

Un script para ser ejecutado en Ansys HFSS presenta distintos niveles jerárquicos que se aprecian en la Figura 3.2, cada nivel jerárquico posee diversas funciones, sin embargo, en este documento se enfatizará en las funciones utilizadas para el modelado y análisis de la antena planar. Además, en estos comandos se describen las variables utilizadas por Ansys Electronics Desktop en el Script. VBScript se basa en el lenguaje de programación de Microsoft Visual Basic.



**Figura 3.2** Jerarquía utilizada en Ansys HFSS.  
Fuente: [51]

**oAnsoftApp:** Es un objeto que indica que el VBScript debe acceder al software Ansoft Electronics Desktop.

**oDesktop:** Este objeto se utiliza para realizar operaciones a nivel de escritorio principalmente la gestión de proyectos dentro del programa.

**oProject:** Este objeto se utiliza para el manejo de un proyecto abierto en el software, se puede manipular el proyecto y los datos que incluyen variables, materiales y diseños.

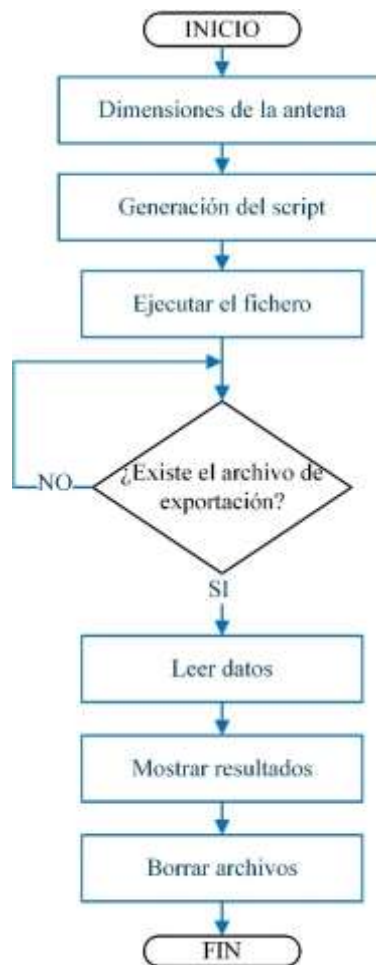
**oDesign:** Corresponde al diseño creado dentro de un proyecto, en donde también existen datos como módulos y variables que se pueden modificar.

**oEditor:** Este objeto corresponde al editor de modelado, en este caso el modelado 3D, se utiliza cuando se desea agregar o modificar el diseño de la estructura.

**oModule:** Este objeto hace referencia a un módulo dentro del diseño, los módulos se utilizan para manejar un conjunto de funcionalidades relacionadas. Los módulos corresponden a las ramas del árbol del proyecto dentro de la interfaz.

### 3.6. COMUNICACIÓN ENTRE MATLAB Y ANSYS HFSS

Para este estudio se utiliza las herramientas de manejo de texto en Matlab para la creación de los VBScripts [52], con la ventaja de que es posible utilizar los datos que maneja Matlab en los cálculos realizados para que las estructuras se adecúen a estos diseños. Con la ayuda de Matlab se crea tanto la estructura de la antena como los diferentes parámetros que son necesarios para que se pueda ejecutar la simulación en HFSS, por lo tanto, desde Matlab se creará el archivo *.vbs*, en lenguaje Visual Basic, con toda la información, el mismo que será ejecutado por ANSYS Electronics Desktop con la aplicación HFSS, a continuación, se describe el proceso mediante el cual se genera la información con los diferentes macros utilizados para la simulación de la antena en HFSS mediante Matlab. En la Figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo general de los procesos que intervienen en el intercambio de información entre los dos programas.



**Figura 3.3** Diagrama de flujo general de la comunicación MATLAB-HFSS

**Fuente:** Autora

### **3.6.1. DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA**

De forma preliminar se realiza el diseño de un parche rectangular en Matlab, presentado en el capítulo 2. Con el proceso descrito se realiza un programa en Matlab para el cálculo de las dimensiones las cuales se almacenan en variables que pueden ser utilizadas dentro de la comunicación para ser incluidas posteriormente como datos del proyecto en HFSS. A continuación, se describe el proceso de la comunicación utilizando a manera de ejemplo la antena parche rectangular diseñada en el capítulo dos.

### **3.6.2. GENERACIÓN DEL FICHERO VBSCRIPT**

En esta subsección se describen las funciones creadas en Matlab necesarias para la creación del script *.vbs*, el cual se ejecutará en Ansys Electronics Desktop, con los parámetros de diseño especificados. Además, en el Apéndice A, se presenta un flujograma completo de la comunicación con las funciones aquí descritas.

#### **3.6.2.1. Creación del Fichero**

Como primer paso MATLAB crea el archivo del fichero *.vbs*, en este fichero se almacenan las órdenes que se ejecutan en HFSS para realizar la simulación. Las funciones de MATLAB transfieren los parámetros en conjunto con los comandos que entiende HFSS, por lo que utilizan las dimensiones del diseño creado y otros parámetros como nombres o partes específicas de cada comando.

Es necesario que se obtenga la dirección en donde se encuentra el programa ya que es necesario establecer los nombres de los archivos a crear, junto con las direcciones, estos archivos son el script de Visual Basic, el proyecto en Ansys HFSS y el archivo de transferencia de los datos, todos creados en una misma dirección, con su respectiva extensión.

Se abre el fichero *.vbs* en modo “*wt*”, en modo texto para escritura, con el nombre almacenado previamente.

### 3.6.2.2. Creación del Proyecto

Para empezar el análisis en Ansys Electronics Desktop es necesario la creación de un proyecto que consiste en un archivo “.aedt” y dentro del mismo se insertará un nuevo diseño, en el que se especifica que la aplicación utilizada es HFSS. A continuación, se define la función *hfssNuevoProyecto.m* la cual imprime la cabecera del fichero, en la cual se declaran las variables y los objetos descritos en la sección 3.5 para el uso del script. Como se observa en el siguiente código, la escritura se realiza con la función *fprintf*, de Matlab la cual toma el fichero y la cadena de caracteres o *strings* que se van a escribir, \n, realiza el salto de línea, de esta forma se realizan las diferentes funciones.

**Fichero 1.** Función Nuevo Proyecto en MATLAB

```
function hfssNuevoProyecto(fid)

% Principal
fprintf(fid, 'Dim oAnsoftApp\n');
fprintf(fid, 'Dim oDesktop\n');
fprintf(fid, 'Dim oProject\n');
fprintf(fid, 'Dim oDesign\n');
fprintf(fid, 'Dim oEditor\n');
fprintf(fid, 'Dim oModule\n');
fprintf(fid, '\n');

% Creación del nuevo proyecto
fprintf(fid, 'Set oAnsoftApp =
CreateObject("Ansoft.ElectronicsDesktop")\n');
fprintf(fid, 'Set oDesktop =
oAnsoftApp.GetAppDesktop()\n');
fprintf(fid, 'oDesktop.RestoreWindow\n');
fprintf(fid, 'oDesktop.NewProject\n');

% Active project
fprintf(fid, 'Set oProject =
oDesktop.GetActiveProject\n');
```

En esta parte se debe insertar un diseño de tipo HFSS dentro del proyecto, que incluye el tipo de solución a realizar. El comando utilizado es *InsertDesign*, el cual pertenece al objeto *oProject*, utiliza el formato HFSS, el nombre del diseño y el tipo de solución, que se insertan mediante la concatenación de strings. Con cualquier editor de textos es

posible visualizar el script que se está creando, según se indica en la Figura 3.4.

```
Dim oAnsoftApp
Dim oDesktop
Dim oProject
Dim oDesign
Dim oEditor
Dim oModule

Set oAnsoftApp = CreateObject("Ansoft.ElectronicsDesktop")
Set oDesktop = oAnsoftApp.GetAppDesktop()
oDesktop.RestoreWindow
oDesktop.NewProject
Set oProject = oDesktop.GetActiveProject

oProject.InsertDesign "HFSS", "Design1", "DrivenModal", ""
Set oDesign = oProject.SetActiveDesign("Design1")
Set oEditor = oDesign.SetActiveEditor("3D Modeler")
```

**Figura 3.4** Script para Ansys Electronics Desktop  
Fuente: Autora

### 3.6.2.3. Modelado de la Estructura

Para la construcción de la antena es necesario definir varias partes que conforman la estructura, estas son: el sustrato, el plano de tierra, el parche radiador en conjunto con la línea de alimentación o feed, el puerto de alimentación y la zona de análisis, por lo que es necesario establecer funciones que definan los macros para las diferentes estructuras y las características de cada una para adecuarse al modelo establecido. Para el desarrollo del modelo geométrico como tal es necesario el uso de los comandos de la librería 3D Modeler Editor, de forma general estos comandos poseen un array de atributos que especifican al modelo, para el desarrollo de los scripts de dibujo se tiene:

*hfssCreateBox.m*: Crea el código para dar la forma del sustrato de la antena, utilizando las dimensiones y la posición principalmente.

*hfssCreateRectangle.m*: Crea las estructuras para el plano de tierra, el parche y la alimentación utilizando de la misma forma las dimensiones las cuales serán extraídas del cálculo previo de Matlab.

Para crear el parche de la forma especificada en los criterios de diseño se utilizan además las funciones siguientes, las cuales establecen comandos de edición para el script.

*hfssSubtract.m*: la cual extrae una figura de otra superior.

*hfssUnite.m*: la cual sirve para unir dos estructuras continuas, en este caso el parche radiador y la línea de alimentación de la antena.

*hfssCambiarColor.m*: Define un color para las diferentes partes.

El siguiente punto importante es la asignación de materiales o atributos que tendrán los diferentes elementos elaborados en la simulación, para esto se utilizan las siguientes funciones:

*hfssAssignMaterial.m*: Asigna el tipo de material para el sustrato, en este caso FR4.

*hfssAssignPerfectE.m*: Establece las características del conductor PEC para el plano de tierra y el parche.

Se crea además el puerto de conexión de la antena, al cual se le asignará sus características, los comandos pertenecen a la librería Boundary and Excitation Module y se definen mediante la función:

*hfssAssignLumpedPort.m*: en el cual se especifica el nombre, el tipo de puerto, la geometría y la impedancia.

Para la simulación también es necesario definir una última estructura para las características de radiación, la cual toma sus atributos mediante la función:

*hfssAssignRadiation.m*: en la cual se especifica el nombre y el tipo.

Cada una de las funciones definidas en MATLAB utiliza un comando específico que realiza el trabajo necesario en HFSS, define sus



diferentes parámetros y atributos, para que sea posible la ejecución del script.

#### **3.6.2.4. Configuración de la Solución**

Para realizar la simulación es necesario añadir una nueva configuración de solución en la cual se establece la frecuencia de operación de la antena, esta función se denomina *hfssInsertSetup.m*, dentro de la configuración de solución se debe ingresar un barrido de frecuencia, para esto se utiliza la función *hfssInsertFrequencySweep.m*, en donde se especifica la frecuencia de inicio y la frecuencia de final del barrido, además el número de puntos que se utilizarán para el análisis.

Para la visualización de resultados en HFSS, se crean reportes el más importante dentro de este contexto es el Reporte S, que proporciona los resultados del S11, pero también se crea el Reporte Z, para la impedancia real e imaginaria, se crean funciones de la misma forma para la generación automática de estas figuras.

#### **3.6.2.5. Guardar Proyecto y Simular**

El fichero debe incorporar el script para guardar el proyecto con todos los cambios realizados y con el nombre especificado en la creación de archivos para lo cual se utiliza la función *hfssSaveProject.m*. Una vez guardados los cambios se debe indicar al programa que realice el análisis de la nueva estructura, mediante la línea de comando:

oProject.SimulateAll

#### **3.6.2.6. Exportación de Datos a MATLAB**

Mediante este macro se exporta los datos de simulación a un archivo, por medio de estos comandos es posible hacer que HFSS exporte los datos de simulación a un archivo .m que podrá ser ejecutado en MATLAB para la lectura de los datos, de esta forma se obtiene una matriz de solución tanto de S11 como de la impedancia Z. El archivo .m esta previamente creado.

### 3.6.2.7. Cerrar Proyecto

Para finalizar es necesario cerrar el proyecto para lo cual se utilizan la función *hfssCloseProject.m* la cual guarda los últimos cambios realizados como precaución y cierra el proyecto realizado.

### 3.6.3. EJECUCIÓN DEL SCRIPT

Es necesario cerrar todos los archivos abiertos por MATLAB para la construcción del fichero y el análisis en HFSS, para esto se utiliza la función *fclose* de MATLAB con el parámetro “all”, para evitar cualquier error. Una vez obtenido el fichero completo *.vbs*, mediante MATLAB es posible ejecutar los VBScripts con la función *winopen*, la cual abre un archivo en Windows mediante la aplicación asociada a la extensión del archivo. Es aquí donde se realiza el análisis del proyecto como tal en HFSS, mediante el método de elementos finitos para obtener las soluciones de campo.

El grado de refinamiento establecido para la solución es el principal influyente para el tiempo de ejecución del análisis y por su parte también las características computacionales, en este caso se utiliza la computadora del Laboratorio de Telecomunicaciones, la cual posee un procesador Intel(R) Core(TM) i7-7700 CPU @3.60GHz, con una memoria RAM de 32GB.

Para determinar el momento en el que termina la resolución de la simulación y la transferencia de los datos se ha establecido un mecanismo de espera en MATLAB, como se observa en el Fichero 2., en donde primero se pregunta por la existencia del archivo de exportación *.m*, mediante el comando *exist*, el cual devuelve valores tipo numérico de acuerdo al formato del archivo, los cuales se almacenan en la variable A, los más importantes para el caso son las respuestas 0 la cual indica que el archivo no se encuentra, no existe o no fue creado y que el programa debe seguir esperando a que termine la simulación y la creación del archivo, por otra parte la respuesta ”2” indica la creación o existencia de un archivo de varios tipos en este caso verifica que sea de tipo *.m*, de esta forma se procede al siguiente paso.

## Fichero 2. Espera de datos en MATLAB

```
%% ESPERAR PARA LEER DATOS

A=exist('ExportdataSim1'); % pregunta si existe el archivo
fprintf('Esperando datos de HFSS .')

while (A==0)
    fprintf('.')
    pause(10)
    A=exist('ExportdataSim1'); % pregunta por el archivo
End

if (A==2)
    fprintf('\n Datos Obtenidos \n')
end
```

### 3.6.4. DATOS EN MATLAB

En MATLAB se ejecuta este archivo .m esperado en la sección anterior y de esta forma se extraen los datos, después de esto ya se pueden utilizar los datos para los diferentes procesos, en primera estancia se realiza una visualización y posteriormente estos datos se utilizarán en los algoritmos implementados. Los datos se reciben en una matriz como la que se indica en la Figura 3.5. Finalmente es necesario borrar tanto el fichero y la carpeta que crea el proyecto en HFSS para evitar superposiciones entre los datos.

```
% Matlab m-File exported from HFSS2017.2.0
% Note: In three-dimensional arrays, like S(i,j,k), the first index corresponds
%       So, S(N,j,k) is an S(j,k) matrix for frequency N.

f = zeros(200,1);
S = zeros(200,1,1);

f = [1000000000 1012562814.07035 1025125628.1407 1037688442.21106 105025125
S(1,(:, :)) = [-7.066940E-001 + 6.982913E-001i];
S(2,(:, :)) = [-6.946684E-001 + 7.101605E-001i];
S(3,(:, :)) = [-6.824102E-001 + 7.218449E-001i];
S(4,(:, :)) = [-6.699190E-001 + 7.333419E-001i];
S(5,(:, :)) = [-6.571942E-001 + 7.446490E-001i];
S(6,(:, :)) = [-6.442354E-001 + 7.557632E-001i];
S(7,(:, :)) = [-6.310422E-001 + 7.666815E-001i];
S(8,(:, :)) = [-6.176141E-001 + 7.774004E-001i];
S(9,(:, :)) = [-6.039507E-001 + 7.879164E-001i];
S(10,(:, :)) = [-5.900515E-001 + 7.982256E-001i];
```

Figura 3.5 Archivo de envío de datos desde HFSS a MATLAB

Fuente: Autora

### 3.7. EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS PARA EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Luego de haber creado el archivo según los apartados anteriores, para los procesos de optimización, la evaluación de los datos se realizará mediante el diagrama mostrado en la Figura 3.6, en donde el script generado contiene los valores que proporciona el optimizador para cada antena según el individuo y la iteración, a continuación, se describe el proceso utilizado para la evaluación en la optimización.



**Figura 3.6** Diagrama de flujo del proceso de evaluación mediante la comunicación  
**Fuente:** Autora

Debido a que el tiempo es un factor muy importante en el proceso de optimización, el proyecto creado mediante scripts se configura con parámetros que quedarán establecidos de tal manera que luego se puedan cambiar únicamente las variables escogidas de la estructura física de la antena, para lo cual se debe crear la estructura mediante variables del proyecto y establecer las relaciones dentro de las

estructuras, como se puede apreciar en la Figura 3.7, en donde se muestran las variables creadas para la antena patch rectangular en Ansys HFSS.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only	Hidden
\$W	38.0363	mm	38.0363mm		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
\$L	29.4778	mm	29.4778mm		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
\$Lg	80	mm	80mm		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
\$Wg	80	mm	80mm		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
\$y0	10.9363	mm	10.9363mm		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
\$w0	4.9498	mm	4.9498mm		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
\$h	1.5	mm	1.5mm		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 3.7** Variables creadas para el proyecto en HFSS

Fuente: Autora

Luego en la Figura 3.8 y en la Figura 3.9, se muestra la creación del parche radiador de la antena mediante relaciones establecidas con las variables, esto es importante precisamente en el parche debido a que es necesario que las posiciones en las que se empieza a construir cambien de acuerdo al cambio de la variable, para lo cual se crean en MATLAB, las funciones necesarias para la comunicación mediante variables, una vez creado este proyecto ya es posible reutilizarlo, creando un script que solo modifique las variables escogidas en el proceso de optimización, a continuación se describen como está compuesto el fichero del proceso de optimización en el cual se modifican las variables y se realiza la simulación de la estructura con estas nuevas características.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-\$W/2 ,-\$L/2 , \$h		-19.01815mm . ...	
Axis	Z			
XSize	\$W		38.0363mm	
YSize	\$L		29.4778mm	

**Figura 3.8** Creación del parche mediante variables.

Fuente: Autora

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateRectangle			
Coordinate Sys...	Global			
Position	$-\$w0/2, \$L/2-\$y0, \$h$		-2.4749mm , 3....	
Axis	Z			
XSize	$\$w0$		4.9498mm	
YSize	$\$y0+(\$Lg/2-\$L/2)$		36.1974mm	

**Figura 3.9** Creación del feed mediante variables.  
Fuente: Autora

### 3.7.1. FICHERO VBSCRIPT

Del proyecto generado previamente se procede a modificar las variables seleccionadas para la optimización de parámetros, las cuales tomarán los valores que el usuario decida de acuerdo con el proceso de optimización. En primera instancia en el proceso de optimización va a existir un proceso denominado: Inicialización de Archivos de HFSS, en donde se establecen los nombres de los archivos creados, en este caso el nombre del fichero *.vbs*, el nombre del proyecto *.aedt*, el nombre del diseño y de los archivos para exportar los datos, además se añaden los scripts de las funciones creadas, direccionándolos en MATLAB. Luego, el proceso de evaluación para las estructuras creadas en la optimización empieza abriendo el fichero de la misma forma que en la sección 3.6.2, luego se extraen los valores de las variables a modificar.

Mediante scripts también se abre el proyecto creando las jerarquías necesarias y se hace un llamado a la función *hfssCambiarVariable.m* para realizar el cambio de los datos, esta función recibe como datos el nombre de las variables en formato string, la variables que almacenan los valores en MATLAB y las unidades, se realiza un llamado de este tipo por cada parámetro a optimizar, una vez realizado esto se guardan los cambios y se procede a realizar la simulación de la estructura, cuando termina la simulación se exportan los datos, se cierra el proyecto de HFSS y se cierran todos los archivos abiertos por MATLAB.

### 3.7.2. EJECUCIÓN

De la misma forma descrita en la comunicación se ejecuta el fichero y en MATLAB, se ejecuta el mecanismo de espera descrito anteriormente, cuando el programa logra salir de este bucle significa que ya existen los archivos con los datos extraídos de la simulación.

### 3.7.3. DATOS

Se ejecutan los scripts de donde se obtienen las matrices de datos, se leen los datos extraídos y se realiza el proceso para graficarlos, extrayendo la frecuencia y para el parámetro S11 se realiza la conversión a dBs, de la misma forma para los datos de impedancia de la antena, luego, en una variable denominada “matriz” se guardan las columnas de la frecuencia, S11 en dB y la impedancia real e imaginaria.

Es necesario obtener los valores de frecuencia, S11 e impedancia de la estructura analizada en el proceso de optimización, estos valores se extraen mediante una función denominada *escogerdatos.m* la cual recibe la matriz formada anteriormente con todos los datos del barrido y la frecuencia de operación a la cual se está trabajando. En esencia la función trabaja principalmente con el S11, escogiendo los mínimos locales de este dato, para encontrar su frecuencia e impedancia, en las otras columnas de la matriz. Los mínimos escogidos deben ser menores a -10 dB en primera estancia. Luego es necesario conocer en cuanto se aproximan a la frecuencia de operación determinando el error en frecuencia, inmediatamente se ordenan los mínimos encontrados en función de este error, de menor a mayor y se escogen los primeros para devolverlos al programa principal para su tratamiento en la optimización, el cual se describirá posteriormente. La función también incluye condiciones para cuando no existen mínimos y para cuando estos no cumplen con la condición de S11, ya que estas situaciones proporcionan errores deteniendo el proceso automático de optimización.

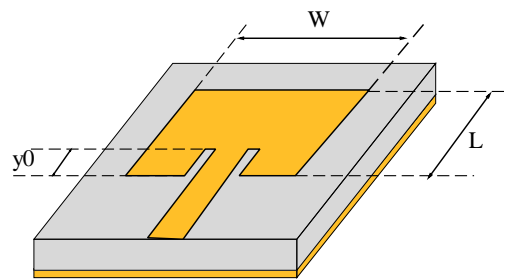
Finalmente, y de acuerdo con los pasos establecidos en la comunicación es necesario borrar los archivos creados para que no se superpongan, sin embargo, antes de borrar es necesario preguntar por el status de los archivos, de esta manera se evitará entrar en un error que detenga el proceso, se realiza mediante un bucle que verifica si es posible acceder a los archivos.

### 3.8. PROCEDIMIENTOS GENERALES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS

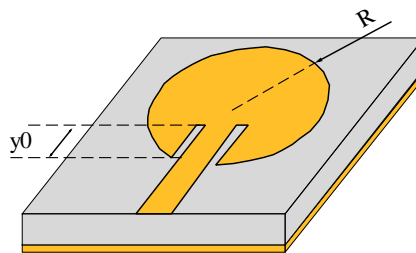
Luego de desarrollar la metodología anterior, es posible plantear el escenario para la optimización, en la que el objetivo es obtener los valores deseados de los parámetros establecidos mediante los algoritmos metaheurísticos de inteligencia de enjambre descritos en el capítulo uno. El optimizador dirige las simulaciones indicando los valores que adquieren los parámetros en cada iteración del algoritmo, en primera estancia se establecen las dimensiones que serán modificadas en el proceso de optimización de la antena y el espacio de búsqueda en el que se localizará la solución óptima.

Antes de empezar el proceso de optimización cabe destacar que no existe un algoritmo ideal según el tipo de actividad y más aún en aplicaciones de telecomunicaciones y electromagnetismo, ya que existen muchas variables y parámetros de interés, sin embargo, se ha decidido realizar el estudio de algunos algoritmos realizando su implementación en MATLAB por la gran capacidad de tratamiento de datos e incorporando el método de simulación mediante Ansys HFSS.

#### 3.8.1. VARIABLES ESTABLECIDAS DE LAS ESTRUCTURAS PARA LA OPTIMIZACIÓN



a) Variables para patch rectangular



b) Variables para patch circular

**Figura 3.10** Variables para la optimización  
Fuente: Autora



En este proyecto se realiza la optimización de las antenas planares de forma rectangular y circular de acuerdo a los criterios de diseño establecidos en el Capítulo 2. En la Figura 3.10 se muestran las variables a optimizar a) para patch rectangular y b) para la patch circular.

Además, se muestran las variables del proyecto, con los datos establecidos, es decir valores que no van a cambiar en las estructuras y los nombres de las variables que cambiarán, en la Tabla 3.1 para la antena planar rectangular y en la Tabla 3.2 para la antena planar circular.

**Tabla 3.1 Variables de la antena planar rectangular.**

<b>Variable</b>	<b>Sim.</b>	<b>Valor</b>
Ancho del patch	W	Optimizar
Largo del patch	L	Optimizar
Distancia de inserción	y0	Optimizar
Ancho del feed	w0	4.5 mm
Altura del sustrato	h	1.5 mm
Gap	G	1 mm
Largo del plano de tierra	Lg	80 mm
Ancho del plano de tierra	Wg	80 mm

**Tabla 3.2 Variables de la antena planar circular.**

<b>Variable</b>	<b>Sim.</b>	<b>Valor</b>
Radio del patch	R	Optimizar
Distancia de inserción	y0	Optimizar
Ancho del feed	w0	4.5 mm
Altura del sustrato	h	1.5 mm
Gap	G	1 mm
Largo del plano de tierra	Lg	80 mm
Ancho del plano de tierra	Wg	80 mm

### **3.8.2. FUNCIÓN OBJETIVO**

La función objetivo es la relación que de alguna manera califica a los individuos que se obtienen en el algoritmo de optimización, en este caso es una función de minimización compuesta de tres factores que son, la frecuencia, S11 y la impedancia de entrada de la antena. El valor de S11 deseado para el proceso de optimización se fija en -25dB y para la impedancia es de 50 ohmios, mientras que

para la frecuencia se realizan pruebas para diferentes valores. Es necesario obtener los datos en los cuales se encuentra adaptada la estructura analizada, es decir su frecuencia de operación, S11 e impedancia, lo cual se realiza con las funciones establecidas en la subsección 3.7.3 y así obtener la distancia entre estos datos y los deseados, la expresión que representa la función objetivo o función de fitness se encuentra dada en la ecuación ( 65).

$$F = \frac{|f_d - f_o|}{1 \times 10^9} * 100 + \frac{|sf| + sf}{2} + |Z_{ed} - Z_{eo}| \quad (65)$$

En donde:

$$sf = S11o - S11d \quad (66)$$

Esta relación se compone de el error porcentual obtenido para la frecuencia de operación de la antena, el segundo término representa el error relativo para el S11 deseado y el tercero es el valor absoluto de la diferencia entre la impedancia obtenida y la impedancia deseada de la antena, determinada debido a la forma en la que se transfieren los datos desde el simulador. Esta función de costo se utiliza para los tres procesos de optimización implementados en este trabajo, tanto para la antena patch rectangular como para la antena patch de forma circular.

### 3.8.3. REFRESCAR PROGRAMA

Debido al tipo de licencia que posee el programa Ansys HFSS, luego de un determinado número de simulaciones y análisis de las estructuras, conlleva a congelarse el programa, deteniendo el proceso automático e invalidando el mismo, motivo por el cual se ha hecho necesario la implementación de un mecanismo que reinicie la ejecución de Ansys HFSS, a cada cierta cantidad de simulaciones, en este caso se reinicia cada tres iteraciones, cada iteración corresponde a 10 individuos lo que implica 30 simulaciones. MATLAB, mediante el comando *system* el cual usa comandos de consola, cierra el programa y espera 30 segundos para reiniciarlo y continuar con las simulaciones.

### 3.9. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PSO

En esta sección se presenta el proceso mediante el cual se ha implementado el algoritmo Particle Swarm Optimization para el diseño de una antena planar, integrando de esta forma los procedimientos anteriormente descritos. El proceso de optimización mediante PSO se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 3.11.

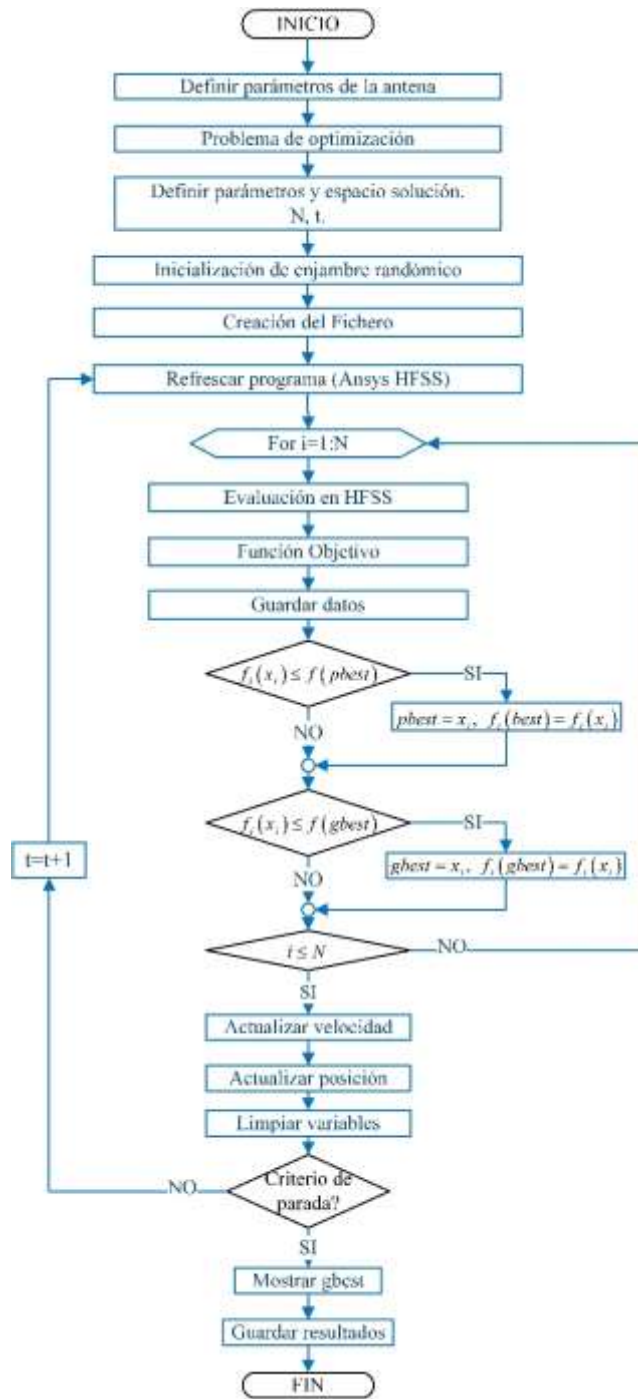


Figura 3.11 Diagrama de flujo del proceso de optimización mediante PSO

Fuente: Autora

### 3.9.1. PARÁMETROS DE LA ANTENA

De acuerdo con el diagrama de flujo y al problema de optimización que se está llevando a cabo que en este caso es el diseño de una estructura, es necesario especificar las características, como parámetro de la antena se establece la frecuencia de operación a la que va a trabajar ya que los demás parámetros se establecieron en los apartados anteriores. Esta frecuencia de operación se establece en primera estancia para 2.4GHz y después se realizarán pruebas para diferentes frecuencias.

### 3.9.2. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El problema de optimización define los resultados o los objetivos a los cuales se pretende llegar con la optimización de la estructura, dicho de otra manera, es aquí donde se establecen los valores deseados, es decir se ingresa como dato específico al programa el valor de frecuencia de resonancia deseada, el valor de S11 y de impedancia deseados, además, en esta sección del programa se inicializan las matrices que guardaran los valores escogidos del proceso de evaluación.

El problema de optimización también está determinado por el conjunto de valores que comprenden el espacio de búsqueda o espacio solución que tendrá el problema, para obtener la mejor configuración de antena con las dimensiones geométricas óptimas se considera un amplio rango alrededor de cada valor central, las áreas de búsqueda para las variables consideradas en la optimización se presentan a continuación en la Tabla 3.3 para la antena patch rectangular y en la Tabla 3.4 para la antena patch circular. Donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda en el espacio libre.

**Tabla 3.3 Espacio de búsqueda para las variables de optimización (Antena Rectangular)**

<b>Variable</b>	<b>Sim.</b>	<b>Espacio de Búsqueda</b>
Ancho del patch	W	$0.16\lambda_0 < W < 0.4\lambda_0$
Largo del patch	L	$0.16\lambda_0 < L < 0.32\lambda_0$
Distancia de inserción	y0	$0.04\lambda_0 < y0 < 0.096\lambda_0$

**Tabla 3.4 Espacio de búsqueda para las variables de optimización (Antena Circular)**

<b>Variable</b>	<b>Sim.</b>	<b>Espacio de Búsqueda</b>
Radio del patch	R	$0.08\lambda_0 < R < 0.2\lambda_0$
Distancia de inserción	y0	$0.064\lambda_0 < y0 < 0.14\lambda_0$

Para el algoritmo PSO también es necesario determinar límites para la velocidad con la que se moverá la partícula, los cuales se han fijado en el 20% del rango dinámico de las variables, como se indica en la Tabla 3.5 y en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.5 Límites de velocidad (Antena Rectangular)**

<b>Variable</b>	<b>Vmax</b>	<b>Vmin</b>
W	$0.2 * (Wmax - Wmin)$	$-VWmax$
L	$0.2 * (Lmax - Lmin)$	$-VLmax$
y0	$0.2 * (y0max - y0min)$	$-Vy0max$

**Tabla 3.6 Límites de velocidad (Antena Circular)**

<b>Variable</b>	<b>Vmax</b>	<b>Vmin</b>
R	$0.2 * (Rmax - Rmin)$	$-VRmax$
y0	$0.2 * (y0max - y0min)$	$-Vy0max$

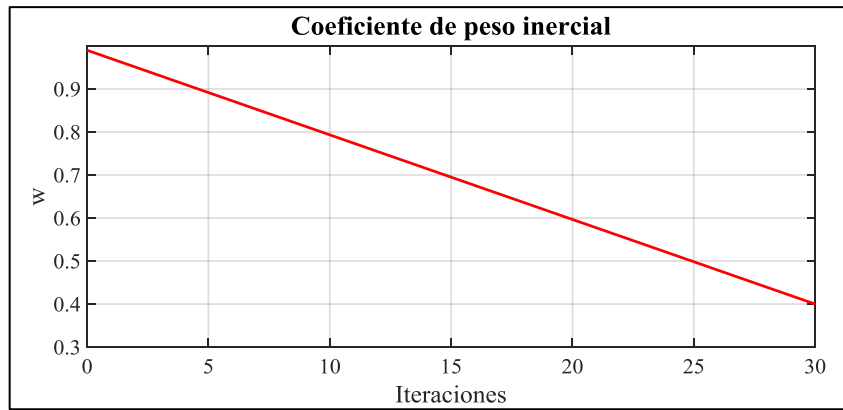
### 3.9.3. PARÁMETROS DEL ALGORITMO

Los valores de los parámetros considerados para el algoritmo PSO fueron:

**Tabla 3.7 Parámetros de PSO para la optimización.**

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Npar	Número de partículas	10
NIter	Máximo número de iteraciones	30
w	Coefficiente de peso inercial	0.99-0.4
c1	Factor cognitivo	1.2
c2	Factor social	1.2

El coeficiente de peso inercial varía de forma lineal de acuerdo a la Figura 3.12, en donde se presenta el comportamiento de la variable con respecto al número de iteraciones.



**Figura 3.12** Variación del peso inercial.  
Fuente: Autora

### 3.9.4. INICIALIZACIÓN

El proceso de inicialización en el algoritmo PSO implementado incluye primeramente la inicialización de los archivos necesarios para la comunicación, explicados anteriormente, luego de esto se procede a la inicialización del enjambre randómico. Para la solución del problema los algoritmos parten de un conjunto inicial de individuos que en este caso se denominan “enjambre randómico”.

Para el algoritmo de optimización el primer paso como tal es la inicialización, en donde se determina un conjunto de individuos generado de manera aleatoria, en PSO se conocen como partículas y cada partícula representa una posible solución al problema de estudio, además la implementación se ha diseñado de tal forma que cada parámetro puede tener una resolución propia, para lo cual se ha establecido un rango de valores en el que cada variable tiene su espacio solución. En este caso se realiza la generación de soluciones de forma randómica para cada una de las variables y para el número de partículas establecido. Además, cada vector generado de cada variable se almacena dentro de una matriz general denominada *Posición*, ya que las variables representan las dimensiones de la posición de la partícula en PSO. También se inicializa la velocidad asimismo dentro de una matriz.

### 3.9.5. EVALUACIÓN

El proceso de evaluación de cada una de las partículas, se lo realiza mediante el sistema de comunicación entre MATLAB y Ansys HFSS, proceso que se ha descrito en secciones anteriores, sin embargo, en el programa se extraen los datos de

la posición de los individuos para insertarlos en las variables que llevan los datos hacia HFSS. Luego, los datos que provienen del proceso de evaluación son tres valores que corresponden a la frecuencia de operación, el S11 y la impedancia de la estructura analizada, estos valores se utilizan para introducirlos en la función de costo especificada y obtener finalmente lo que se conoce como Valor de Fitness, de cada partícula del enjambre en la iteración.

### 3.9.6. COMPARACIÓN Y ACTUALIZACIÓN

Una vez obtenido el valor de fitness de cada individuo, se compara primero con el mejor valor personal es decir del mismo individuo que en principio se establece como un valor muy alto, por lo cual para la primera iteración el mejor valor de fitness personal denominado *valorpbest*, será el mismo valor de fitness de la estructura, la mejor posición personal de las partículas en la primera iteración será igual al mismo obtenido en la inicialización. Luego estos valores irán cambiando o no según el proceso de optimización.

Para el mejor valor global de todo el enjambre denominado *valorgbest*, en la primera iteración se escoge el menor de todos los valores de costo de las partículas y de igual forma la mejor posición global denominada *gbest* es la posición de la partícula con el menor costo encontrado. Para las demás iteraciones se compara el valor de fitness obtenido en la evaluación de las partículas, con el anterior mejor valor global.

El proceso de actualización de las partículas, es decir su movimiento por el espacio de búsqueda para encontrar mejores soluciones, se lo realiza de la siguiente manera, es necesario primero actualizar el valor de velocidad correspondiente a cada una de las variables lo cual se efectúa con la ecuación ( 28), luego de obtener los nuevos valores de velocidad se realiza un proceso en el que se ajustan los valores dentro de los límites establecidos. Para la posición se utiliza la ecuación ( 29), obteniendo de esta forma las nuevas posiciones de las partículas, que precisamente serán los nuevos valores que se transferirán al simulador, también es necesario realizar el ajuste de límites para evitar cualquier error. Finalmente, un proceso importante es limpiar las variables de transferencia de los datos para evitar errores por la superposición

### 3.9.7. DATOS DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

En todo el proceso de optimización el programa irá archivando y mostrando datos que permiten verificar el funcionamiento del programa, empezando por guardar en un archivo *.txt*, lo que se registre en el Command Window de MATLAB, luego se toma el tiempo real en el que inicia la ejecución del sistema, para saber el tiempo de ejecución de todo el proceso de optimización.

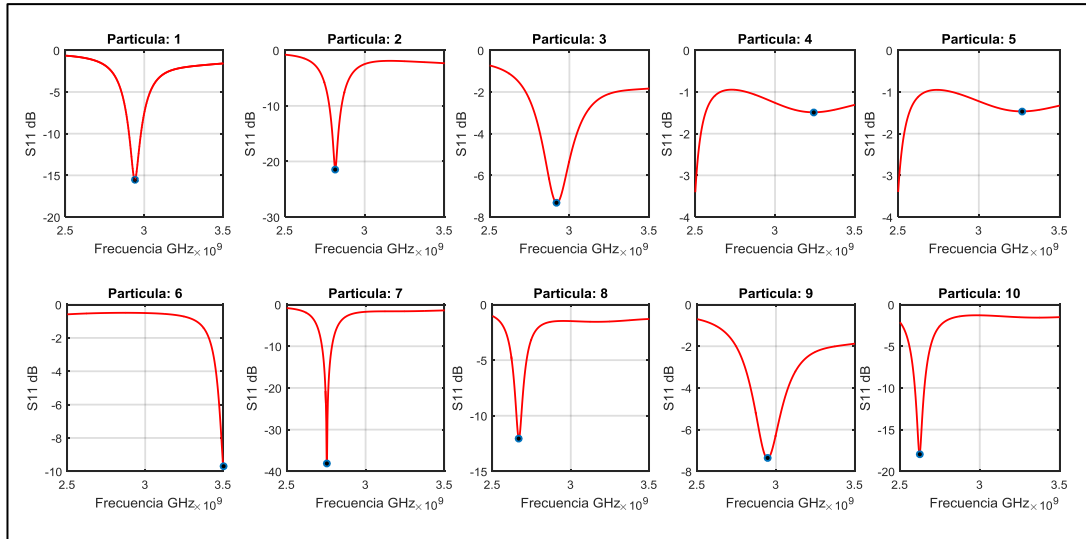
Antes de empezar la evaluación de las estructuras, se muestran los datos de evaluación de la iteración correspondiente a la posición (L, W, y0) y la velocidad de la partícula al principio del proceso para cada variable, como se presenta en la Figura 3.13.

```
EMPEZANDO ITERACION: 1
agentes =
    24.1548    26.0249    8.2965         0         0         0
    24.6098    36.8862    6.3634         0         0         0
    24.5184    23.4142    6.5937         0         0         0
    28.7140    26.2220   11.4637         0         0         0
    28.6041    23.6963   11.3342         0         0         0
    39.5950    28.7774    5.7778         0         0         0
    25.1613    28.1744    9.1643         0         0         0
    25.2442    32.0569    9.9785         0         0         0
    24.4349    22.3484    7.0767         0         0         0
    26.3756    28.4833    8.5550         0         0         0
```

**Figura 3.13** Datos de evaluación de la primera iteración para PSO.  
**Fuente:** Autora

El proceso de evaluación mediante la comunicación en la optimización también incluye la presentación de los datos de cada individuo de una iteración, cuando MATLAB ejecuta el archivo de los datos que vienen desde HFSS, se obtienen los barridos de frecuencia de las estructuras estudiadas, por lo que, para verificación en el sistema, se presentan en una gráfica de cada iteración, el comportamiento que tiene cada individuo de la población, en la Figura 3.14 se observa la gráfica que presenta el optimizador PSO, para la primera iteración de los individuos presentados. Para un proceso de optimización de una frecuencia de 3GHz. Se muestran las 10 partículas iniciales, de esta forma se mostrará en todas las iteraciones verificando como se mueven las partículas hacia el mínimo global.





**Figura 3.14** *S11* de las 10 partículas para la primera iteración a 3GHz.  
Fuente: Autora

Después del proceso de evaluación también es necesario ver la información de iteración en la cual se encuentra el *bestlocal*, de cada partícula, el *bestglobal*, de la iteración, así mismo como los datos de posición (3 primeras columnas), costo (columna 4), *pbest* (columnas 5, 6 y 7), *valorpbest* (columna 8), de la iteración, los mismo que se presentan como en la Figura 3.15. En donde el mejor valor de costo es de 22.5396, el cual pertenece al segundo individuo de la población, este proceso se repite durante todas las iteraciones hasta obtener un valor de costo mínimo. En el siguiente capítulo se mostrarán los resultados obtenidos del proceso de optimización.

```

Resultados Iteration 1: Valorgbest = 22.5396

fagentes =

    24.1548    26.0249     8.2965    25.5329    24.1548    26.0249     8.2965    25.5329
    24.6098    36.8862     6.3634    22.5396    24.6098    36.8862     6.3634    22.5396
    24.5184    23.4142     6.5937    37.7561    24.5184    23.4142     6.5937    37.7561
    28.7140    26.2220    11.4637    59.8147    28.7140    26.2220    11.4637    59.8147
    28.6041    23.6963    11.3342    67.8573    28.6041    23.6963    11.3342    67.8573
    39.5950    28.7774     5.7778    78.6256    39.5950    28.7774     5.7778    78.6256
    25.1613    28.1744     9.1643    25.9025    25.1613    28.1744     9.1643    25.9025
    25.2442    32.0569     9.9785    51.6702    25.2442    32.0569     9.9785    51.6702
    24.4349    22.3484     7.0767    39.5819    24.4349    22.3484     7.0767    39.5819
    26.3756    28.4833     8.5550    50.8387    26.3756    28.4833     8.5550    50.8387

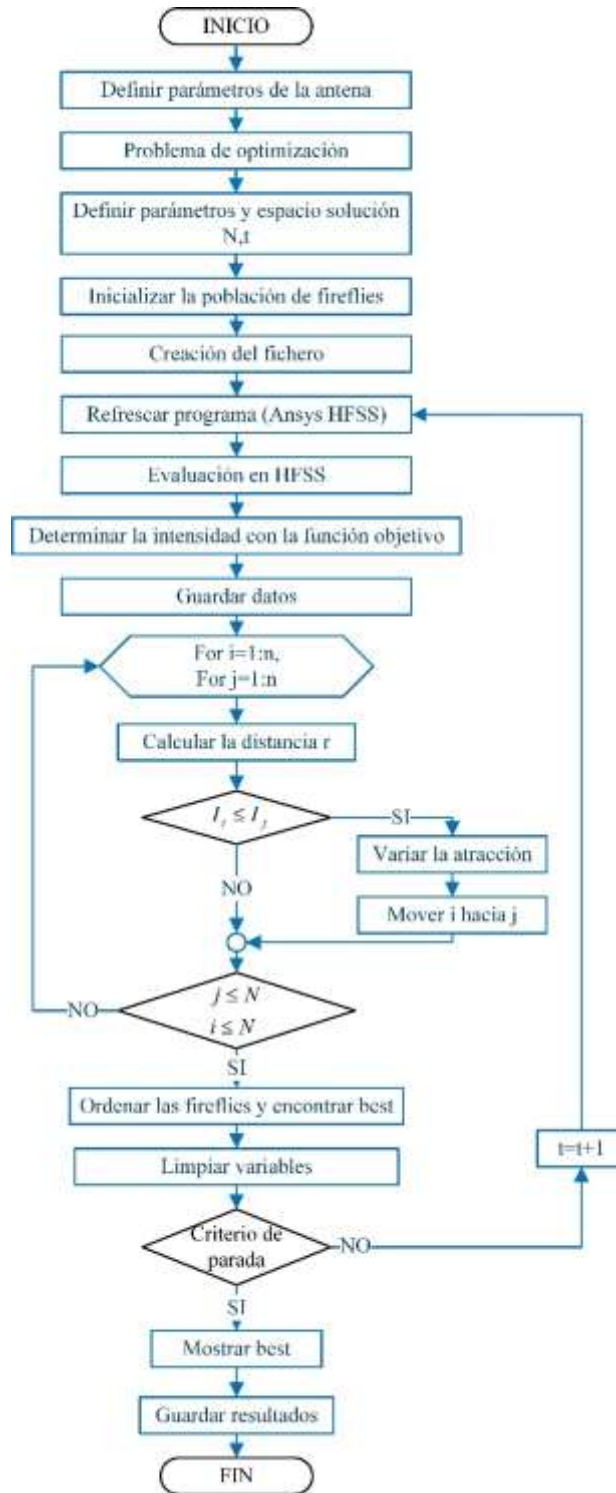
best =

    24.6098    36.8862     6.3634    22.5396
  
```

**Figura 3.15** Resultados del proceso de evaluación para la iteración 1.  
Fuente: Autora

### 3.10. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO FA

En esta sección se presenta el proceso de optimización mediante el algoritmo Firefly, el cual se encuentra resumido en el diagrama de flujo de la Figura 3.16.



**Figura 3.16** Diagrama de flujo del proceso de optimización mediante FA.  
**Fuente:** Autora

### 3.10.1. PARÁMETROS DE LA ANTENA

Al igual que el algoritmo anterior como primer punto en el diagrama de flujo se encuentra definir la característica principal como es la frecuencia de operación de la antena, se realiza de la misma forma para rectangular como para circular, se establece de igual manera al principio para 2.4GHz y también se realizan pruebas a diferentes frecuencias posteriormente.

### 3.10.2. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El problema de optimización también queda determinado con los valores deseados de frecuencia de operación obtenida del punto anterior, S11, e impedancia. El algoritmo Firefly se ha escogido debido a su capacidad de optimización en problemas multimodales, en este estudio se presenta esta capacidad de comportamiento en el espacio de búsqueda de la Tabla 3.3 para la antena rectangular y de la Tabla 3.4 para la antena circular. Se determina dentro del problema de optimización en Firefly Algorithm el factor de escala que permite tener su propia resolución a cada una de las variables, este factor es el rango de cada variable.

### 3.10.3. PARÁMETROS DEL ALGORITMO

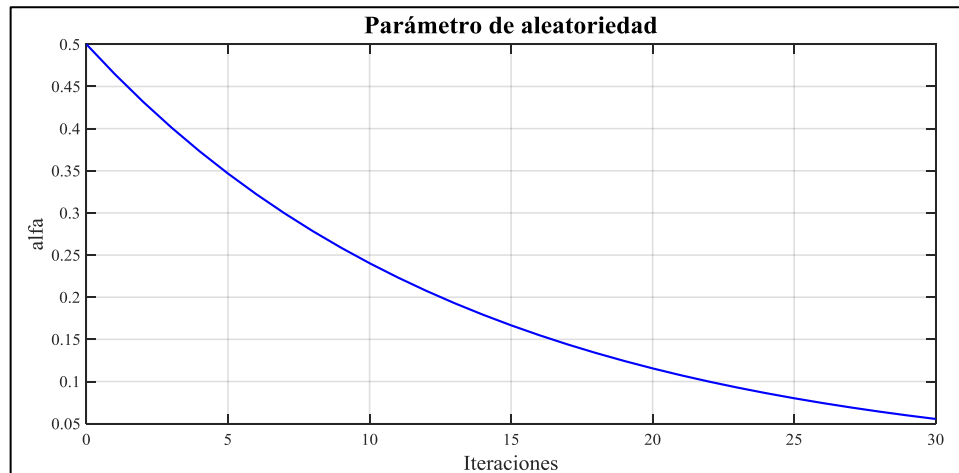
Para el algoritmo Firefly se han considerado los siguientes parámetros, especificados en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Parámetros de FA para la optimización.

Parámetro	Descripción	Valor
n	Tamaño de población de luciérnagas	10
ngen	Número de generaciones	30
$\alpha$	Coefficiente de aleatoriedad	0.5
$\beta_0$	Atracción inicial	1
$\beta_{min}$	Mínimo valor de atracción	0.25
$\gamma$	Coefficiente de absorción	1

En el algoritmo Firefly, mejora a la convergencia del algoritmo, se varía el parámetro de aleatoriedad  $\alpha$ , para que disminuya gradualmente a medida que se aproxima a los valores óptimos, es decir es el coeficiente de aleatoriedad el que varía en consideración al número de iteraciones, el comportamiento de este coeficiente

disminuye de acuerdo a la función que se presenta en la Figura 3.17., para esta implementación.



**Figura 3.17** Comportamiento de alfa con respecto a las iteraciones.  
**Fuente:** Autora

#### 3.10.4. INICIALIZACIÓN

El proceso de inicialización comprende la creación de la población de luciérnagas con valores aleatorios como posibles soluciones al problema de optimización, cada una de las variables del problema de optimización corresponden a una dimensión que caracteriza al individuo, es decir una matriz denominada Firefly contiene la cantidad de individuos establecida y por cada uno de ellos las variables elegidas para el proceso que caracterizarán a cada individuo, o que determinan la localización de una luciérnaga. Además, se asigna un valor muy alto inicial para la luz que determinará la atracción entre los individuos.

Para el algoritmo Firefly en el proceso de inicialización incluye añadir los archivos necesarios para la comunicación entre MATLAB y Ansys HFSS, además agregar la dirección de las funciones creadas en MATLAB.

#### 3.10.5. EVALUACIÓN

El proceso de evaluación en el algoritmo comprende la transferencia de los valores de las variables de cada individuo que proporciona el algoritmo hacia las funciones que llevan los datos a HFSS y realizan la simulación de cada estructura, como se utiliza la misma función de costo de la ecuación ( 65), los datos obtenidos

son de la frecuencia de resonancia, el S11 y la impedancia de la antena, para obtener el costo o calificación de cada individuo, pero en este algoritmo el costo representa la intensidad de la luz que emite cada luciérnaga. Luego de obtener la intensidad de la luz, se ordenan los individuos y se escoge el mejor entre todos.

### **3.10.6. MOVIMIENTO DE LAS LUCIÉRNAGAS**

Primero es necesario determinar la distancia existente entre dos luciérnagas para lo cual se utiliza la distancia Euclidiana expresada en la ecuación ( 34). Posterior a esto según el flujograma de la Figura 3.16, se comparan las intensidades obtenidas del proceso de evaluación, y el movimiento de una luciérnaga  $i$  hacia una luciérnaga  $j$ , se realiza mediante la ecuación ( 35), la cual se compone de la localización actual de la luciérnaga, la siguiente parte es la atracción entre ambas luciérnagas, la cual a medida que se acerca hacia los valores óptimos disminuye y finalmente el componente de aleatoriedad especificado en función de las iteraciones en donde se introduce también el factor de escala propio de cada variable y un vector randómico obtenido de una distribución gaussiana. Mediante los procesos mencionados se obtienen las nuevas localizaciones de las luciérnagas que serán evaluadas en la siguiente iteración, a estas nuevas ubicaciones se debe aplicar la verificación de límites.

### **3.10.7. DATOS DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN**

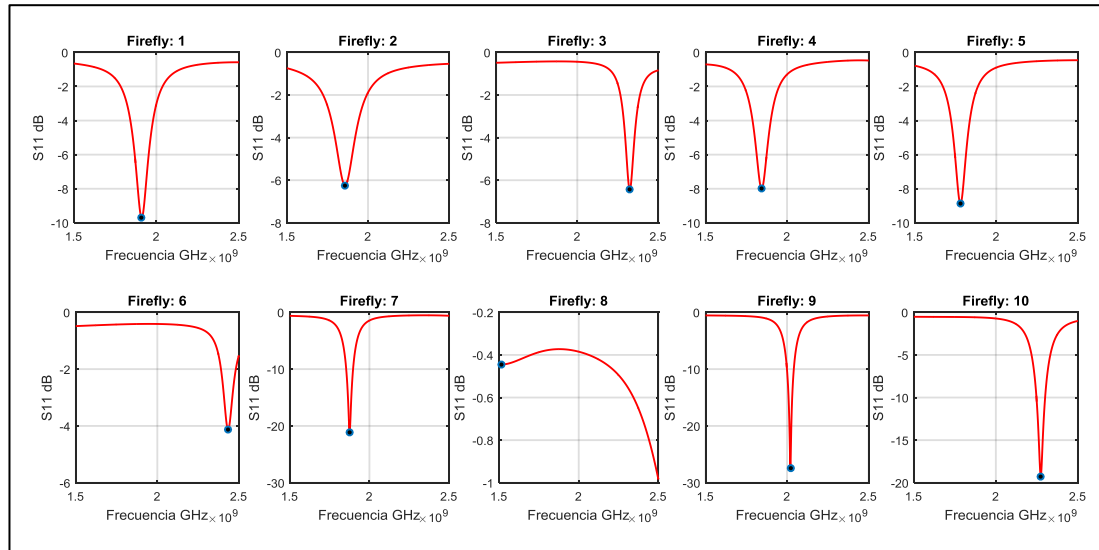
Al igual que el algoritmo anterior, en este también se guardan y se presentan los datos que se obtienen en el proceso de optimización con el objetivo de que el usuario pueda conocer el estado del proceso, es importante también conocer el tiempo de ejecución del sistema. Se muestran al principio de cada iteración los agentes que serán evaluados, como se indica en la Figura 3.18, en donde se muestran los individuos que serán evaluados en la primera iteración para el proceso de optimización de una antena planar rectangular para una frecuencia de 2.1GHz, estos individuos se obtienen de forma aleatoria, las columnas indican el largo  $L$ , el ancho  $W$  y la distancia de inserción  $y_0$ , en ese orden.

Fireflys =		
37.2209	47.6448	6.7619
38.7006	40.8090	6.5852
29.1775	38.6720	11.7450
39.4733	28.9403	11.8236
39.3575	37.1344	10.8017
27.1283	35.5440	11.4944
36.8831	48.9873	9.9344
25.5357	46.2282	11.6040
35.1810	43.9435	10.4588
30.8834	41.3869	7.0271

EMPEZANDO ITERACION: 1

**Figura 3.18** Individuos de la primera iteración para la optimización mediante FA.  
Fuente: Autora

El proceso de evaluación también muestra la gráfica de S11 que corresponde a cada individuo de la población de luciérnagas, por cada iteración realizada como se muestra en la Figura 3.19. Cada individuo se denomina Firefly y el número que representa dentro de la población.



**Figura 3.19** S11 de las 10 fireflies de la primera iteración para 2.1GHz.  
Fuente: Autora

Luego del proceso de evaluación es posible observar los resultados obtenidos de la iteración, los agentes empleados con su respectiva intensidad de luz, la mejor solución obtenida con el mejor costo del proceso, como se indica en la Figura 3.20.

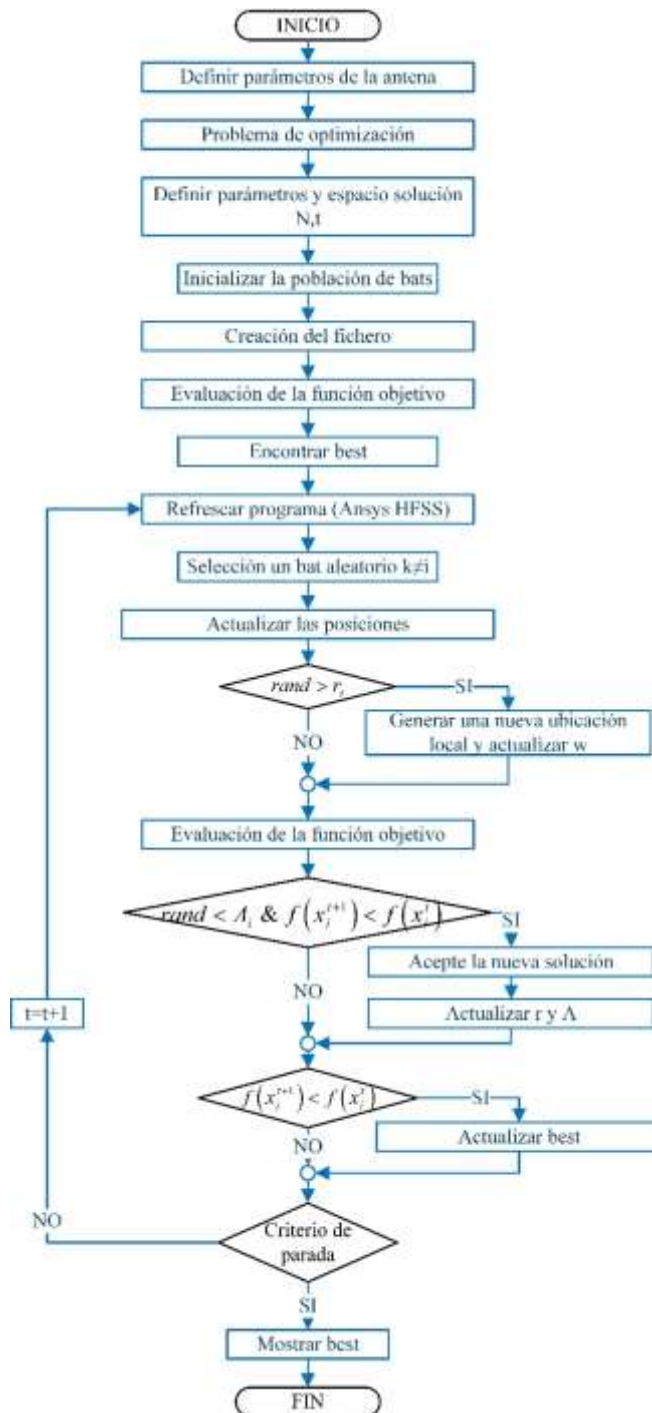
En donde se puede observar que los individuos se encuentran ordenados de menor a mayor según la intensidad, el mejor tiene un valor de 10.5836 para la primera iteración.

agentes =			
35.1810	43.9435	10.4588	10.5836
36.8831	48.9873	9.9344	30.9653
30.8834	41.3869	7.0271	35.3021
37.2209	47.6448	6.7619	38.5649
39.4733	28.9403	11.8236	43.1571
39.3575	37.1344	10.8017	53.3905
38.7006	40.8090	6.5852	65.2426
29.1775	38.6720	11.7450	72.0149
27.1283	35.5440	11.4944	89.5957
25.5357	46.2282	11.6040	131.2114
Resultados Iteration 1: BestCost = 10.5836			
Best =			
35.1810	43.9435	10.4588	10.5836

**Figura 3.20** Resultados del proceso para la primera iteración  
**Fuente:** Autora

### 3.11. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DBA

En esta sección se describe el proceso de optimización mediante el algoritmo Directional Bat Algorithm, el diagrama de flujo que resumen el proceso de optimización se muestra en la Figura 3.21.



**Figura 3.21** Diagrama de flujo del proceso de optimización mediante dBA.  
Fuente: Autora



### 3.11.1. PARÁMETROS DE LA ANTENA

En esta sección se introduce la frecuencia de resonancia a la que trabajará la antena, ya que el diseño para este algoritmo también depende de los mismos factores mencionados, se realiza de la misma forma para rectangular como para circular, en principio a 2.4GHz y posteriormente se realizan pruebas para más frecuencias.

### 3.11.2. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El problema de optimización se determina por los valores deseados a los que se quiere llegar con el proceso de optimización, los cuales en nuestro caso se han establecido en la frecuencia de operación determinada en la sección anterior, el S11 y la impedancia, el algoritmo Bat tiene grandes capacidades o mejoras en la parte de la exploración y explotación en el proceso, motivo por el cual se ha realizado su implementación, teniendo como espacio de búsqueda la Tabla 3.3 para la antena rectangular y de la Tabla 3.4 para la antena circular. Para Directional Bat Algorithm también se especifica el factor de escala  $w_i$ , parámetro que regula la escala de búsqueda mientras avanza el proceso iterativo, para esta implementación comienza con un valor de alrededor de un octavo de la escala típica del espacio de búsqueda y luego decrece hasta el 1%.

### 3.11.3. PARÁMETROS DEL ALGORITMO

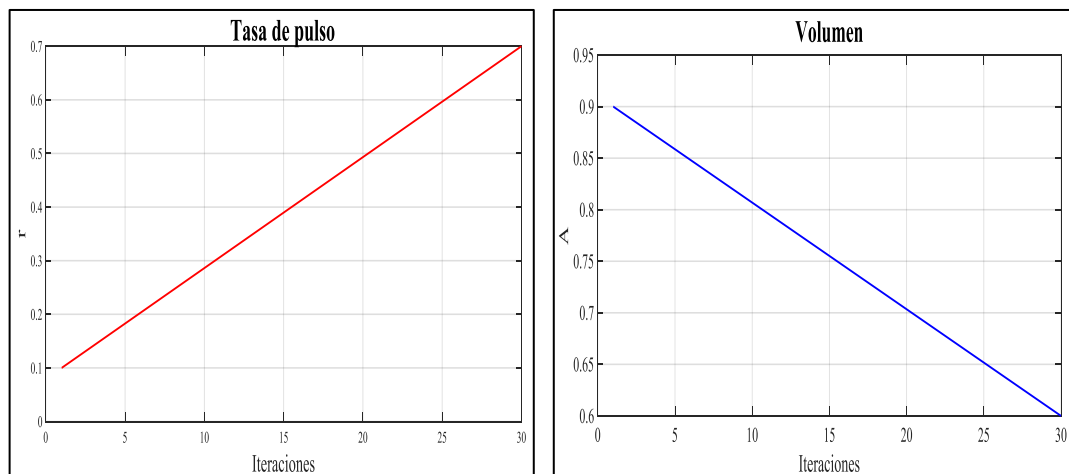
Para el algoritmo dBA se han considerado los siguientes parámetros indicados en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Parámetros de dBA para la optimización.

Parámetro	Descripción	Valor
n	Tamaño de población de murciélagos	10
ngen	Número de generaciones	30
$Q_{min}$	Frecuencia mínima	-2
$Q_{max}$	Frecuencia máxima	2
$r_0$	Tasa de pulso mínima	0.1
$r_{inf}$	Tasa de pulso máxima	0.7
$A_0$	Volumen máximo	0.9
$A_{inf}$	Volumen máximo	0.6

Debido al restringido número de generaciones y de tamaño de la población, las mejoras que propone el algoritmo direccional al algoritmo original son muy importantes, en este apartado se muestra el comportamiento de la tasa de emisión de pulso  $r$  y del volumen  $A$  con respecto a las iteraciones, estas se actualizan cuando el murciélago se acerca a la presa, el volumen disminuye mientras que la tasa de emisión de pulsos incrementa.

En dBA a diferencia del algoritmo Bat original se utiliza un crecimiento y un decrecimiento monótono como se observan en la Figura 3.22, para la tasa de pulso y el volumen respectivamente, esto debido a que en las ecuaciones originales los valores convergen muy rápidamente reduciendo la posibilidad de cambio entre búsqueda local y búsqueda global.



**Figura 3.22** Comportamiento de la tasa de pulso y del volumen con respecto a las iteraciones.  
**Fuente:** Autora.

Es necesario que al principio se establezca un valor bajo a  $r$  para promover la búsqueda global sin embargo no todos deben tener un valor demasiado bajo, para permitir que se exploten las mejores soluciones obtenidas, a medida que se acerca al final del proceso con las iteraciones el valor de  $r$  debe ser alto para permitir la explotación.  $A$  tiene su importancia ya que controla el rechazo o aceptación de una solución generada, al realizar este procedimiento evita que el sistema quede atrapado en mínimos locales.

#### **3.11.4. INICIALIZACIÓN**

De la misma forma que los algoritmos anteriores para este proceso también se incorporan en la inicialización la creación de los archivos para la comunicación como se observa también en el diagrama de flujo. Luego, se inicializa la población de murciélagos, en donde cada individuo de la población representa una posible solución para la optimización, en una matriz llamada *Bat*, se almacenan los individuos con todas sus dimensiones o variables de estudio, se asignan valores a la tasa de pulso y al volumen.

#### **3.11.5. EVALUACIÓN**

Para la evaluación de la función objetivo en el algoritmo dBA se utiliza la misma función fitness de la ecuación ( 65), tomando en cuenta que son los datos de los Bats los que se transfieren a las variables de la comunicación, es decir las dimensiones de los Bats representan las variables de la estructura a simular, se obtiene los datos de la frecuencia de operación, S11 e impedancia para obtener el fitness de cada bat, el cual se almacena en un vector correspondiente al fitness de todos los individuos de la población.

#### **3.11.6. MOVIMIENTO DE LOS MURCIÉLAGOS**

Para obtener las nuevas soluciones o ubicaciones de los murciélagos se aplican las reglas establecidas en la revisión teórica del algoritmo, es decir, se encuentran los valores de frecuencia  $Q_1$  y  $Q_2$ , dentro del rango establecido, mediante las ecuaciones dadas en ( 43), luego se aplican las reglas de la ecolocalización direccional mediante las ecuaciones establecidas en ( 42), es necesario realizar aquí el ajuste de límites para evitar cualquier error

Para el proceso de búsqueda local del algoritmo obtiene una nueva localización mediante el proceso de random walk especificado en la ecuación ( 44), y se actualizan las escalas de las variables mediante la ecuación ( 45), en este proceso también se aplica el ajuste de límites. Luego el algoritmo realiza las comparaciones necesarias de los valores de fitness para determinar una mejor solución, en este proceso se incrementa la tasa de pulso y se reduce el volumen a medida que se acerca hacia un valor óptimo, mediante las ecuaciones ( 46) y ( 47).

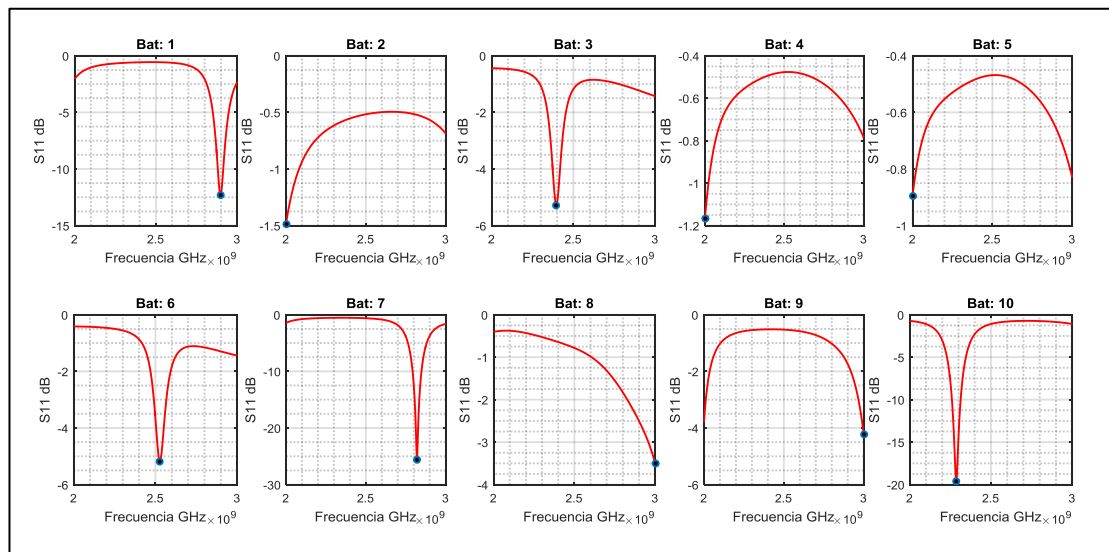
### 3.11.7. DATOS DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

El algoritmo implementado presenta en todo el proceso de optimización, la información necesaria para la verificación del funcionamiento del mismo primero presenta el tiempo en el que empieza el proceso y luego los datos de la iteración, estos son los murciélagos, que serán simulados que se componen de las variables a optimizar, como se muestra en la Figura 3.23, la población inicial para la optimización de una antena patch rectangular con frecuencia de operación de 2.4GHz, los individuos son generados de manera aleatoria.

EMPEZANDO ITERACION: 1		
agentes =		
37.2209	47.6448	6.7619
38.7006	40.8090	6.5852
29.1775	38.6720	11.7450
39.4733	28.9403	11.8236
39.3575	37.1344	10.8017
27.1283	35.5440	11.4944
36.8831	48.9873	9.9344
25.5357	46.2282	11.6040
35.1810	43.9435	10.4588
30.8834	41.3869	7.0271

**Figura 3.23** Individuos de la primera iteración para la optimización mediante dBA.

Fuente: Autora



**Figura 3.24** S11 de los 10 individuos, para la primera iteración a 2.4GHz.

Fuente: Autora

El proceso de evaluación al igual que los anteriores presenta las gráficas de los barridos de frecuencia para S11, de todos los individuos de la población, como se indica en la Figura 3.24., en donde cada individuo se denomina Bat, y se puede apreciar que al inicio del proceso como las dimensiones son aleatorias los resultados del barrido de frecuencia tienen un comportamiento deficiente. Sin embargo, el sistema presenta la información del proceso de la iteración concluida es decir el mejor valor global de fitness, junto con los agentes utilizados y los datos de las variables del mejor encontrado, como se muestra en la Figura 3.25, en donde el mejor valor de costo es de 28.0327, para el último individuo, las nuevas soluciones girarán en torno a esta solución como referencia, tratando de encontrar un mejor costo mediante la exploración y la explotación.

Resultados Iteration 1: Bes Cost = 28.0327				
fagentes =				
37.2209	47.6448	6.7619	80.4907	
38.7006	40.8090	6.5852	94.0947	
29.1775	38.6720	11.7450	52.8578	
39.4733	28.9403	11.8236	108.1058	
39.3575	37.1344	10.8017	109.9824	
27.1283	35.5440	11.4944	61.1089	
36.8831	48.9873	9.9344	45.0744	
25.5357	46.2282	11.6040	110.2111	
35.1810	43.9435	10.4588	104.8514	
30.8834	41.3869	7.0271	28.0327	
BestG =				
30.8834	41.3869	7.0271	28.0327	

**Figura 3.25** Resultados del proceso para la primera iteración con dBA.

Fuente: Autora



# **CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS**

## **4.1. INTRODUCCIÓN**

En el siguiente capítulo se mostrarán los resultados obtenidos del proceso de optimización en contraste con los obtenidos con los modelos convencionales de diseño de antenas planares, además, cabe recalcar que los procedimientos mostrados de los diferentes algoritmos en el capítulo anterior se realizan de manera similar para la antena planar circular, con la modificación de las variables que intervienen en la estructura mencionada.

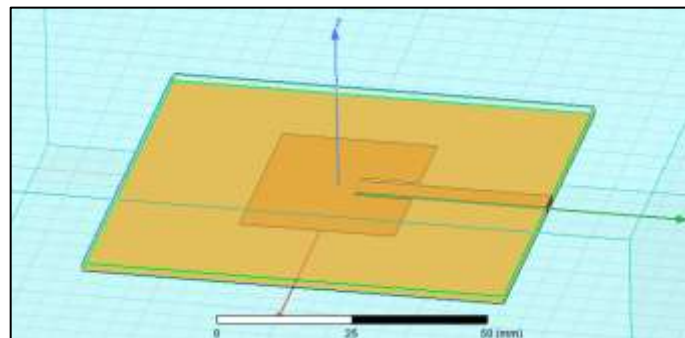
Los resultados muestran el proceso de optimización del algoritmo y la solución final obtenida para cada uno de los algoritmos implementados, con gráficas del S11 y la impedancia característica de la antena, para diferentes frecuencias a las cuales se analizaron los algoritmos, con el proceso de simulación. En este capítulo también se presentan las antenas escogidas para la construcción y posterior prueba de medición del parámetro de reflexión. Con todos los datos obtenidos del proceso de optimización y medición de antenas construidas se realiza un análisis destacando los puntos más importantes del proyecto.

## 4.2. SIMULACION DE ANTENAS DISEÑADAS CON MÉTODOS CONVENCIONALES

En esta sección se presentan los resultados de simulación obtenidos para las estructuras diseñadas mediante métodos convencionales, estos diseños se consideran como punto de partida para el análisis de los resultados de los algoritmos.

### 4.2.1. ANTENA PATCH RECTANGULAR

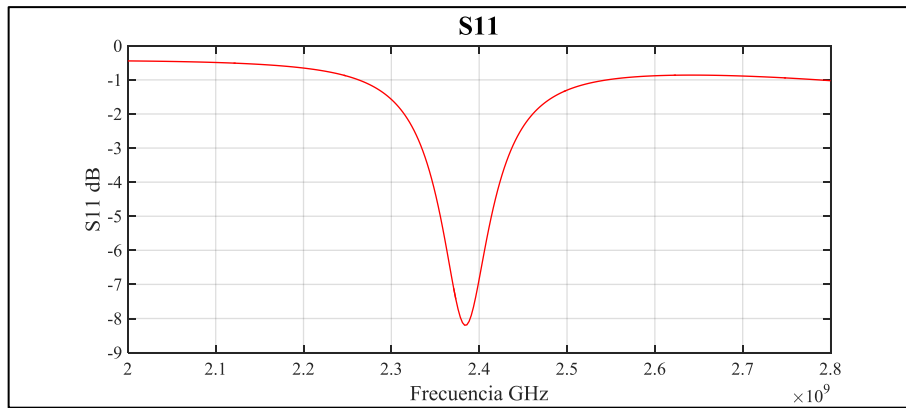
Se realiza la simulación de la antena patch rectangular sobre un sustrato de 80x80mm, FR4 de 1.5 mm de espesor, ancho del patch  $W = 38.0363 \text{ mm}$ , largo del patch  $L = 29.4778 \text{ mm}$  y la distancia de inserción  $y_0 = 10.9363 \text{ mm}$ , (Figura 4.1).



**Figura 4.1** Antena planar rectangular simulada.  
**Fuente:** Autora

En la Figura 4.2, se observa que, mediante el diseño por métodos convencionales para las características propuestas, la antena tiene una frecuencia de  $f_r = 2.383 \text{ GHz}$  y un parámetro de reflexión de  $S_{11} = -8.198 \text{ dB}$ .

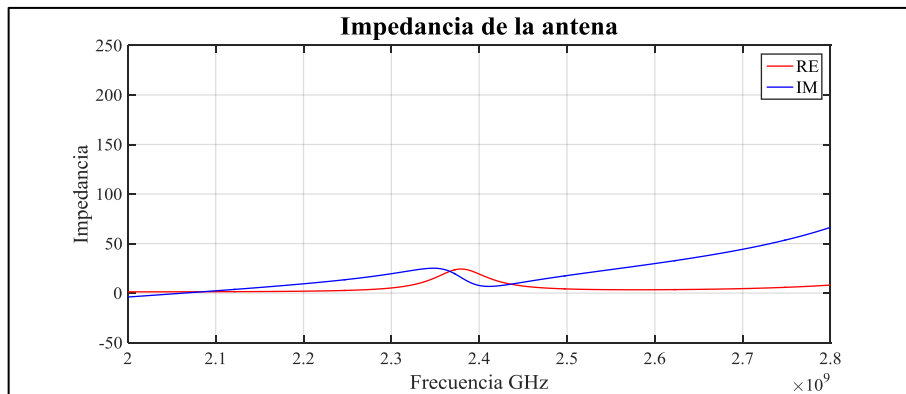




**Figura 4.2** *Parámetro de reflexión de la antena rectangular*

*Fuente: Autora.*

Además, en la Figura 4.3 se observa que para esta frecuencia la impedancia real alcanza los  $Z_r = 24.07 \Omega$ , mientras que la parte imaginaria tiene  $Z_i = 13.67\Omega$ .

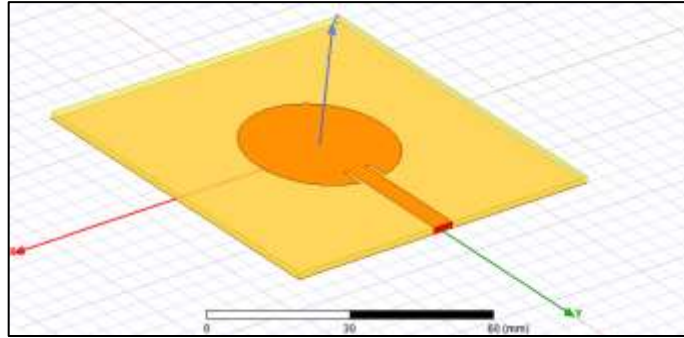


**Figura 4.3** *Impedancia de la antena rectangular.*

*Fuente: Autora.*

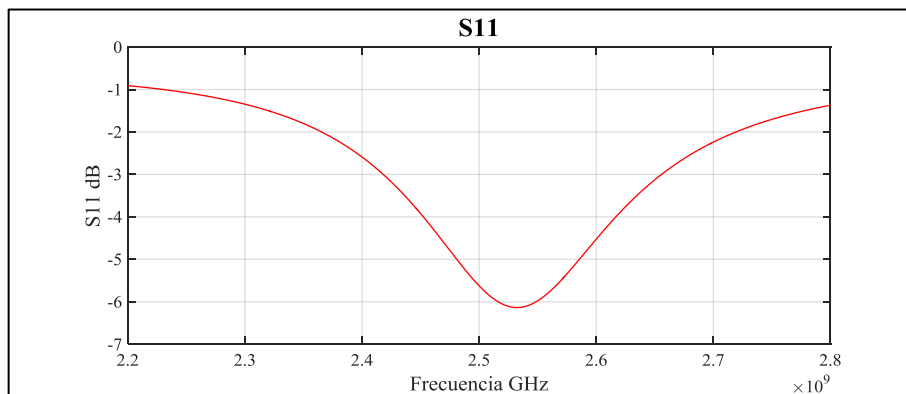
#### 4.2.2. ANTENA PATCH CIRCULAR

Se realiza la simulación de la antena patch circular sobre un sustrato de 80x80mm, FR4 de 1.5 mm de espesor, radio del parche radiador  $R = 17.367 \text{ mm}$  y la distancia de inserción  $y_0 = 5.334 \text{ mm}$ , en la Figura 4.4 se muestra el modelo de la antena simulada.



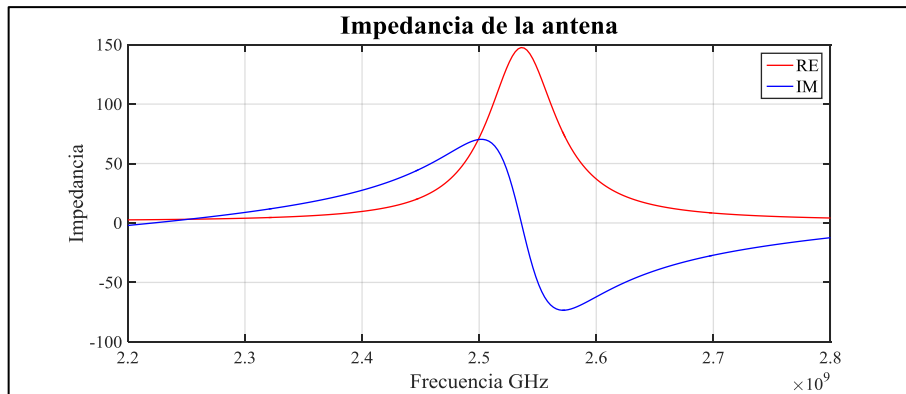
**Figura 4.4** Antena planar circular simulada.  
Fuente: Autora

El diseño se realizó mediante las fórmulas generales, pero en un sustrato ya establecido, a continuación, se muestra el resultado de la simulación de la antena en Ansys HFSS, en la Figura 4.5 se muestra la gráfica del parámetro de reflexión o S11 en donde se determina que la antena tiene una frecuencia de operación de  $f_r = 2.526\text{GHz}$ , mientras que el  $S_{11} = -6.113$ .



**Figura 4.5** Parámetro de reflexión de la antena circular.  
Fuente: Autora

En la Figura 4.6 de la misma forma se muestran los resultados de la impedancia de la antena la cual posee en la frecuencia de operación mencionada  $Z_r = 135.5 \Omega$  para su parte real mientras que para la imaginaria tiene  $Z_i = 38.34\Omega$ .



**Figura 4.6** Impedancia de la antena planar circular.  
Fuente: Autora

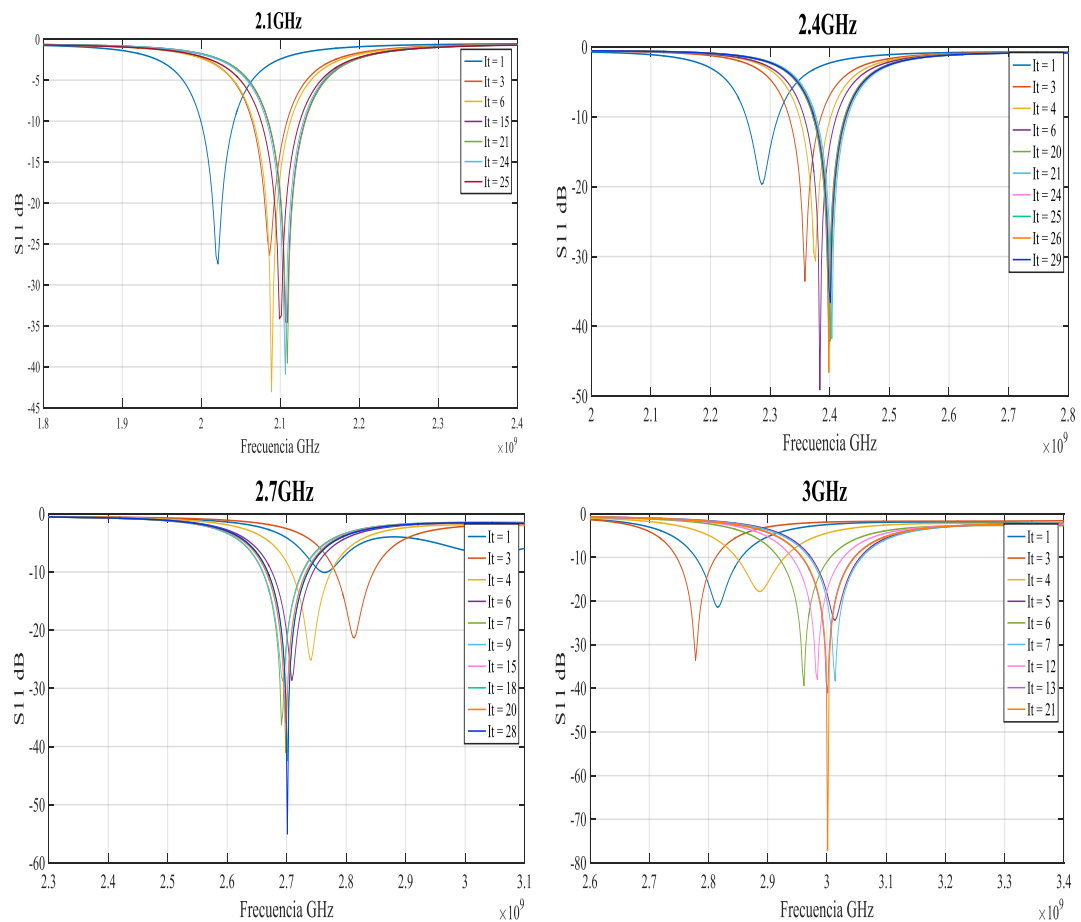
Los efectos observados en ambas antenas pueden darse debido al uso de un sustrato fijo y la intervención de la línea de alimentación por lo cual no se acoplan bien en la antena, además los denominados métodos convencionales, también son fórmulas aproximadas para el diseño.

### 4.3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA OPTIMIZACIÓN PARA LA ANTENA PATCH RECTANGULAR

Luego de la creación de las estructuras se realiza la optimización de los parámetros, el objetivo establecido fue que la antena se adaptara a la frecuencia deseada, el S11 tuviera un valor menor que -25dB y la impedancia un valor de 50 ohmios, a esa frecuencia, se muestran los resultados en simulación obtenidos para cada uno de los algoritmos, en la antena rectangular.

#### 4.3.1. PSO

Se han realizado varias optimizaciones para las frecuencias de 2.1GHz, 2.4GHz, 2.7GHz y 3GHz, consiguiendo en todos los casos que la antena funcionara a la frecuencia especificada y con mejores valores de S11 que el deseado.



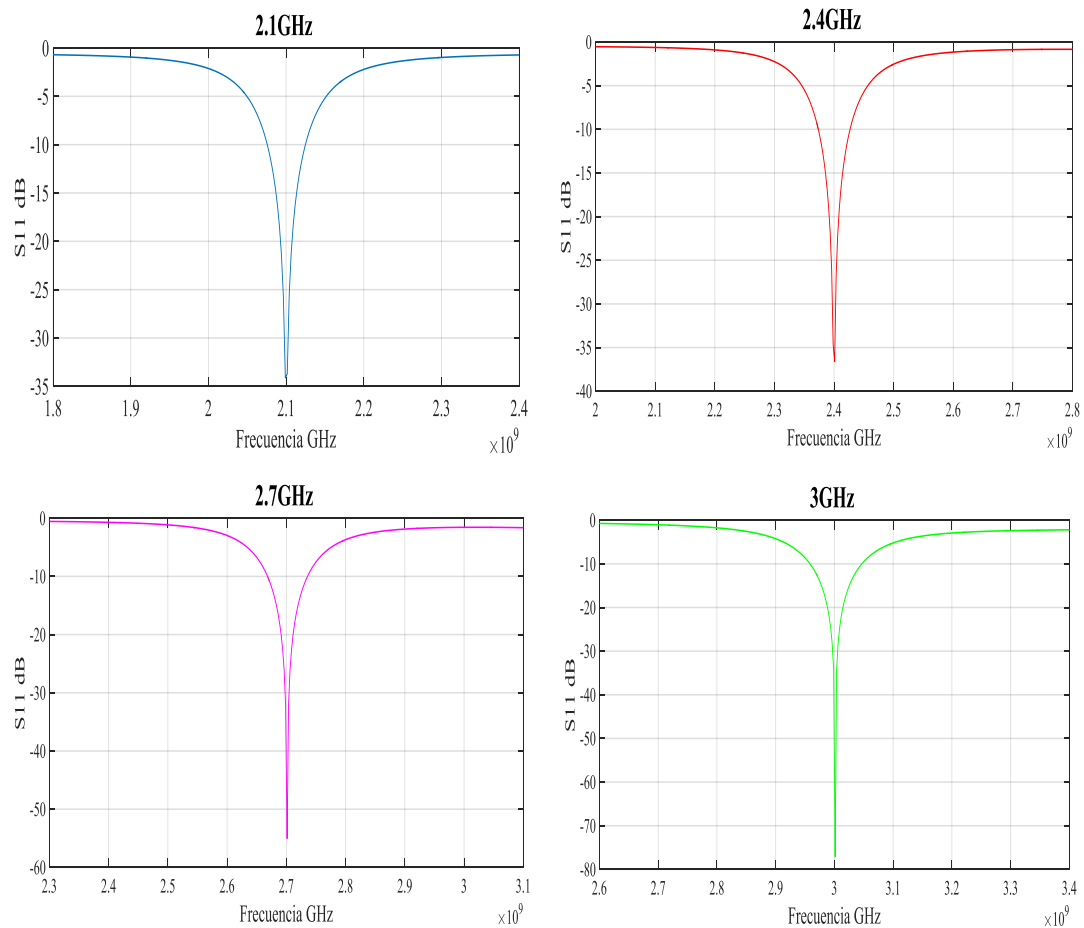
**Figura 4.7** Procesos de optimización usando PSO.

**Fuente:** Autora

En la Figura 4.7 se muestran los procesos de optimización para las frecuencias mencionadas, en cada proceso se visualiza la iteración en la que sucede algún cambio o minimización de la función de fitness, es posible ver como el algoritmo va escogiendo las mejores soluciones hasta llegar a la óptima. En la Tabla 4.1, se presentan las dimensiones obtenidas, para cada frecuencia y los valores de  $S_{11}$  e impedancia alcanzados por cada estructura.

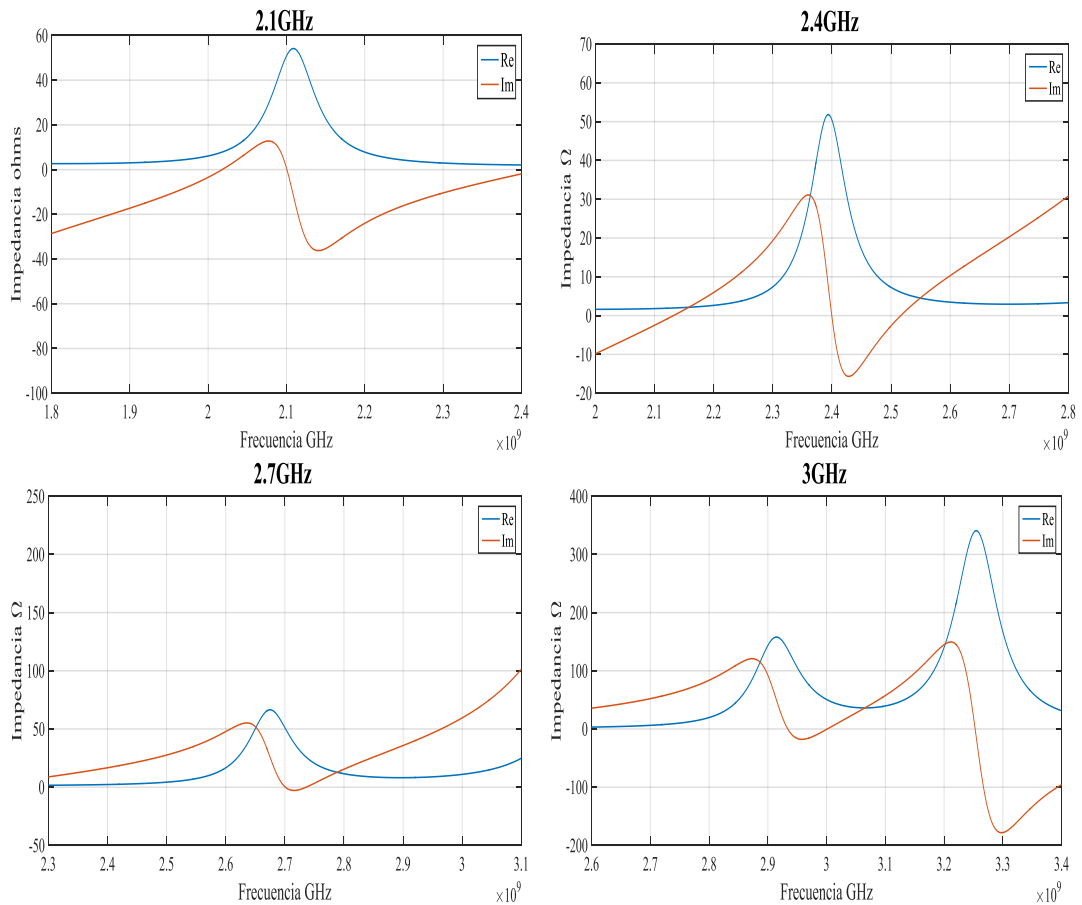
**Tabla 4.1** Resultados obtenidos para PSO.

Frec.	L(mm)	W(mm)	y0(mm)	S11(dB)	Z( $\Omega$ )
2.1 GHz	33.7719	48.4972	8.1579	-33.71	50.0379
2.4 GHz	29.5895	36.6955	8.5734	-36.61	49.9806
2.7 GHz	25.8385	38.4183	7.0012	-55.04	50.0434
3 GHz	23.0990	36.7309	6.7641	-77.1	49.9896



**Figura 4.8** Soluciones óptimas obtenidas para PSO.  
Fuente: Autora

En la Figura 4.8 se presentan los parámetros de reflexión de las antenas para las frecuencias analizadas, es decir la respuesta óptima que halló el algoritmo, en el proceso de optimización, el  $S_{11}$  está por debajo de -35dB, en todos los casos. En Figura 4.9 se presentan los resultados de la impedancia que poseen las estructuras en donde es posible visualizar la resonancia de las antenas de acuerdo a la parte imaginaria de la impedancia, en todos los casos los valores de la impedancia real rondan los 50 ohmios, lo cual comprueba el correcto funcionamiento del algoritmo PSO, para la antena patch rectangular.

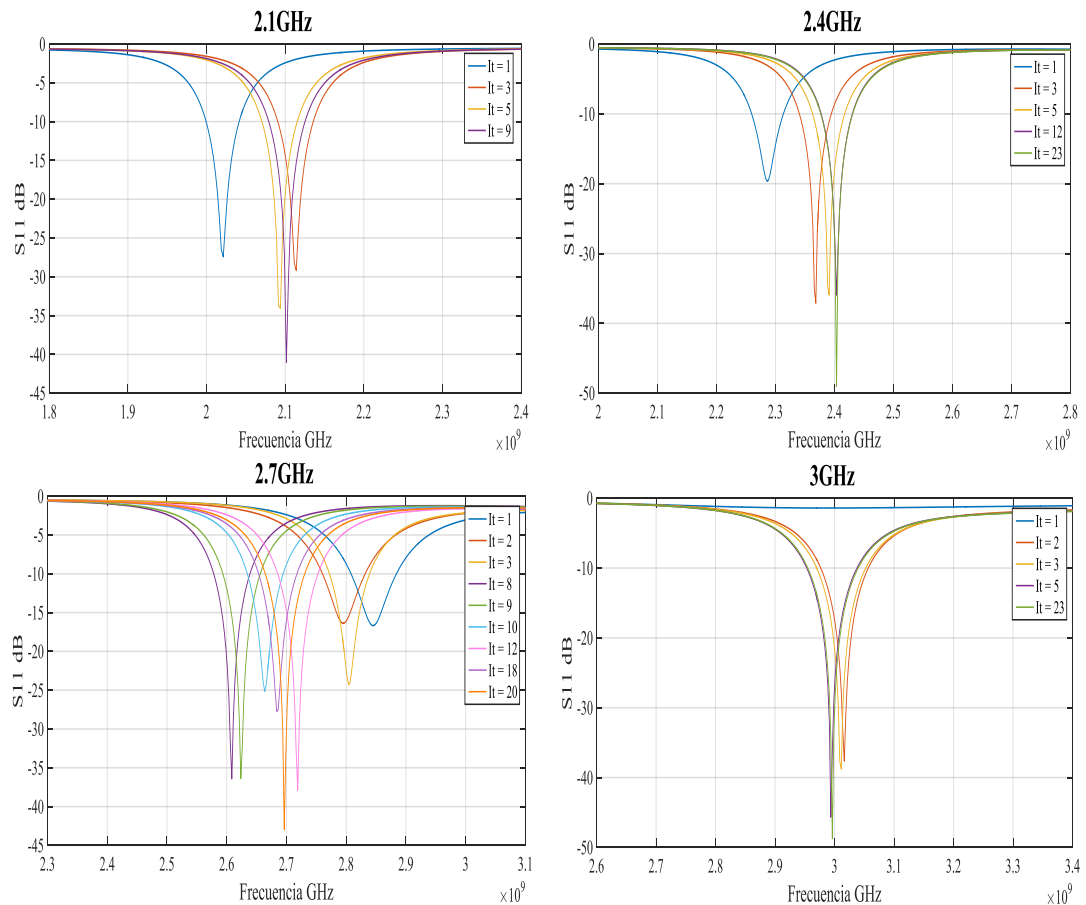


**Figura 4.9** Impedancia de las estructuras optimizadas en PSO.  
**Fuente:** Autora

### 4.3.2. FA

En el caso del algoritmo FA, en la Figura 4.10, se presentan los procesos de optimización obtenidos, para la antena rectangular, este algoritmo utiliza menos iteraciones por ejemplo a 2.1GHz el algoritmo converge en la novena iteración, siendo la más baja y obteniendo un valor de S11 de -41.03, como se especifica en la

Tabla 4.2, en donde se presentan las dimensiones obtenidas para este algoritmo.



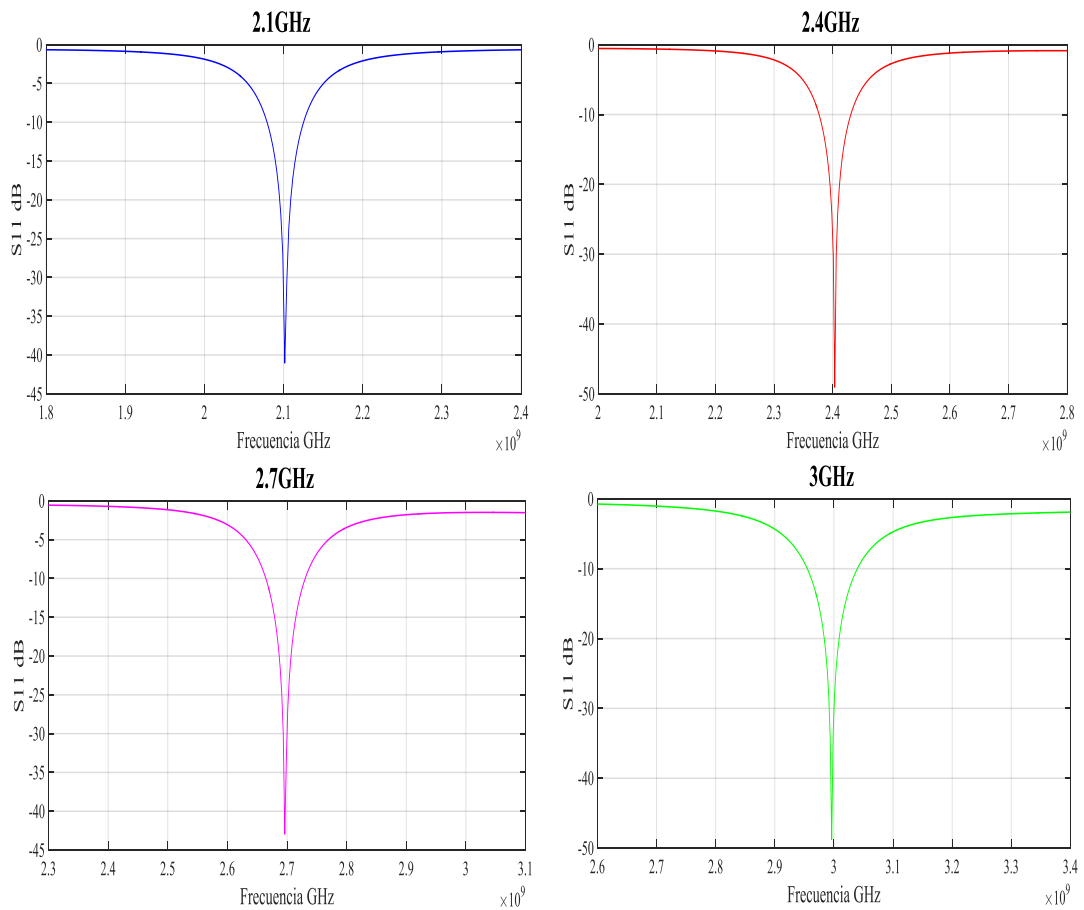
**Figura 4.10** *Procesos de optimización usando FA.*  
**Fuente:** *Autora.*

**Tabla 4.2** *Resultados obtenidos para FA.*

<b>Frec.</b>	<b>L(mm)</b>	<b>W(mm)</b>	<b>y0(mm)</b>	<b>S11(dB)</b>	<b>Z(<math>\Omega</math>)</b>
2.1 GHz	33.9684	42.0989	9.6557	-41.03	50.0263
2.4 GHz	29.3928	39.3397	8.0047	-49.05	49.6667
2.7 GHz	25.9776	36.0611	7.6206	-42.95	50.6865
3 GHz	23.2332	33.9626	7.4707	-48.76	50.1912

En la Figura 4.11, se pueden observar los resultados o soluciones óptimas obtenidas para cada frecuencia, de las gráficas se puede destacar que cada antena se encuentra perfectamente acoplada a la frecuencia deseada con valores que superan los -40 dB, es decir son mucho menores, lo que demuestra el acoplamiento de la antena, además se acotan los resultados de las impedancias para cada frecuencia lo cual se puede observar en la Figura 4.12, en donde todas las antenas tienen el valor

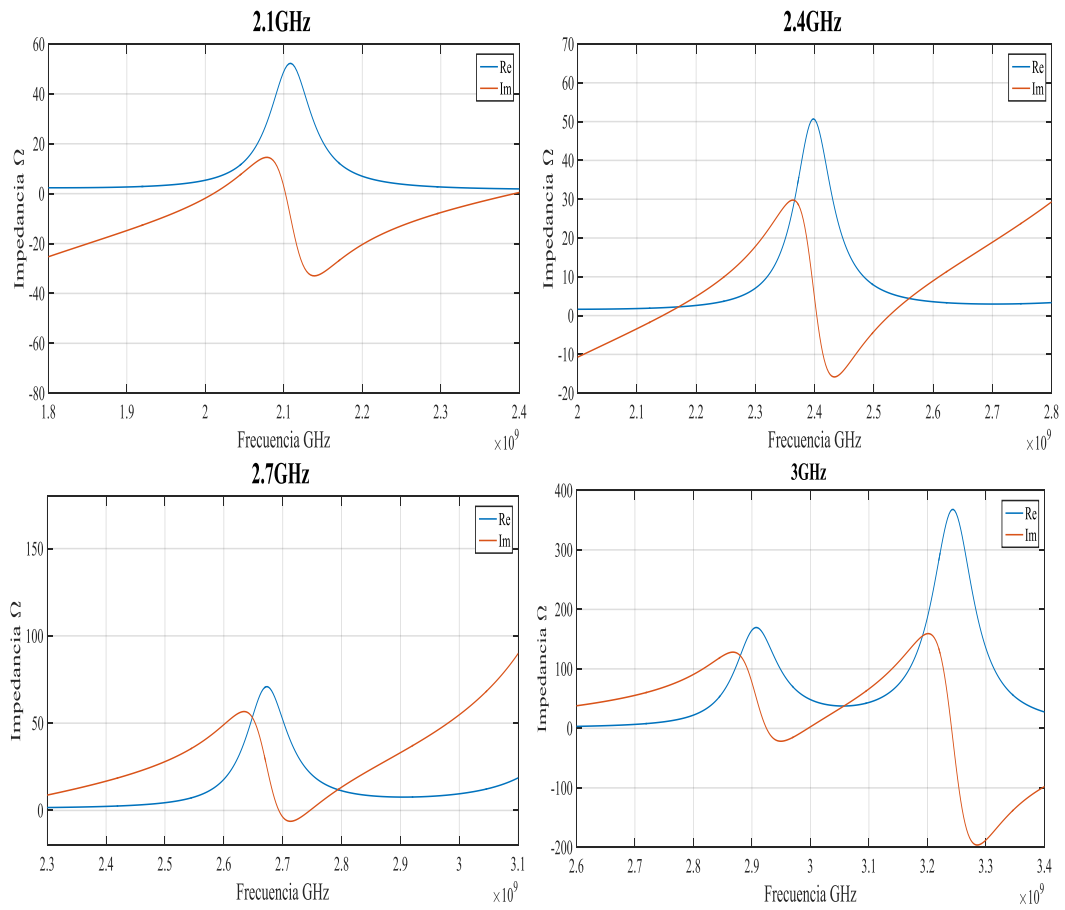
de impedancia deseada de 50 ohmios, mediante los resultados presentados en las tres gráficas se puede comprobar el funcionamiento del algoritmo Firefly para el diseño de la antena rectangular, con los parámetros especificadas, destacando las características del algoritmo en cuanto a rápida convergencia y exploración del espacio de búsqueda.



**Figura 4.11** Soluciones óptimas obtenidas para FA.

**Fuente:** Autora

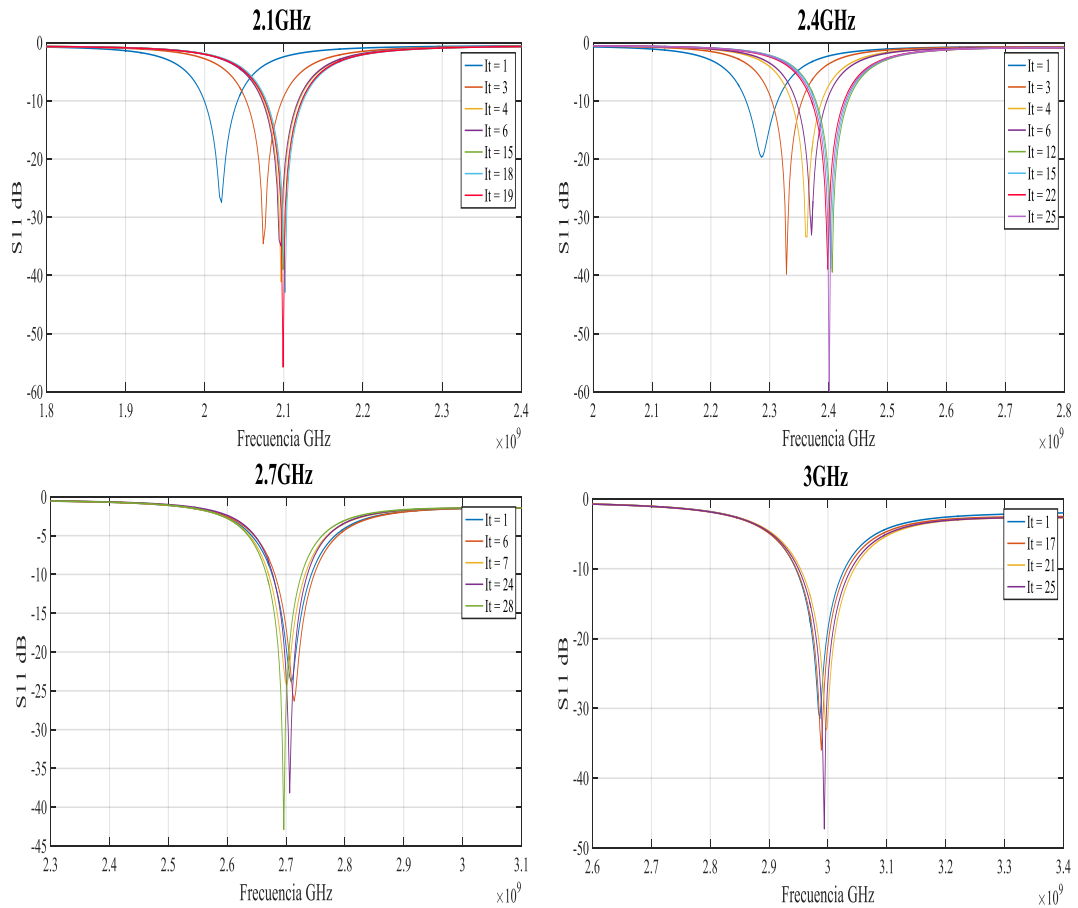




**Figura 4.12** Impedancia de las estructuras optimizadas en FA.  
**Fuente:** Autora

### 4.3.3. DBA

Se han realizado los mismos experimentos con las diferentes frecuencias para el algoritmo dBA, conseguir la adaptación a los parámetros especificados, en la Figura 4.13 se presentan los procesos de optimización para las frecuencias seleccionadas en donde cada gráfica posee un color diferente e indica que fue la mejor resultante del proceso en dicha iteración.



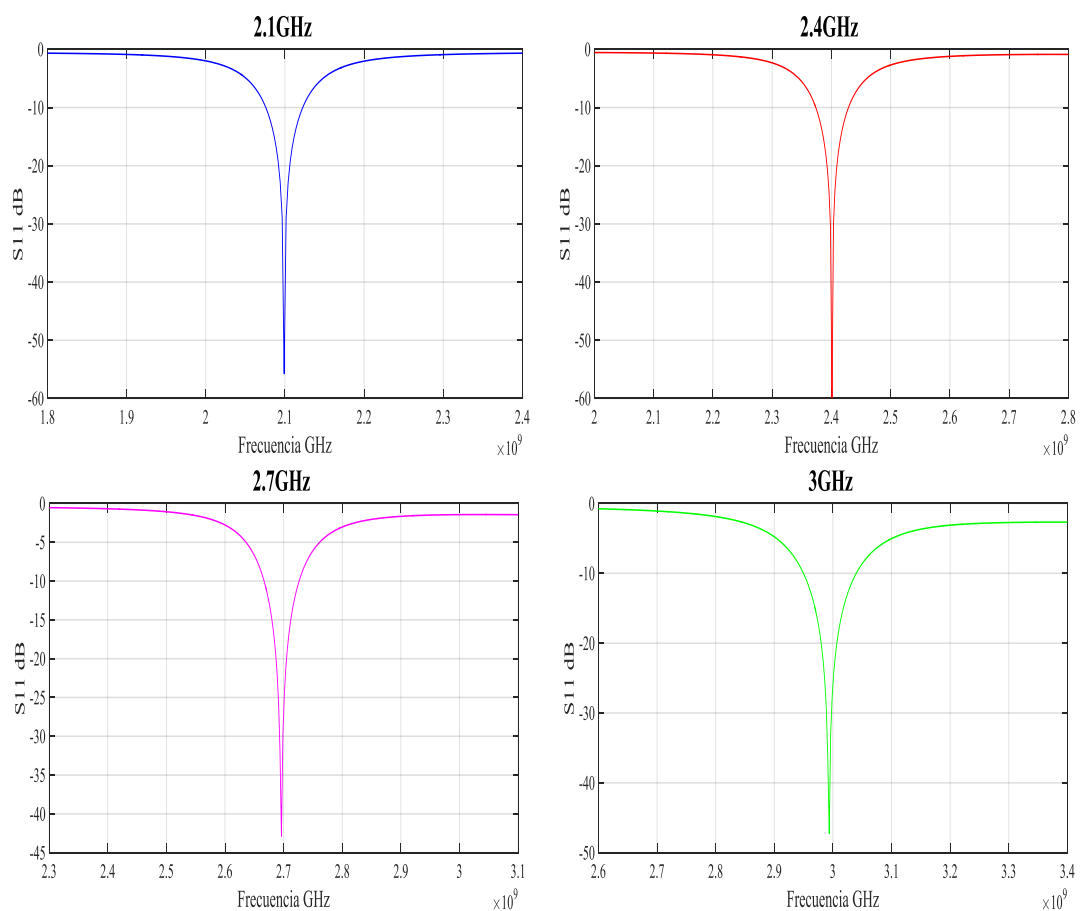
**Figura 4.13** Procesos de optimización usando dBA.

**Fuente:** Autora

**Tabla 4.3** Resultados obtenidos para dBA.

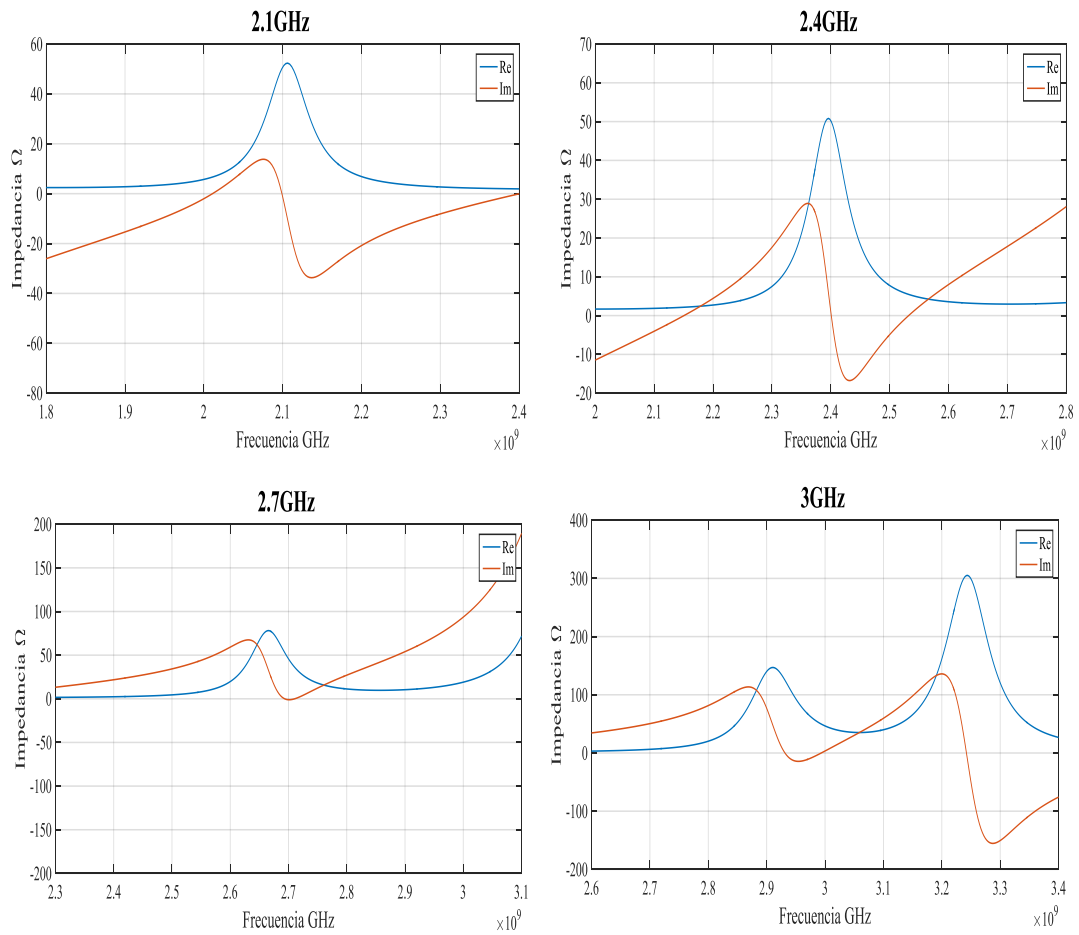
<b>Frec.</b>	<b>L(mm)</b>	<b>W(mm)</b>	<b>y0(mm)</b>	<b>S11(dB)</b>	<b>Z(<math>\Omega</math>)</b>
2.1 GHz	33.9688	43.7019	9.3501	-55.75	50.1172
2.4 GHz	29.3860	40.8720	7.5920	-59.88	49.9829
2.7 GHz	26.4284	26.6687	9.5737	-43.21	49.8032
3 GHz	23.0886	36.7132	6.7507	-47.27	50.0671

Las estructuras resultantes, es decir las dimensiones definidas como óptimas para las antenas se encuentran especificadas en la Tabla 4.3, en donde se encuentran los valores obtenidos para L, W, y  $y_0$ . Además, para observar la adaptación de las antenas y las características de acuerdo a los parámetros establecidos se presenta la Figura 4.14, en donde se puede apreciar por separado la respuesta optimizada que entrega el algoritmo para cada frecuencia, se realiza de la misma manera para la impedancia y los resultados se exponen en la Figura 4.15. Con estos resultados se demuestra la convergencia del algoritmo.



**Figura 4.14** Soluciones óptimas obtenidas para dBA.

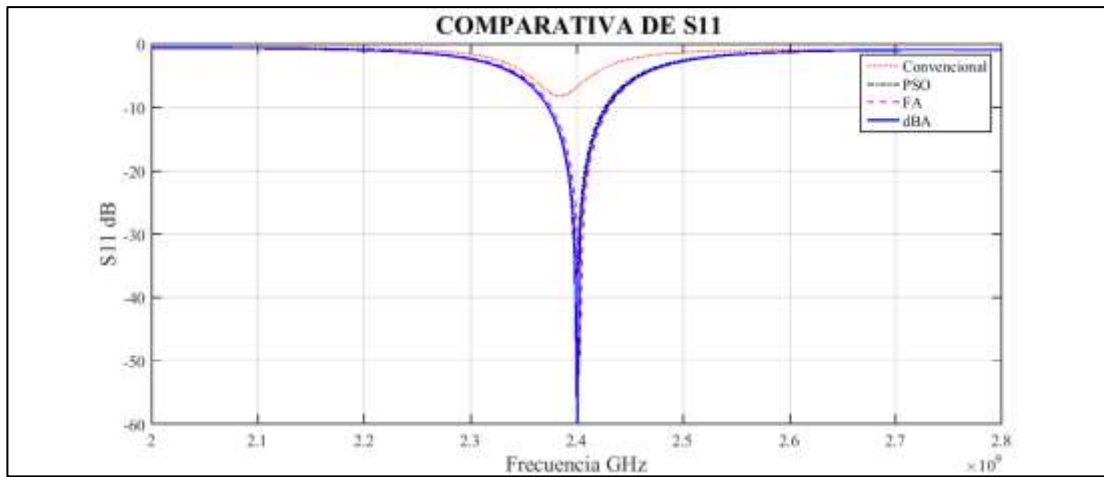
**Fuente:** Autora



**Figura 4.15** Impedancias de las estructuras optimizadas en dBA.  
**Fuente:** Autora

#### 4.3.4. GRÁFICA COMPARATIVA

En la Figura 4.16 se presenta una gráfica en la cual se compara los resultados obtenidos mediante el diseño convencional de la antena de parche rectangular, contrastado con los resultados obtenidos mediante los algoritmos implementados, para la frecuencia de 2.4 GHz, en términos de las pérdidas de retorno, para el diseño de la antena planar rectangular. La línea roja presenta el modelo convencional, la negra el resultado obtenido mediante PSO, la púrpura el resultado obtenido mediante FA y finalmente la línea azul el resultado obtenido mediante dBA el cual es el mejor resultado obtenido ya que posee un S11 de -59.88 obtenido mediante simulación.



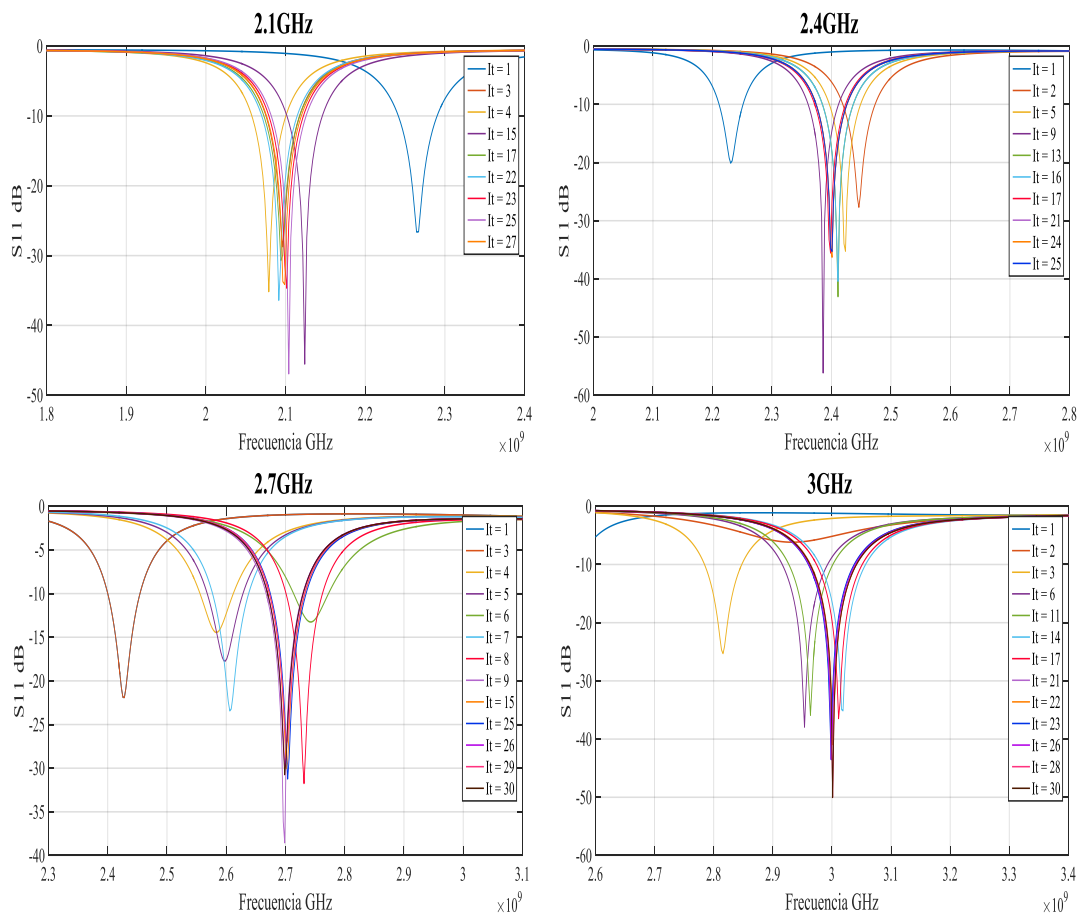
**Figura 4.16** Comparativa de S11 para la antena rectangular de 2.4GHz.  
**Fuente:** Autora

#### 4.4. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA OPTIMIZACIÓN PARA ANTENA PATCH CIRCULAR

Se realiza el mismo proceso de optimización, para las variables de la antena planar circular, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

##### 4.4.1. PSO

De la misma forma se muestran primero los procesos de optimización en la Figura 4.17, en los que se puede ver como se acercan al objetivo de frecuencia y S11 deseados de la antena, sin embargo se puede observar que en estos procesos de optimización existen más variaciones con respecto a la antena rectangular e incluso llegan a las 30 iteraciones para encontrar el resultado óptimo, por ejemplo en la antena de 2.7GHz se llega a la iteración 30 y se obtiene un valor de S11 de -30.76.



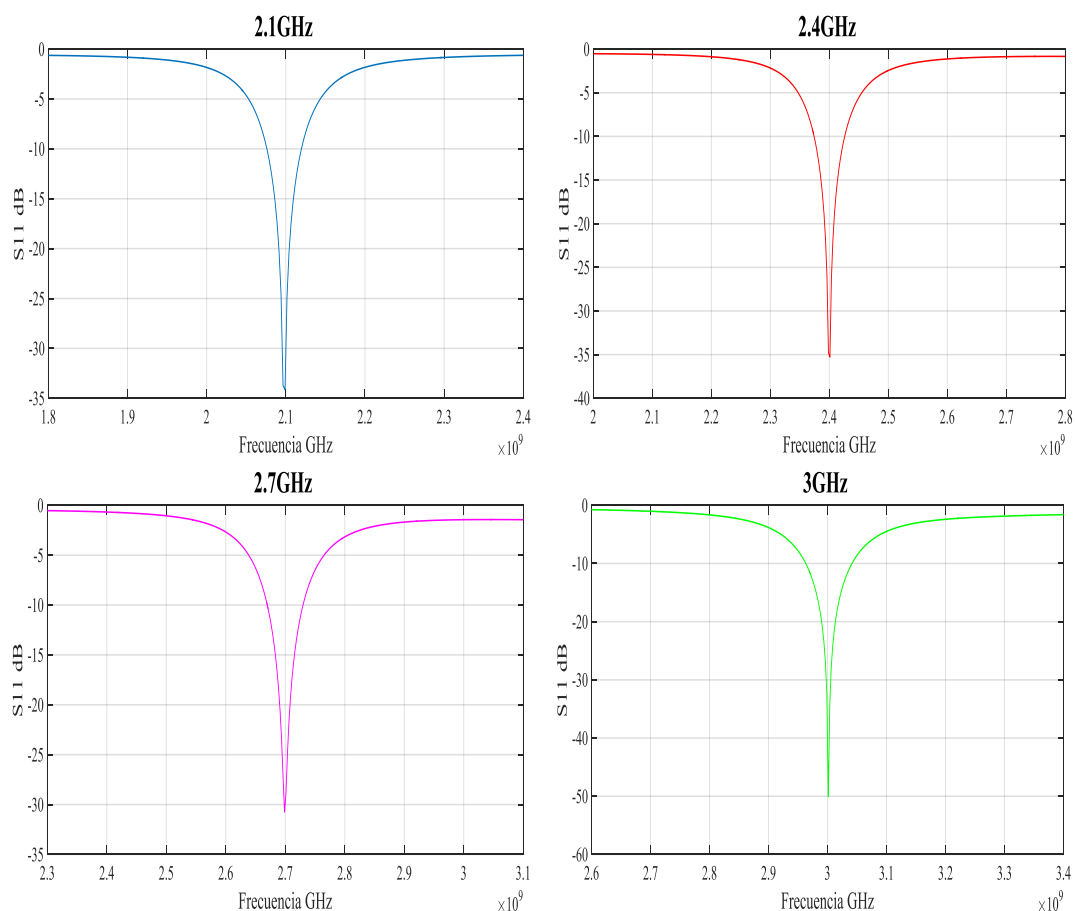
**Figura 4.17** Procesos de optimización de antena circular mediante PSO.

**Fuente:** Autora

**Tabla 4.4 Resultados obtenidos para la antena circular mediante PSO.**

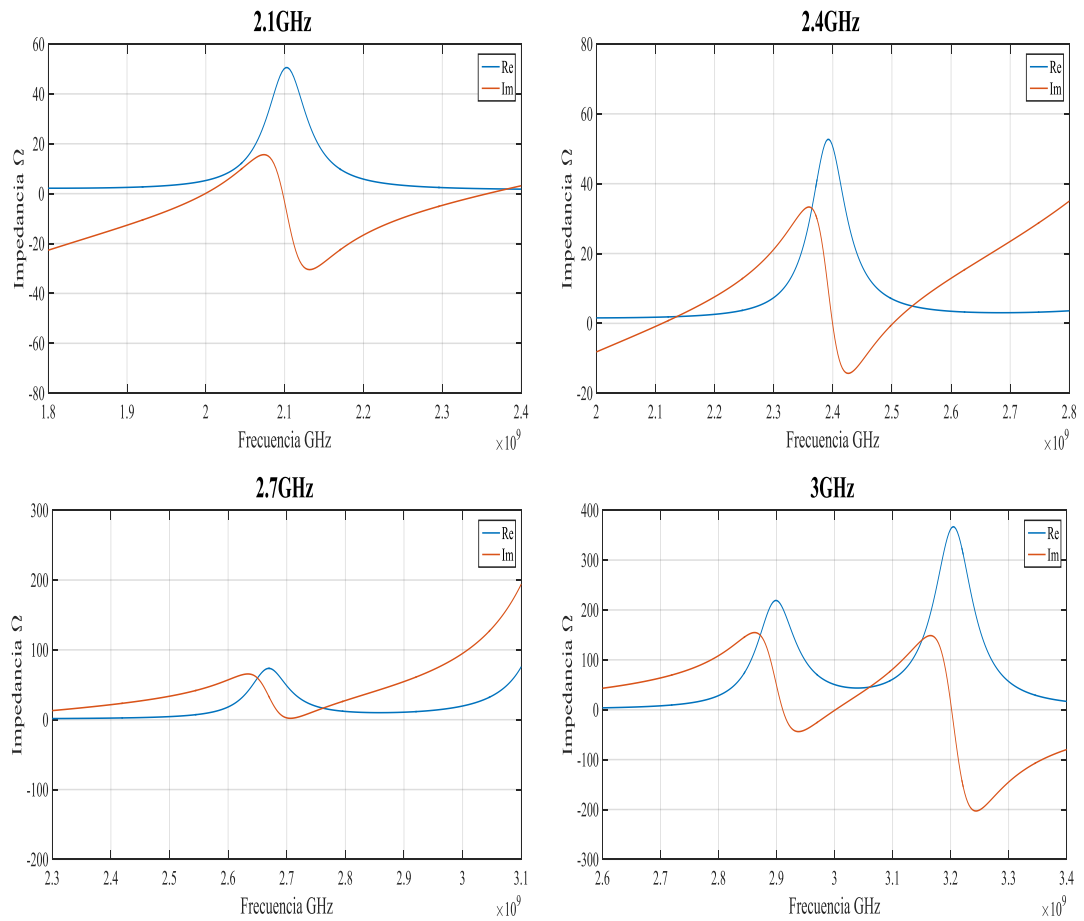
<b>Frec.</b>	<b>R(mm)</b>	<b>y0(mm)</b>	<b>S11(dB)</b>	<b>Z(<math>\Omega</math>)</b>
2.1 GHz	20.8791	14.5171	-34.14	49,96
2.4 GHz	18.2305	12.7823	-35.28	51,31
2.7 GHz	16.1418	12.3381	-30.76	49.93
3 GHz	14.5271	11.6190	-50.02	50.9

En la Tabla 4.4, se encuentran las dimensiones de las variables para la antena circular, las cuales son el radio R y la distancia de inserción, para el acoplamiento de la línea de transmisión, en la misma tabla también se resumen los valores de S11 y de impedancia obtenidos en los procesos de optimización, estos valores se comprueban en las siguientes gráficas, en la Figura 4.18, se presentan las gráficas de S11 para cada una de las frecuencias, el mejor resultado obtenido mediante el algoritmo PSO, para cada una de las frecuencias, así mismo en la Figura 4.19, se presentan las impedancias de las estructuras obtenidas.



**Figura 4.18 Soluciones óptimas obtenidas para PSO en la antena circular.**

**Fuente:** Autora



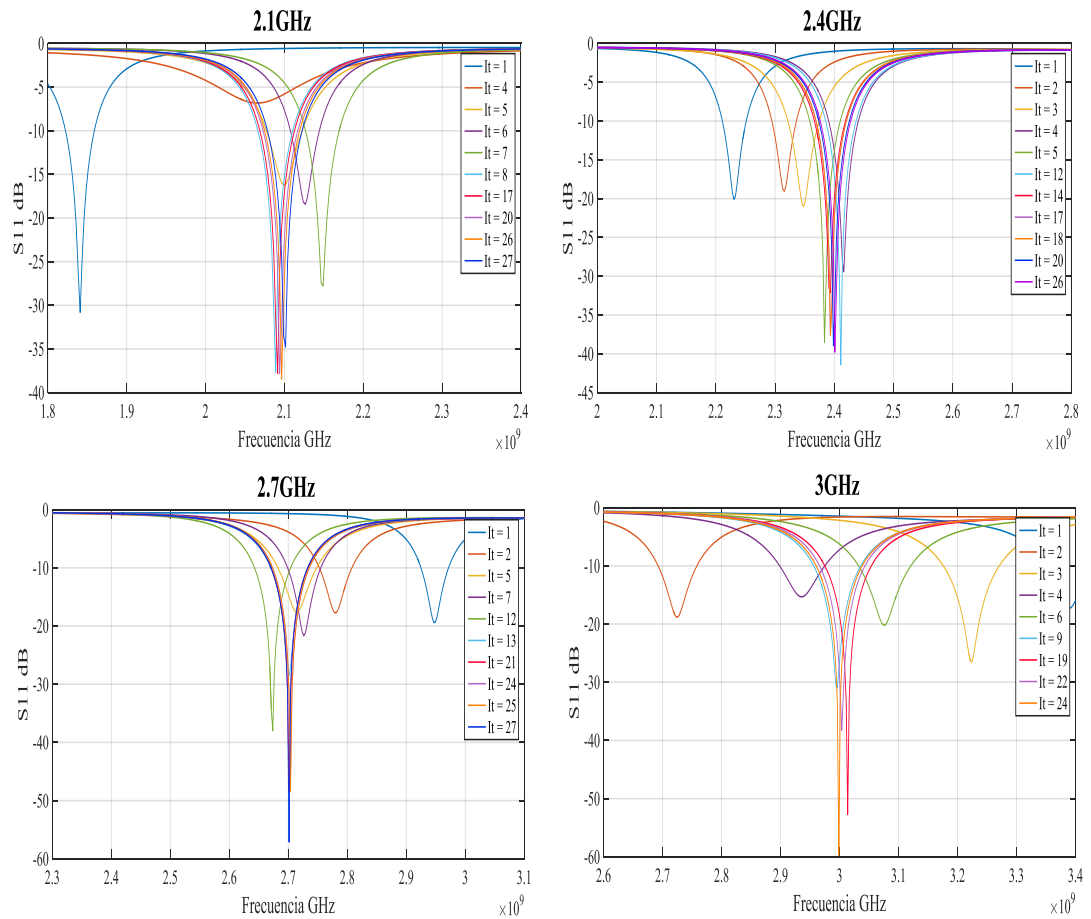
**Figura 4.19** Impedancias obtenidas de las estructuras para PSO.  
**Fuente:** Autora

Con los resultados mostrados se puede observar que el algoritmo logra la convergencia obteniendo un buen resultado a pesar de utilizar las 30 iteraciones.



#### 4.4.2. FA

Se realizan las mismas pruebas, para el algoritmo FA se puede observar como el algoritmo converge rápidamente, esto se aprecia en la Figura 4.20, por ejemplo, para la antena de 3GHz, en la iteración nueve se establece en la frecuencia deseada y las demás iteraciones perfeccionan este proceso.

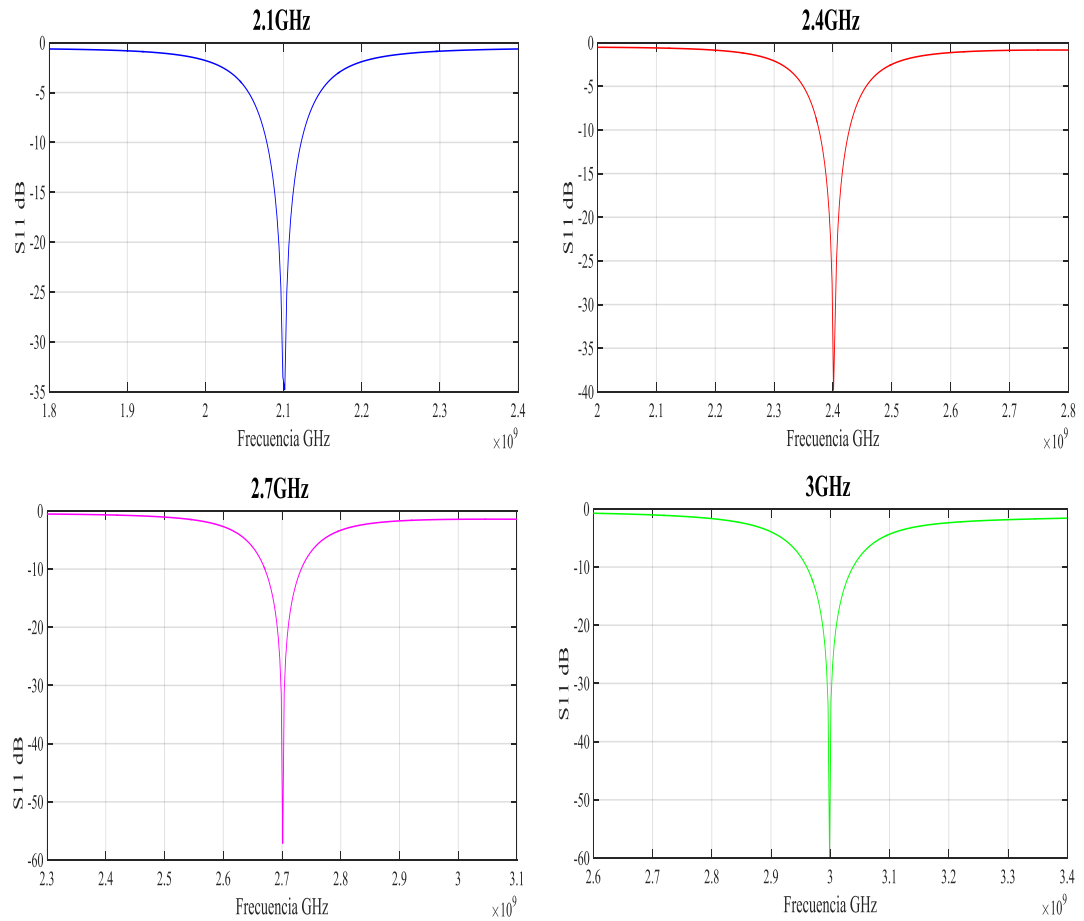


**Figura 4.20** Procesos de optimización para antena circular mediante FA.  
Fuente: Autora

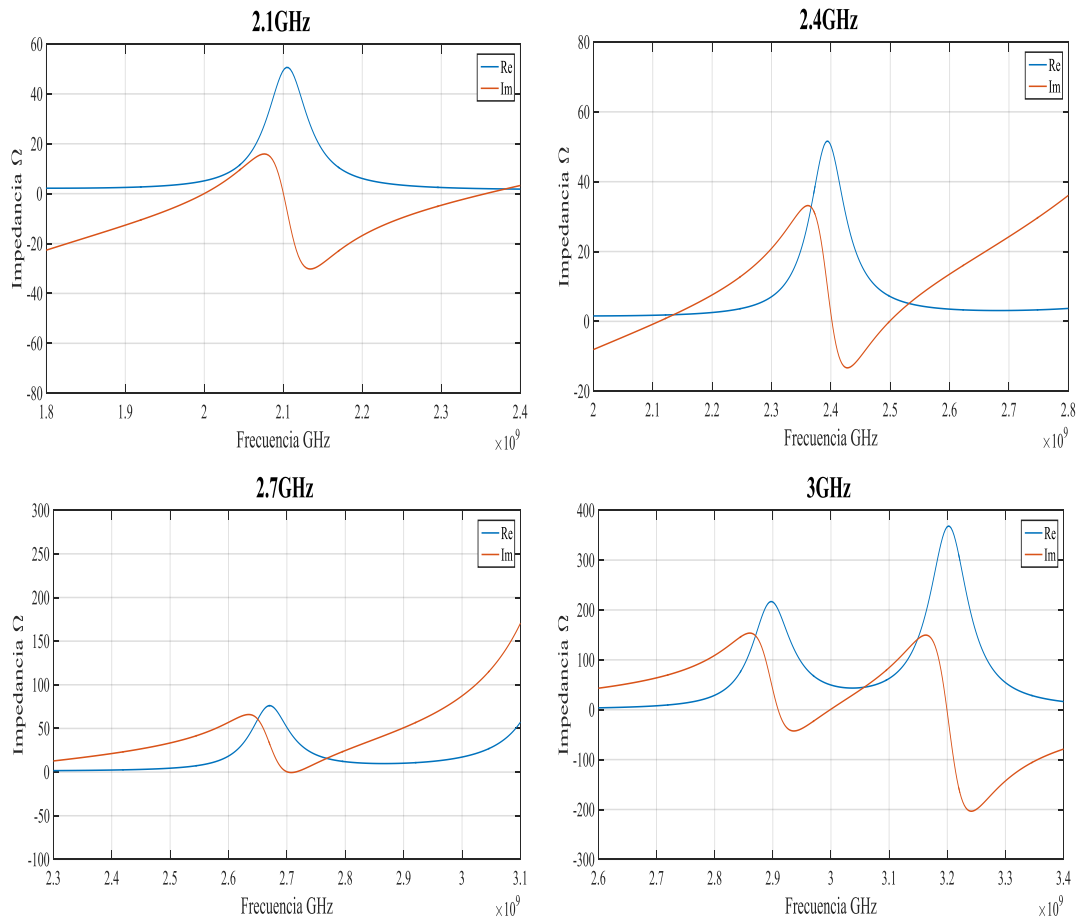
**Tabla 4.5** Resultados obtenidos para la antena circular mediante FA.

Frec.	R(mm)	y0(mm)	S11(dB)	Z( $\Omega$ )
2.1 GHz	20.8569	14.4806	-34,78	50.04
2.4 GHz	18.2115	12.8642	-39.80	49.98
2.7 GHz	16.1412	12.1848	-57.13	49.89
3 GHz	14.5342	11.6376	-59.70	49.09

En la Tabla 4.5 se resumen los resultados obtenidos de los procesos de optimización para las estructuras mediante el algoritmo Firefly, tanto los valores de S11 como impedancia demuestran que están dentro de lo adecuado, en la Figura 4.21 se muestran estos resultados optimizados para el parámetro de reflexión mientras que en la Figura 4.22 se muestran los resultados de la impedancia de las antenas.



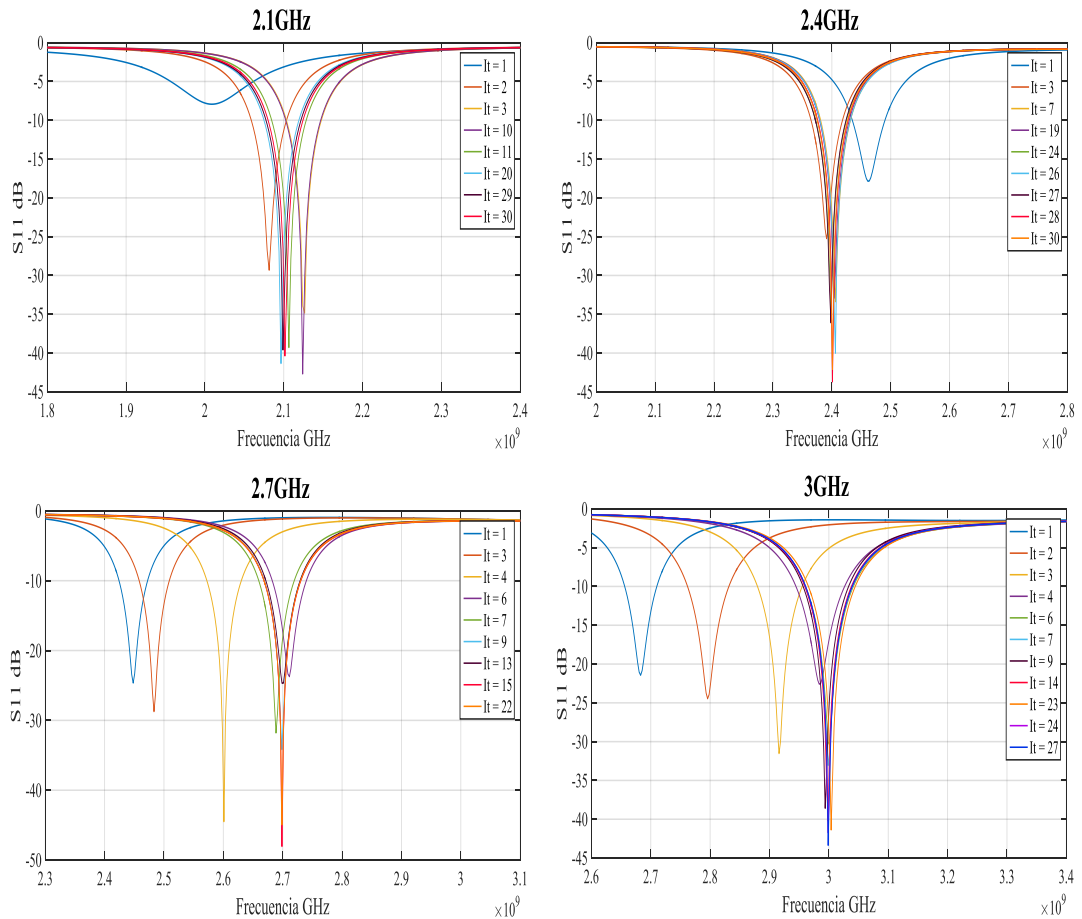
**Figura 4.21** Soluciones óptimas obtenidas para la antena circular mediante FA.  
**Fuente:** Autora



**Figura 4.22** Impedancias de las estructuras obtenidas mediante FA.  
**Fuente:** Autora

### 4.4.3. DBA

Con los mismos objetivos se realiza también la optimización mediante el algoritmo Bat direccional, para el cual se presentan los procesos de optimización a distintas frecuencias en la Figura 4.23, en donde se aprecia que el algoritmo se acerca cada vez más a su objetivo al igual que en PSO necesita más iteraciones con respecto a la rectangular, sin embargo todas están por debajo de  $-40\text{dB}$  en  $S_{11}$ .

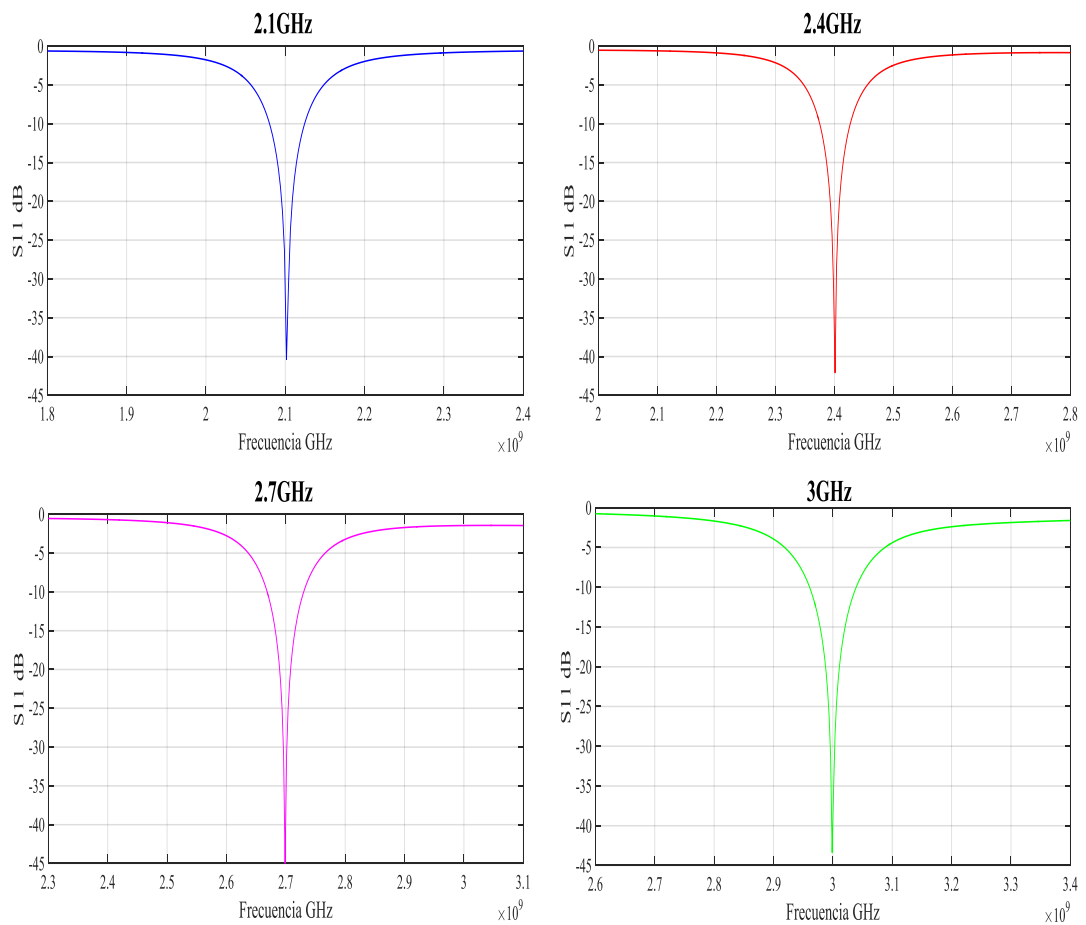


**Figura 4.23** Procesos de optimización para la antena circular mediante dBA.  
Fuente: Autora

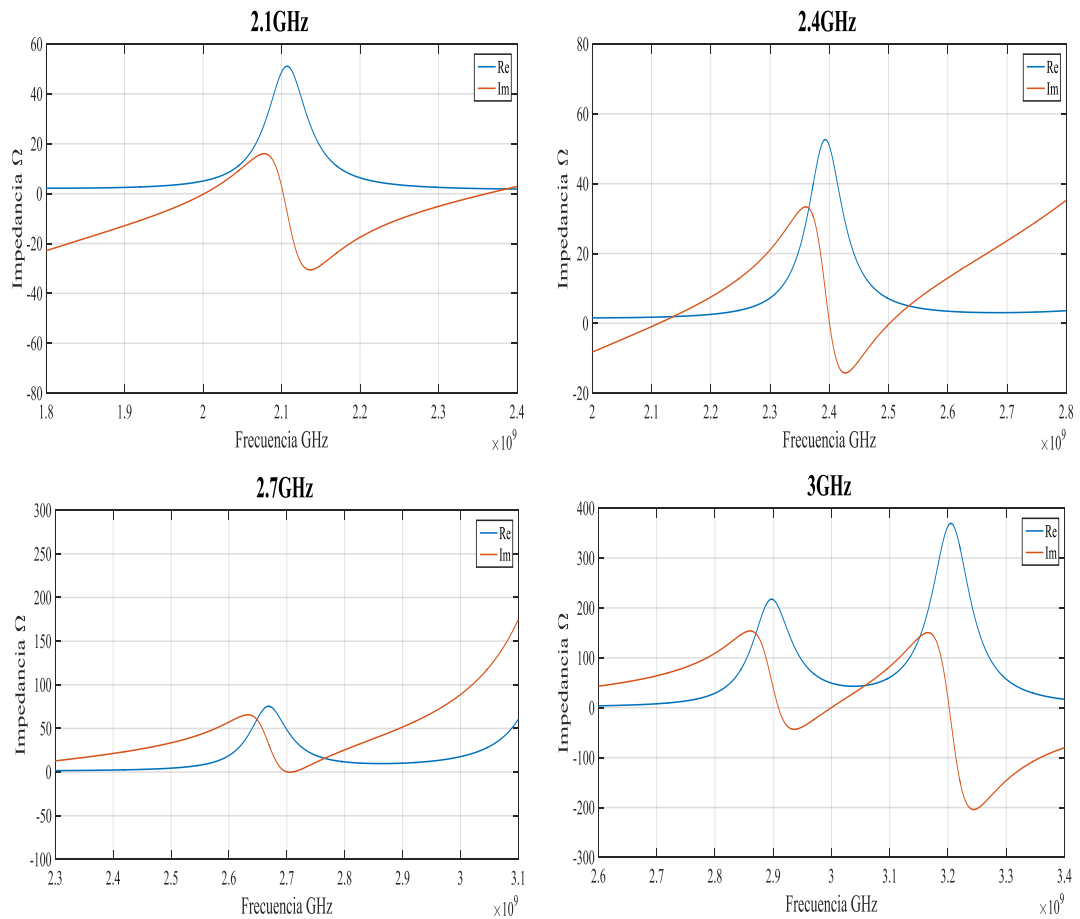
**Tabla 4.6** Resultados obtenidos para la antena circular mediante dBA.

Frec.	R(mm)	y0(mm)	S11(dB)	Z( $\Omega$ )
2.1 GHz	20.8541	14.4364	-40.38	49.67
2.4 GHz	18.2252	12.8052	-42.10	50.37
2.7 GHz	16.1468	12.2139	-44.97	49.91
3 GHz	14.5400	11.6044	-43.37	48.89

En la Tabla 4.6 se presentan las dimensiones obtenidas para las variables de interés, mientras que en la Figura 4.24, se muestran los resultados del S11 de las antenas optimizadas obtenidas mediante este algoritmo de optimización, los resultados de impedancia se pueden apreciar en la Figura 4.25, los resultados se encuentran de acuerdo a lo establecido por lo que se comprueba el funcionamiento del algoritmo dBA en el diseño de antenas planares, el cual tiene un comportamiento similar a PSO.



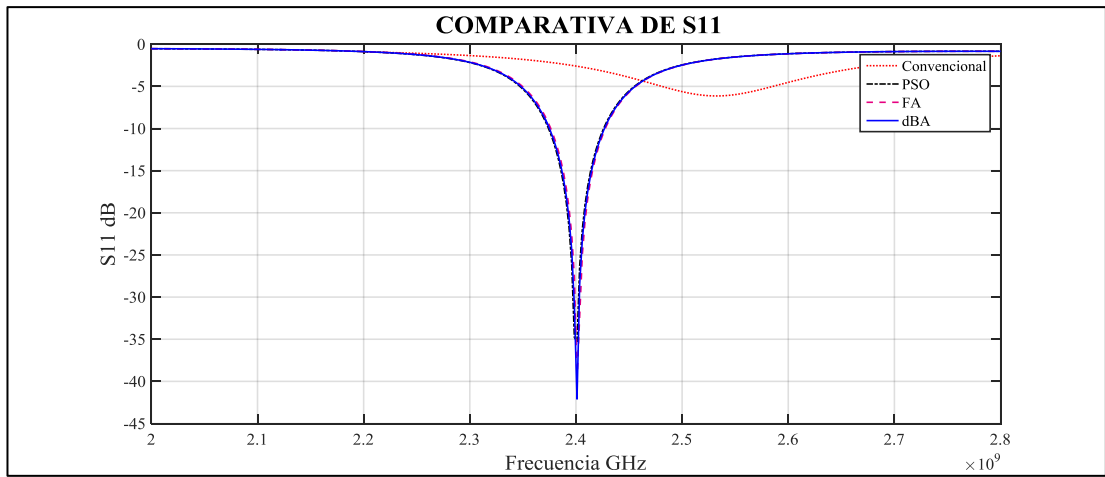
**Figura 4.24** Soluciones óptimas obtenidas mediante dBA, para la antena circular.  
**Fuente:** Autora



**Figura 4.25** Impedancias de las antenas circulares obtenidas mediante dBA.  
**Fuente:** Autora

#### 4.4.1. GRÁFICA COMPARATIVA

En la Figura 4.26 se presenta una gráfica en la cual se compara los resultados obtenidos mediante el diseño convencional de la antena de parche circular, contrastado con los resultados obtenidos mediante los algoritmos implementados, para la frecuencia de 2.4 GHz, en términos de las pérdidas de retorno, para el diseño de la antena planar circular con inserción. La línea roja presenta el modelo convencional, la negra el resultado obtenido mediante PSO, la púrpura el resultado obtenido mediante FA y finalmente la línea azul el resultado obtenido mediante dBA el cual es el mejor resultado obtenido ya que posee un S11 de -42.10 obtenido mediante simulación.

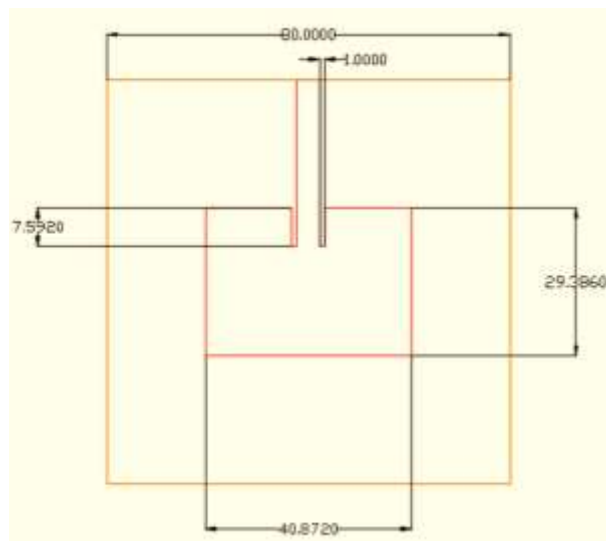


**Figura 4.26** Comparativa de  $S_{11}$  para la antena planar circular de 2.4GHz.  
**Fuente:** Autora

## 4.5. CONSTRUCCIÓN DE LAS ANTENAS

Como método de validación de los resultados obtenidos de los procesos de optimización se realiza la construcción de dos de las antenas obtenidas una de tipo rectangular y otra circular, ambas para la frecuencia de 2.4GHz, las antenas escogidas son las del algoritmo dBA.

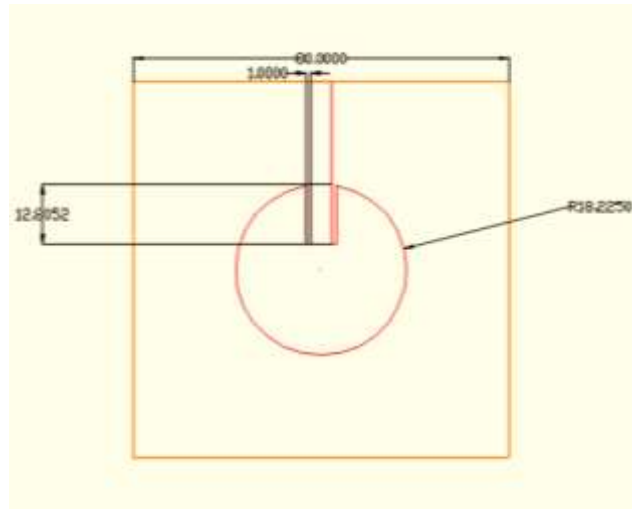
Para el proceso de fabricación se extrae el diseño obtenido desde Ansys HFSS, en un formato DXF, el archivo obtenido se puede leer en Autocad y se obtienen las dimensiones del parche, el grosor está determinado por el sustrato utilizado. El sustrato FR4 se encuentra cubierto de material conductor en ambas caras, la base es tierra por lo cual se queda intacta mientras que en la cara superior se realiza el grabado de la forma de la antenna, como se indica en la Figura 4.27, es el diseño de la antena patch rectangular extraída del proyecto de optimización de HFSS.



**Figura 4.27** Antena planar rectangular en CAD.  
**Fuente:** Autora

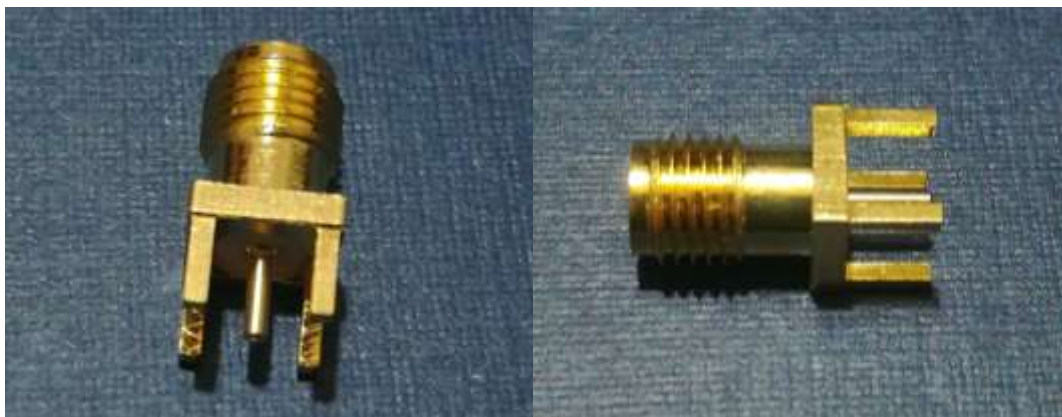
En la Figura 4.28 se muestra el diseño de la antena patch circular extraído del archivo de optimización de Ansys HFSS.





**Figura 4.28** Antena planar circular en CAD.  
Fuente: Autora

Una vez construidas las antenas, es necesario colocar un conector en la línea de alimentación de las antenas, los conectores utilizados son SMA o denominados sub miniatura versión A, son conectores coaxiales RF para cables con mecanismo de unión roscado, la resistividad que poseen es 50 ohmios y un rango de frecuencia de 0 a 17GHz, existen varios tipos de acuerdo a la forma de instalación: SMA tipo PCB para conexión vertical, SMA tipo PCB de ángulo recto y SMA de montaje en el borde, este último es el utilizado en este proyecto, el cual se monta en el borde lateral y el pin central se conecta a la línea de alimentación de la antena, en la Figura 4.29 se presenta la vista frontal y lateral del conector utilizado.



**Figura 4.29** Conector SMA utilizado.  
Fuente: Autora

#### 4.6. MEDICIÓN DE ANTENAS CONSTRUIDAS

El proceso de medición permite verificar los resultados obtenidos del proceso de diseño mediante los algoritmos de optimización. Se determina la frecuencia de resonancia de la antena y las pérdidas de retorno para lo cual, se realiza un barrido de frecuencias de las antenas, en donde se determina la potencia reflejada, el proceso que se utiliza para realizar el barrido de frecuencias utiliza la plataforma PXI, el cual posee el módulo Generador de Señales NI PXIE-5673 el cual emite una señal aleatoria con frecuencias desde los 85 MHz hasta los 6.6GHz. Se envía esta señal hacia la antena, mediante un elemento conocido como Directional Coupler o Acoplador direccional el cual es un elemento pasivo que recepta la potencia desde el generador de señales del PXI por un puerto, la transmite hacia la carga en el puerto dos, que en este caso es la antena y envía la potencia reflejada por el acoplamiento hacia un puerto tres, esta potencia reflejada se recibe mediante el módulo Analizador de Señales Vectoriales NIPXI 5663, el cual opera a frecuencias de 10MHz a 6.6GHz, este sistema se opera mediante Labview. El acoplador direccional utilizado tiene un rango de frecuencias de 0.3-8.0 GHZ.

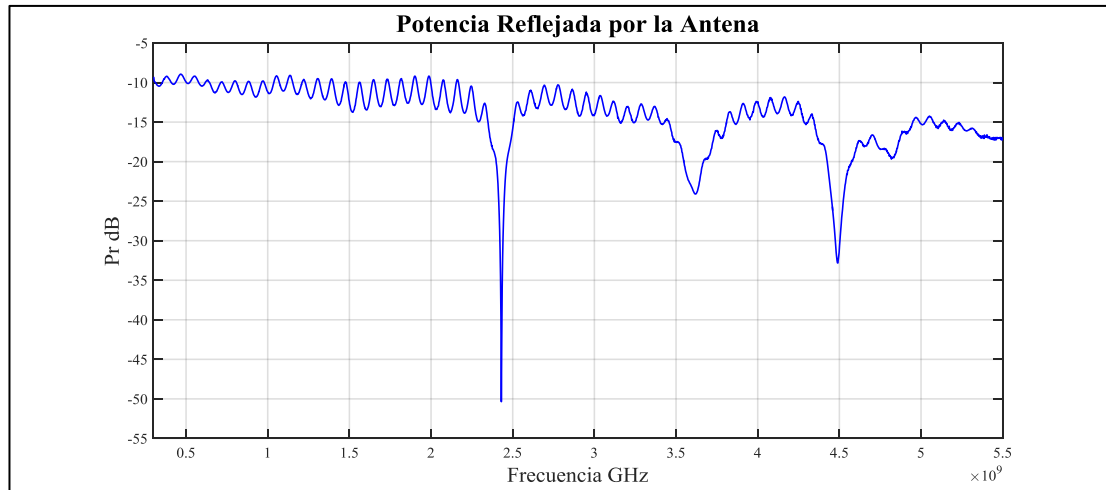
La primera antena realizada es la antena planar rectangular, la cual se ha fabricado en un sustrato FR4 y se ha incorporado el conector, se puede apreciar en la Figura 4.30.



**Figura 4.30** Antena planar rectangular construida.

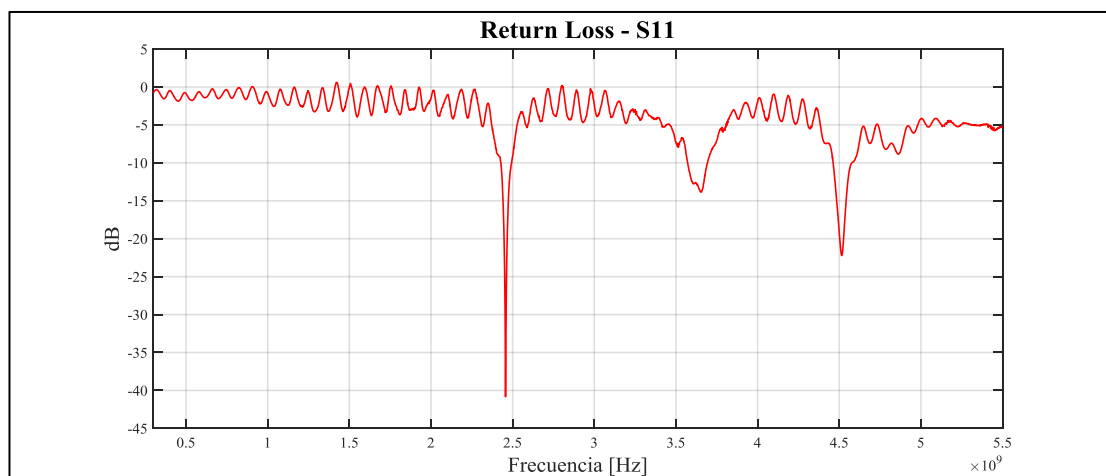
**Fuente:** Autora

Para la primera antena se realiza la medición de la potencia reflejada mediante el sistema descrito anteriormente, de acuerdo a los rangos de frecuencia que manejan los diferentes elementos utilizados se realiza la medición para un rango de 0.3-5.5GHz, se obtiene la respuesta indicada en la Figura 4.31, en la cual se observa que la antena refleja menos potencia en la frecuencia de 2.45GHz



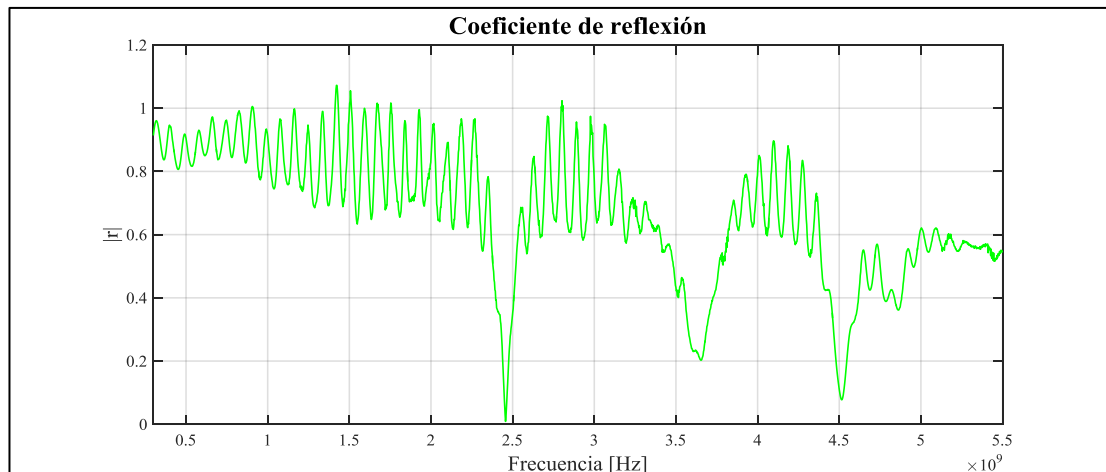
**Figura 4.31** Potencia reflejada por la antena.  
Fuente: Autora

Sin embargo, es necesario considerar las pérdidas en los cables utilizados para la medición, por lo cual se realizan las caracterizaciones de los cables, luego de esto es necesario realizar el proceso de normalización para obtener los valores reales de acoplamiento de la antena.



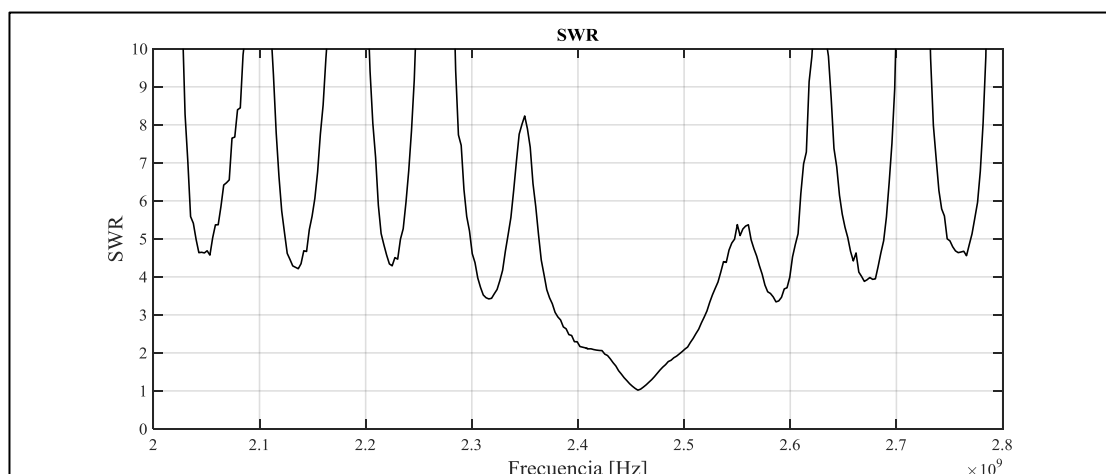
**Figura 4.32** Resultados de S11 para la antena planar rectangular.  
Fuente: Autora.

Las pérdidas de retorno de la antena se presentan en la Figura 4.32, en donde se puede determinar que la antena tiene un acoplamiento de -40.82 dB, en la frecuencia de 2.45GHz. En la Figura 4.33 se observa la gráfica del coeficiente de reflexión en función de la frecuencia, en donde el menor valor encontrado es de 0.009095 para la frecuencia de mencionada el cual bastante cercano a cero.



**Figura 4.33** Coeficiente de reflexión en función de la frecuencia.  
Fuente: Autora

Finalmente se obtiene la gráfica de SWR de la antena obteniendo un valor de 1.018 para la frecuencia de 2.45GHz, como se indica en la Figura 4.34.

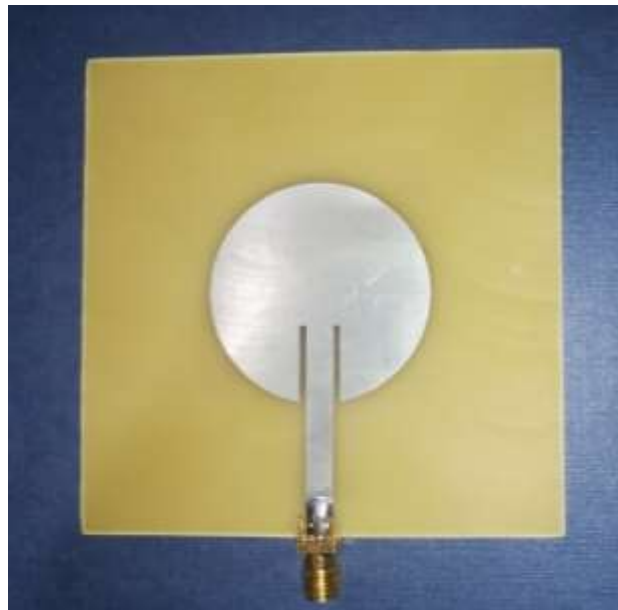


**Figura 4.34** SWR en función de la frecuencia.  
Fuente: Autora

Con estos resultados obtenidos de la medición de la antena planar rectangular es posible verificar que la antena tiene un muy buen acoplamiento para la frecuencia

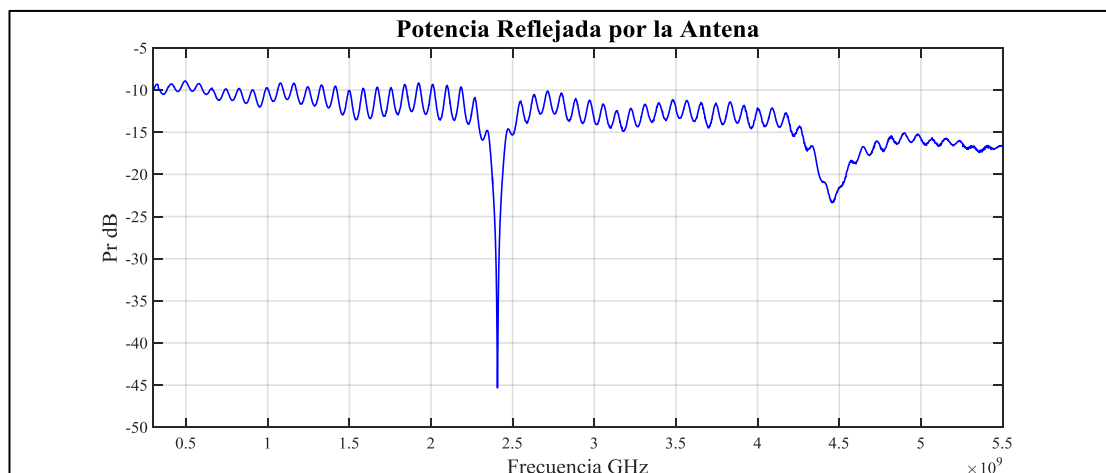
de 2.45GHz el cual corresponde con el objetivo del diseño mediante los algoritmos de optimización.

La segunda antena fabricada es la antena planar circular, la cual se construye de la misma forma que la anterior, la antena construida se puede apreciar en la Figura 4.35.



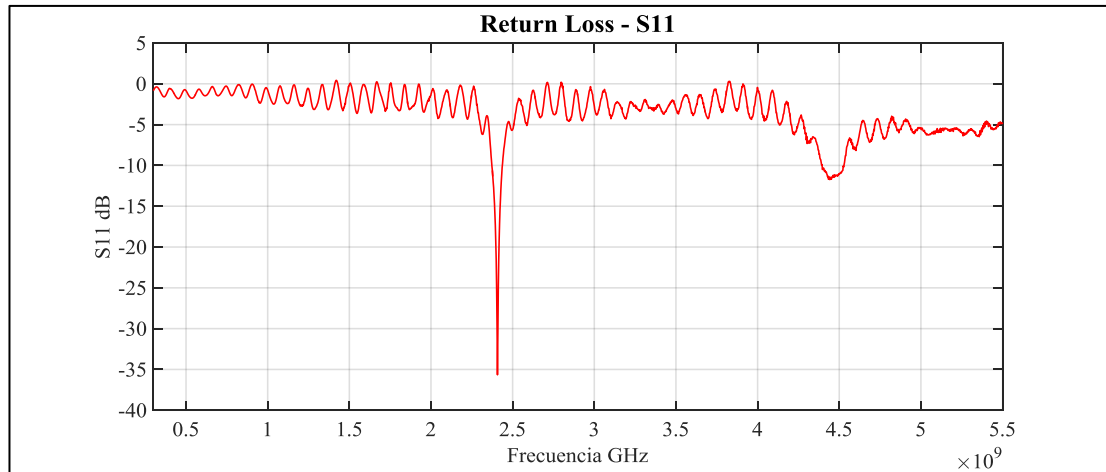
**Figura 4.35** Antena planar circular construida.  
**Fuente:** Autora.

El proceso de medición se realiza de la misma forma que para la antena planar rectangular, la potencia reflejada por la misma se aprecia en la Figura 4.36.



**Figura 4.36** Potencia reflejada por la antena circular.  
**Fuente:** Autora

Se puede observar que la antena irradia más potencia en la frecuencia de 2.407 GHz, y de la misma forma que para la rectangular se realiza el proceso de normalización para obtener las pérdidas de retorno reales de la antena, en la Figura 4.37 se muestra este resultado en el cual es preciso verificar que la antena tiene su frecuencia de resonancia en 2.407GHz con un valor de S11 de -35.66dB.



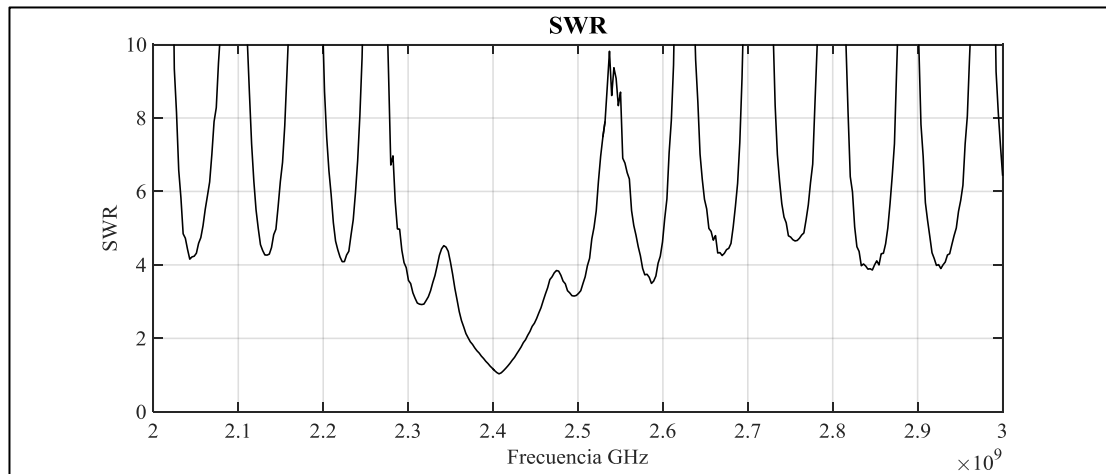
**Figura 4.37** Resultados de S11 para la antena planar circular.  
Fuente: Autora

En la Figura 4.38 se presenta el coeficiente de reflexión de la antena en función de la frecuencia el cual para la frecuencia de trabajo de la antena tiene un valor mínimo de 0.01649 dB, el cual es un muy buen resultado.



**Figura 4.38** Coeficiente de reflexión de la antena planar circular.  
Fuente: Autora

Finalmente se obtiene el SWR como otro parámetro de adaptación de la antena planar circular, en la se puede apreciar este resultado en función de la frecuencia y para la frecuencia de trabajo se tiene un valor de 1.034.



**Figura 4.39** SWR en función de la frecuencia de la antena planar circular.  
**Fuente:** Autora

Con los resultados se muestra el nivel de adaptación de la antena en la frecuencia deseada en el diseño mediante los algoritmos de optimización metaheurísticos.

#### 4.7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para iniciar un proceso de optimización es necesario definir las variables que intervienen en el proceso es decir las cuales se desean optimizar, luego establecer las características en el simulador, además es importante establecer los límites de búsqueda adecuados para cada variable y es importante que en todo el proceso se consideren las mismas unidades tanto en MATLAB como en el simulador Ansys HFSS, por lo cual en este caso se han utilizado milímetros.

Se ha definido una optimización de dos tipos de antenas planares, de forma rectangular y de forma circular con inserción para el acoplamiento, para todos los algoritmos se ha fijado una población de 10 individuos, además se ha determinado los parámetros fijos de las estructuras ya que corresponden a parámetros físicos propios como la altura del sustrato. El objetivo en todos los casos es obtener una antena que tenga los parámetros de frecuencia, S11 e impedancia establecidos e incluso encontrar mejores.

Es importante mencionar que en los procesos de optimización se configura el número de decimales en cuatro para cada variable, ya que para la construcción de las antenas no es posible realizar estructuras con gran cantidad de decimales como las que maneja MATLAB.

En cada ciclo de evaluación, es decir en cada iteración de los algoritmos se realizan 10 análisis en el simulador, por lo que para todo el proceso de optimización se realizan 300 llamadas a Ansys HFSS, al inicio el proceso de optimización y hasta un poco más de la mitad, en 200 simulaciones el proceso es rápido, mientras que para el final cuando todos los individuos se acercan al óptimo global, las simulaciones tardan más tiempo, sin embargo, para el algoritmo PSO y Firefly se tiene un promedio de tiempo de 10 horas, siendo el algoritmo dBA, el que ocupa el menor tiempo en un promedio de 9 horas.

Si bien es cierto que mediante el uso de una población mayor para los algoritmos de inteligencia de enjambre, se obtendría un mayor potencial de búsqueda y a su vez menos iteraciones, sin embargo, es la carga computacional en una sola iteración la que no permite aumentar demasiado la cantidad de individuos de la población, sin embargo, a pesar de esta declaración y al número de iteraciones



utilizado, es posible manifestar que todos los algoritmos proporcionan una solución óptima y eficaz, debido a muy buena selección de parámetros y configuración de los mismos.

Utilizando la función de optimización con el objetivo de perfeccionar la adaptación de una antena planar se obtienen los resultados de la Tabla 4.7, en donde se presentan el valor de costo y el número de iteraciones obtenidos en la solución óptima encontrada para cada algoritmo en el estudio de la antena planar rectangular, de acuerdo a estos resultados, el algoritmo Firefly es el que presenta una convergencia más rápida respecto a los demás, es el algoritmo que presenta el menor valor de iteraciones utilizadas para el proceso de optimización con nueve iteraciones en la frecuencia de 2.1GHz, por otra parte el algoritmo dBA no tiene las mismas características de convergencia que Firefly en este método ya que recorre un poco más el espacio de búsqueda, sin embargo ha logrado obtener el menor valor de costo de 0.1138 para la frecuencia de 2.4GHz.

**Tabla 4.7 Resultados de convergencia para la antena planar rectangular.**

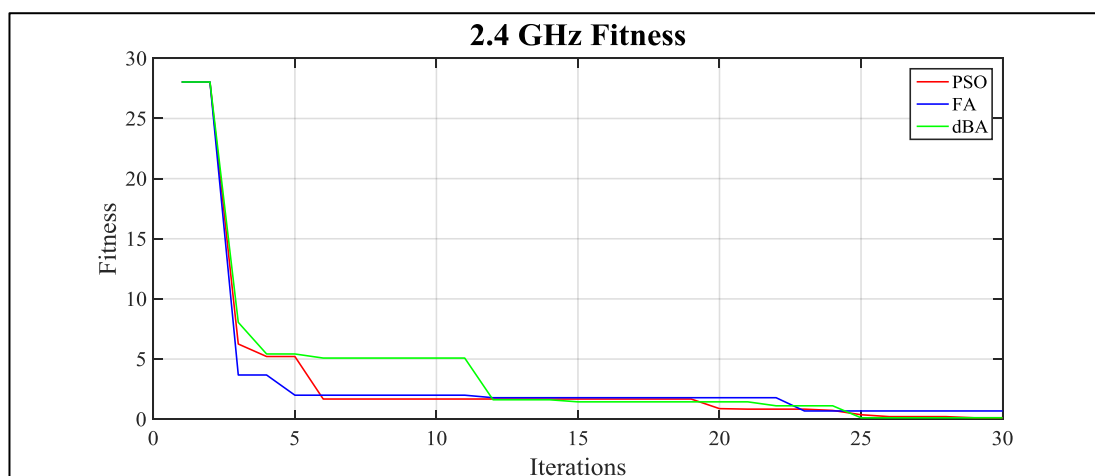
Frec.	PSO		FA		dBA	
	Iter.	Fitness	Iter.	Fitness	Iter.	Fitness
2.1 GHz	25	0.1381	9	0.1767	19	0.2175
2.4 GHz	29	0.1196	23	0.6842	25	0.1183
2.7 GHz	28	0.1687	27	0.9307	28	0.3222
3 GHz	21	0.1357	23	0.5671	25	0.1924

Para la antena circular los resultados se muestran en la Tabla 4.8, en donde es evidente que los valores de costo son similares a los de la antena rectangular, sin embargo las iteraciones utilizadas para la convergencia han incrementado llegando incluso a utilizar todas las 30 iteraciones, debido a las características de la estructura pero en cualquier caso tanto para la antena rectangular como para la circular, en todas las frecuencias utilizadas, se logra encontrar una estructura de muy buenas características, de la frecuencia especificada, en cuanto a S11 los resultados superan considerablemente al valor deseado, el valor de impedancia se utilizó como coadyuvante en el proceso de optimización de adaptación, presentando un rendimiento mucho mejor en comparación con los métodos convencionales.

**Tabla 4.8 Resultados de convergencia para la antena planar circular**

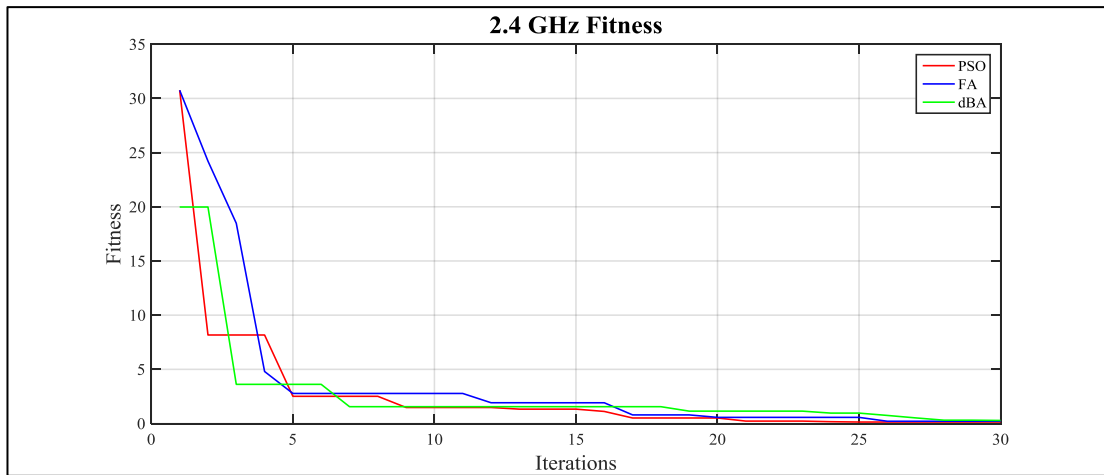
Frec.	PSO		FA		dBA	
	Iter.	Fitness	Iter.	Fitness	Iter.	Fitness
2.1 GHz	27	0.1392	27	0.1943	30	0.2723
2.4 GHz	25	0.1373	26	0.2096	30	0.2836
2.7 GHz	30	0.1964	27	0.2376	22	0.2123
3 GHz	30	0.1919	24	0.1338	27	0.3218

En la Figura 4.40 se muestra la gráfica de convergencia de los algoritmos PSO, FA y dBA, para la antena planar rectangular, en una frecuencia de 2.4GHz, en donde se observa el comportamiento de cada uno de los algoritmos en el proceso de optimización.



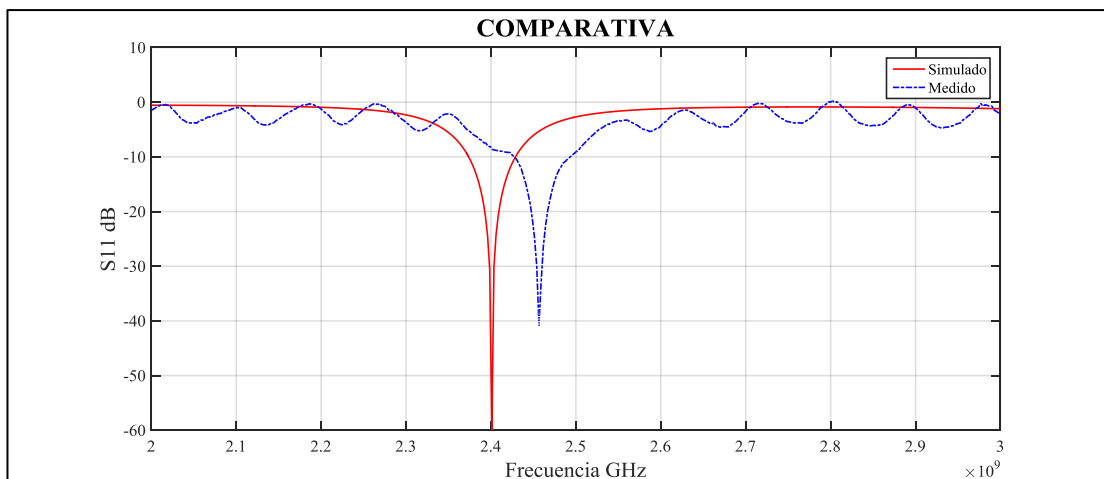
**Figura 4.40** Comparativa de convergencia de los algoritmos de optimización metaheurísticos.  
Fuente: Autora

Se realiza de la misma forma para la antena planar circular, en la Figura 4.41 se presenta La gráfica de convergencia de los algoritmos, realizando el análisis para la frecuencia de 2.4GHz en donde se observa el funcionamiento de los algoritmos, como se reduce la función de costo para cada algoritmo con el fin de encontrar el mejor global.



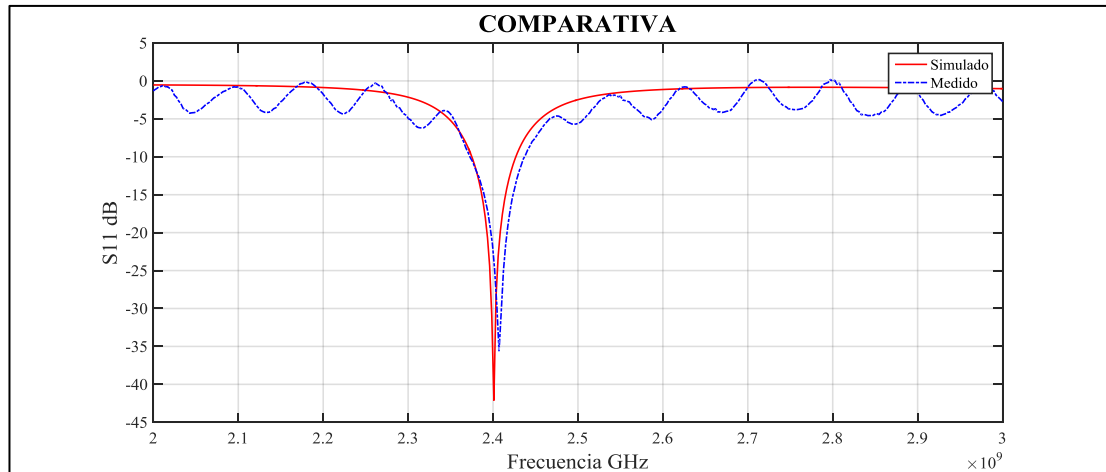
**Figura 4.41** Comparativa de convergencia para la antena planar circular  
**Fuente:** Autora

Para autentificar el proceso de diseño mediante los algoritmos de optimización metaheurísticos en combinación con el uso del software de simulación se han fabricado dos de las antenas obtenidas en el diseño para la frecuencia más representativa. En la Figura 4.42 se presenta las gráficas de simulación en comparación con la medición realizada para la antena rectangular en la frecuencia de 2.4GHz, la antena tiene un error relativo porcentual de 2.08% en frecuencia mientras que el valor de S11 no es el obtenido en simulación, pero presenta un muy buen nivel de adaptación, además la antena posee un ancho de banda de 65MHz.



**Figura 4.42** Comparativa de S11 para la antena planar rectangular.  
**Fuente:** Autora

En la Figura 4.43 se presenta la gráfica comparativa de medición y simulación para la antena planar circular, en pérdidas de retorno es muy similar al simulado presentando una muy buena respuesta de adaptación y en cuanto a frecuencia tiene un error de 0.29%, además la antena tiene un ancho de banda de 63MHz.



**Figura 4.43** Comparativa de  $S_{11}$  para la antena planar circular.  
**Fuente:** Autora

Los resultados de la medición indican que la antena patch circular tiene un mejor comportamiento, verificando el funcionamiento de los algoritmos de optimización.

# **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES**

**Y**

## **RECOMENDACIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES**

Debido al creciente uso de tecnologías de comunicación inalámbrica en el campo de las telecomunicaciones, la simulación de las antenas para estos sistemas es muy importante para obtener un funcionamiento específico, sumado a la necesidad de reducir los costos de implementación de prototipos, esto se puede conseguir mediante el uso de técnicas de optimización, rama bastante extensa y aplicable en diversos ámbitos de investigación. En este trabajo se presenta el uso de inteligencia de enjambre que pertenece a los algoritmos de optimización metaheurísticos, en un entorno de herramientas informáticas de cálculo y simulación como MATLAB y Ansys HFSS como proceso de evaluación de las soluciones candidatas, demostrando así los beneficios del uso de este tipo de técnicas de optimización para el diseño y desarrollo de antenas planares, las cuales han cobrado bastante importancia en la actualidad.

El objetivo fundamental de este trabajo comprende abordar el problema del diseño de antenas de tipo planar con una adaptación adecuada a una frecuencia deseada, mediante un procedimiento diferente, obteniendo una solución automatizada para el diseño de antenas. El aporte principal de este proyecto consiste en la implementación de tres algoritmos de optimización metaheurísticos en un sistema que permite realizar la evaluación de las soluciones mediante la simulación en software de elementos finitos, lo cual proporciona una solución mucho más

cercana a la realidad. Como se ha puesto en manifiesto en esta tesis mediante la utilización de este tipo de algoritmos que usan un enfoque de soluciones tentativas con un error determinado, no es necesario una información detallada del espacio de búsqueda sino el conocimiento de la función objetivo que relacione los parámetros a optimizar y el dominio de las variables del sistema, con estos factores es posible generar parámetros óptimos que cumplen con los objetivos de diseño establecidos. Las conclusiones derivadas del proyecto técnico con enfoque investigativo surgen a partir de las diferentes pruebas y mediciones realizadas y se exponen a continuación.

En esta tesis se demuestra que es posible obtener un mejor diseño de una antena de tipo planar mediante técnicas de optimización metaheurísticas específicamente de inteligencia de enjambre, debido a que las estructuras obtenidas de los procesos de optimización presentan un mejor comportamiento en cuanto a pérdidas de retorno y adaptación a la frecuencia, lo cual se hace evidente en las gráficas comparativas presentadas en el Capítulo 4, en donde se contrastan los resultados obtenidos mediante modelos teóricos convencionales con los resultados que surgen a partir de los algoritmos implementados, donde se puede evidenciar que los algoritmos superan cuantiosamente a estos modelos, en cuanto al parámetro S11. Es importante destacar el proceso de evaluación de las soluciones que se ha implementado en este proyecto, para obtener los datos para la función objetivo, se extraen de la simulación de las antenas mediante Ansys HFSS, software de elementos finitos, esto hace que los resultados obtenidos sean mucho más confiables, proporcionando un valor agregado muy importante, todo el proceso de evaluación dentro de la optimización se realiza de forma automática y se regula mediante MATLAB.

En general, los tres algoritmos implementados con esta técnica han obtenido resultados incluso mejores que los valores establecidos como deseados como se puede verificar para los resultados de S11 de las tablas y gráficas presentadas en el Capítulo 4. En donde el los valores de S11 van desde -30.76dB, para la antena planar circular a una frecuencia de 2.7GHz, siendo que el valor establecido como deseado para la optimización fue de -25dB.

El resultado de este trabajo es la optimización en el diseño de antenas planares para dos formas específicas como son la antena de tipo rectangular y la

antena de tipo circular, ambas con un sistema de inserción para la regulación de la impedancia. Para los dos tipos de antenas los algoritmos implementados fueron Particle Swarm Optimization (PSO), Firefly Algorithm (FA) y Directional Bat Algorithm (dBA), demostrando sus fortalezas en el proceso de optimización, las cuales fueron para PSO la facilidad de configuración de parámetros, para FA su rápida convergencia y dBA sus características de exploración y explotación del espacio de búsqueda.

El algoritmo FA fue el que utilizó el menor número de iteraciones en los procesos de optimización como se puede notar en la Tabla 4.7 y en la Tabla 4.8 llegando a emplear nueve iteraciones para la antena planar rectangular a una frecuencia de 2.1GHz, como valor mínimo obtenido.

El algoritmo dBA fue el que obtuvo la estructura con menor valor de costo en todos los procesos de optimización ejecutados, además de que en promedio utilizó el menor tiempo en todas sus ejecuciones, y de acuerdo a las gráficas de la Figura 4.16 y Figura 4.26 es posible identificar que el algoritmo dBA presenta mejores resultados en cuanto a pérdidas de retorno o S11 para el acoplamiento de la antena.

De acuerdo al tipo de aplicación necesaria se puede considerar el algoritmo a utilizar, el algoritmo Firefly puede utilizarse para aplicaciones con un rango específico y un margen de error definido, obteniendo buenos resultados para ejecuciones con un menor número de iteraciones ya que converge más rápido, por otra parte, si es necesario obtener la mejor solución posible para un problema se puede considerar al algoritmo dBA como el adecuado.

En cuanto a los resultados de las mediciones presentados en la Figura 4.42 para la antena planar rectangular y en la Figura 4.43 para la antena planar circular, se puede destacar que la segunda presenta un mejor comportamiento, es decir, los resultados de simulación y los resultados de medición presentan un mínimo error, entre sí. Además, haciendo énfasis en el valor establecido como deseado para S11 en la optimización, se puede notar que en la medición realizada las antenas poseen un valor de S11 de -40.82 dB para la antena rectangular y un valor de -35.66dB para la antena circular, los cuales son mejores que los valores deseados, con lo cual se puede ratificar que los algoritmos de optimización metaheurísticos de inteligencia de

enjambre en conjunto con la simulación para la evaluación son una herramienta potente y eficaz para el diseño.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Mediante el entorno de simulación MATLAB y Ansys HFSS es posible realizar la optimización no solo de antenas sino de otros elementos en electromagnetismo, por lo que es recomendable continuar la investigación sobre el comportamiento de otras estructuras de antenas en este entorno de optimización.

Es recomendable incorporar un sistema de optimización multiobjetivo, para la optimización de otros parámetros de las antenas, es decir, aplicar los algoritmos de optimización metaheurísticos ya sea los mencionados en este trabajo u otras técnicas, con el entorno de simulación.

En cuanto a las técnicas de optimización, también en este sentido existe una gran variedad de líneas futuras relacionadas con la evaluación de algoritmos mejorados que pueden desarrollarse, por lo que se recomienda continuar la investigación en técnicas de optimización bio-inspiradas.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. A. Hernandez Jaramillo, “Diseño, simulación y comparación de antenas microcintas a una frecuencia de 2.4 GHz.,” Máster tesis, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2015.
- [2] L. E. Chimborazo, “Diseño de una Antena Microstrip con Polarización Circular para el Laboratorio de Antenas,” Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Campus Sur, Quito, Ecuador, 2017.
- [3] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- [4] E. Torres, “Optimización y Diseño de Antenas de Parche,” Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2010.
- [5] S. Mishra, S. Chattopadyay, and M. Gangopadhyaya, “A comparative study of DE, PSO and BFO for optimisation of rectangular Microstrip patch antenna with inset feed parameter,” in *2015 International Conference and Workshop on Computing and Communication, IEMCON 2015*, 2015.
- [6] H. Alfonso, C. Salto, G. Minetti, N. Stark, C. Bermúdez, A. Orellana, P. Graglia, E. Proyecto, and D. I. Sistemas, “Algoritmos Metaheurísticos para Optimización y Aplicación a Problemas NP Completos,” p. 5.
- [7] F. L. Alejandro Arito, “Algoritmos de Optimización basados en Colonias de Hormigas aplicados al Problema de Asignación Cuadrática y otros problemas relacionados,” Trabajo de grado, Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina, 2010.

- [8] X. Yang, *Nature - Inspired Metaheuristic Algorithms*, 2nd. ed. Cambridge: Luniver Press, 2010.
- [9] *IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas*. IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993), 2014.
- [10] Á. Cardama, L. Roca, J. Rius, J. Robert, S. Blanch, and M. Bataller, *Antenas*, 2nd. ed. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 2002.
- [11] J. Ramírez, *Antenas: Conceptos Básicos Simplificados de Funcionamiento y Diseño*, 1a ed. Bogotá: Bonaventuriana, 2007.
- [12] L. V Blake and M. W. Long, *Antennas: Fundamentals, Design, Measurement*, 3rd. ed. Raleigh, NC: SciTech Publishing. INC., 2009.
- [13] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd. ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [14] D. Brande, “Diseño de nuevas antenas ultra wide band con filtros notch integrados,” Proyecto Fin de Carrera, Universidad Autónoma de Madrid, España, 2012.
- [15] M. Olmo and R. Nave, “Classification of Polarization,” *Department of Physics and Astronomy; Georgia State University*, 2012. [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/polclas.html>. [Accessed: 15-Apr-2018].
- [16] J. McLean, R. Sutton, R. Hoffman, and T. D. K. R. F. Solutions, “Interpreting Antenna Performance Parameters for EMC Applications Part 3 : Antenna Factor,” pp. 18–26, 1983.
- [17] “Antenas Dipolo para Radiofrecuencia - Radio Comunicaciones.” [Online]. Available: <http://www.radiocomunicaciones.net/19-antenas-dipolo>. [Accessed: 20-Apr-2018].
- [18] J. Corral, “Antenas de apertura. Bocinas. Reflectores.” 2012. [Online]. Available: <http://personales.upv.es/~jlcrral/antenes/tema7.htm>. [Accessed: 20-Apr-2018].
- [19] “E-field-distribution-for-rectangular-microstrip-patch-antenna-in-single-mode-TE-10-at.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/288303417/figure/fig3/AS:393466065506319@1470821028860/E-field-distribution-for-rectangular-microstrip-patch-antenna-in-single-mode-TE-10-at.png>. [Accessed: 20-Apr-2018].
- [20] “Via satélite Antenas Enlace Satelital Métodos de Acceso.” [Online].

- Available: <http://www.eveliux.com/mx/curso/antenas-enlace-satelital-mdos-de-acceso.html>. [Accessed: 20-Apr-2018].
- [21] M. Cardona, “La antena Yagi,” 2012. [Online]. Available: <https://www.neoteo.com/antena-yagi/>. [Accessed: 20-Apr-2018].
- [22] “The Very Large (and very cold) Array | thelawlers.com.” [Online]. Available: <http://thelawlers.com/Blognoscicator/?p=451>. [Accessed: 20-Apr-2018].
- [23] M. Á. Zarzosa Gómez, “Descripción De Comportamientos Animales Que Se Utilizan Para Algoritmos De Optimización E Inteligencia Artificial.,” Trabajo de Fin de Grado, Universidad de La Laguna, España, 2017.
- [24] X. Yang, *Nature-Inspired Algorithms and Applied Optimization*, vol. 744. London: Springer, Cham, 2018.
- [25] J. Rajpurohit, T. K. Sharma, A. Abraham, and Vaishali, “Glossary of Metaheuristic Algorithms,” *Int. J. Comput. Inf. Syst. Ind. Manag. Appl.*, vol. 9, pp. 181–205, 2017.
- [26] X. S. Yang, *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, 1nd ed. London: Elsevier Srl, 2014.
- [27] I. Fister Jr., X. S. Yang, I. Fister, J. Brest, and D. Fister, “A brief review of nature-inspired algorithms for optimization,” *Elektroteh. Vestnik/Electrotechnical Rev.*, vol. 80, no. 3, pp. 116–122, Jul. 2013.
- [28] O. A. Saraereh, A. A. Al Saraira, Q. H. Alsafasfeh, and A. Arfoa, “Bio-Inspired Algorithms Applied on Microstrip Patch Antennas: a Review,” *Int. J. Commun. Antenna Propag.*, vol. 6, no. 6, pp. 336–347, Dec. 2016.
- [29] D. Poveda, J. Dominguez, L. Guerrero, P. Chasi, J. Ordóñez, and P. Vintimilla, “Optimization Designs in Patch Antennas Using Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms : A Review,” *IEEE Bien. Congr. Argentina*, vol. In-process, 2018.
- [30] M. Olofsson, “Using Particle-Swarm Optimization for Antenna Design,” Master’s thesis, Lulea University of Technology, Suecia, 2006.
- [31] Y.-L. Li, W. Shao, L. You, and B.-Z. Wang, “An Improved PSO Algorithm and Its Application to UWB Antenna Design,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 12, no. 3, pp. 1236–1239, 2013.
- [32] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in *Proceedings of ICNN’95 - International Conference on Neural Networks*, 1995, vol. 4, pp. 1942–1948.

- [33] R. C. Eberhart and Y. Shi, "Particle swarm optimization: developments, applications and resources," in *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546)*, 2001, vol. 1, pp. 81–86.
- [34] "Signs of Winter 6: Birds of a Feather | Ecologist's Notebook." [Online]. Available: <http://sites.psu.edu/ecologistsnotebook/2015/01/09/signs-of-winter-6-birds-of-a-feather/>. [Accessed: 20-Jul-2018].
- [35] M. Juneja and S. K. Nagar, "Particle swarm optimization algorithm and its parameters: A review," in *International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)*, 2016.
- [36] Eberhart and Y. Shi, "Particle swarm optimization: developments, applications and resources," in *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546)*, 2001, vol. 1, pp. 81–86 vol. 1.
- [37] "Watch: Fireflies Glowing in Sync to Attract Mates." [Online]. Available: <https://video.nationalgeographic.com/video/news/160805-news-synchronized-fireflies-vin>. [Accessed: 22-Jul-2018].
- [38] "Magical Photographs of Fireflies from Japan's 2016 Summer | Spoon & Tamago." [Online]. Available: <http://www.spoon-tamago.com/2016/07/06/magical-photographs-of-fireflies-from-japans-2016-summer/>. [Accessed: 22-Jul-2018].
- [39] X. S. Yang and X. He, "Firefly algorithm: recent advances and applications," *Int. J. Swarm Intell.*, vol. 1, no. 1, p. 36, 2013.
- [40] D. Rendall, "Q&A: Cognitive ethology - inside the minds of other species," *BMC Biol.*, vol. 11, no. 1, p. 1, 2013.
- [41] A. Chakri, R. Khelif, M. Benouaret, and X. S. Yang, "New directional bat algorithm for continuous optimization problems," *Expert Syst. Appl.*, vol. 69, pp. 159–175, 2017.
- [42] ITU Radiocommunication Assembly, "Recommendation ITU-R V.431-8 Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications V Series," *Int. Telecommun. Union*, vol. (V Series), no. 431, 2015.
- [43] J. L. Masa Campos, "Antenas y Circuitos de Alta Frecuencia Segunda parte, Tema III." Dpto de Ingenieria Informática, 2008.
- [44] H. Errifi, A. Baghdad, A. Badri, and A. Sahel, "Genetic algorithm

- optimization and performance comparative analysis of rectangular, triangular and circular patch antennas for X band applications,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 443–452, 2015.
- [45] C. Warren, “An interactive introduction to MATLAB.” University of Edinburgh, p. 102, 2013.
- [46] MATLAB, “MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico - MATLAB & Simulink,” 2017. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. [Accessed: 05-Apr-2018].
- [47] A. Messac, *Optimization in Practice with MATLAB®: For Engineering Students and Professionals*, 1st. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [48] MATLAB, “MATLAB Documentation - MathWorks America Latina.” [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/matlab/index.html>. [Accessed: 05-Apr-2018].
- [49] “ANSYS HFSS - High Frequency Electromagnetic Field Simulation,” *Ansys.com*. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>. [Accessed: 06-Apr-2018].
- [50] ANSYS, “An Introduction to HFSS,” no. Release 18.2. ANSYS, Inc., Jul-2017.
- [51] ANSYS, “HFSS™: Scripting Guide,” no. Release 18.2. ANSYS, Inc., Jul-2017.
- [52] V. Ramasami, “HFSS-MATLAB-SCRIPTING API.” 2009.
- [53] “¿Qué es PXI? - National Instruments.” [Online]. Available: <http://www.ni.com/tutorial/4811/es/>. [Accessed: 10-Sep-2018].



## **APÉNDICES**

# APÉNDICE A: FLUJOGRAMA DE LA COMUNICACIÓN ENTRE MATLAB Y ANSYS HFSS

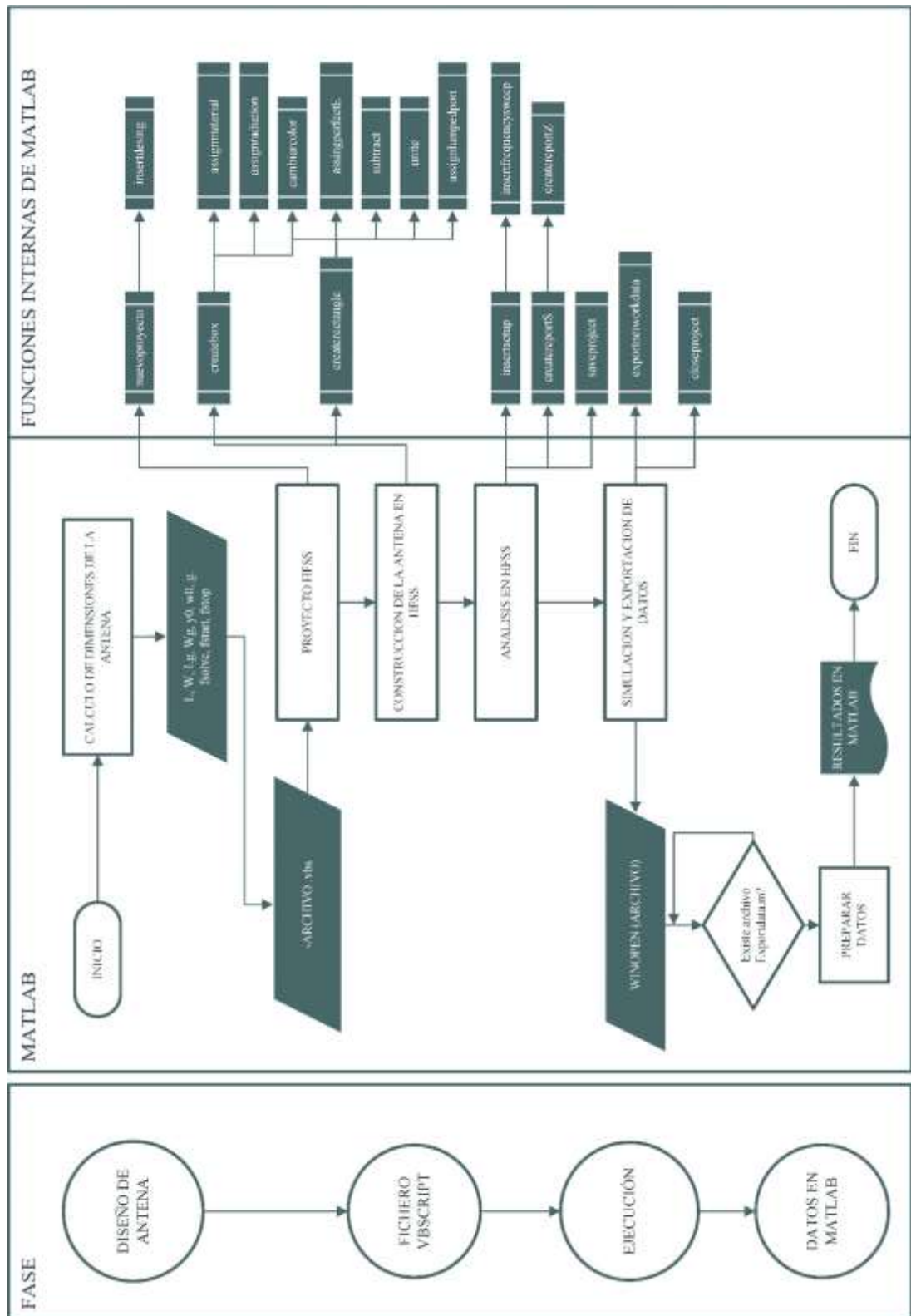


Figura A.1 Flujoograma de la comunicación MATLAB-Ansys HFSS.



## APÉNDICE B: DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE MEDIDA

En esta sección se presentan las herramientas utilizadas para la medición de las características de las antenas.

### PXI

PXI (PCI Extension for Instrumentation), o extensiones PCI para instrumentación consiste en una plataforma basada en PC de alto rendimiento para sistemas de medida y automatización. Utiliza el bus eléctrico de Interconexión de Componentes Periféricos (PCI), en combinación con el paquete modular Eurocard de CompactPCI, añade además buses de sincronización especializados y software dedicado. Sus características eléctricas, mecánicas y de software lo hacen especializado para aplicaciones de prueba y medida, adquisición de datos y manufactura. Fue desarrollado por National Instruments en 1997 y publicado en 1998 [53]. La arquitectura de hardware de los sistemas PXI se compone de tres elementos básicos que son:

- 1) Chasis
- 2) Controlador del sistema
- 3) Módulos periféricos

**Chasis:** Es la base del sistema PXI, posee fuentes de alimentación AC y DC, acondicionamiento de señales integrado. Permite múltiples configuraciones de sistemas PXI para cubrir muchas necesidades de aplicaciones. Contiene el plano trasero PXI de alto rendimiento, el cual incluye el bus PCI y buses de temporización y disparo, el chasis ofrece los buses de potencia, enfriamiento y comunicación de PCI y PCI Express para el controlador y los módulos. Los chasis PXI están disponibles en una variedad de configuraciones como poco ruido, alta temperatura y poca o gran cantidad de ranuras. En este caso se ha trabajado en el PXI existente en el laboratorio de Telecomunicaciones, NI PXIe-1075, que se muestra en la Figura B.2

**Controlador del sistema:** Todos los chasis PXI contienen una ranura del controlador del sistema en su extremo izquierdo (ranura 1). Las opciones de controlador incluyen controladores embebidos de alto rendimiento con un SO (Sistema Operativo) Microsoft Windows o un SO en tiempo real (NI LabVIEW

Real-Time), así como controladores remotos desde una PC de escritorio, estación de trabajo, servidor o PC portátil. El control de PXI mediante PC consiste en una tarjeta PCI o PCI Express en la PC y un módulo PXI o PXI Express en la ranura 1 del sistema, conectado con un enlace de cobre.

**Módulos periféricos:** Son sistemas embebidos que se adaptan a las ranuras del chasis. National Instruments tiene disponibles más de 200 módulos diferentes para instrumentación, adquisición de datos, conmutación, visión, sincronización avanzada, entre otros. Sin embargo, al poseer un estándar abierto hay disponibles más de 1,500 módulos por parte de más de 70 proveedores de módulos PXI.



**Figura B.2** NI PXIe-1075 Laboratorio de Telecomunicaciones UPS

## **DIRECTIONAL COUPLER**

Un acoplador direccional es una red de cuatro puertos en la que la señal de entrada se divide y parte de las ondas de transmitidas y reflejadas en una línea se acoplan por separado en dos de los puertos, se utilizan para mediciones, monitoreo de energía entre otras.

En su forma más común el acoplador direccional consta de dos líneas de transmisión y un mecanismo para acoplar las señales entre ellas. El dispositivo posee cuatro puertos denominados puerto de entrada, transmisión, acoplado y aislado. La

línea principal comunica a los puertos 1 y 2. En la Figura B.3, se puede observar el acoplador direccional utilizado en las mediciones de este proyecto.



**Figura B.3** *Directional Coupler Laboratorio de Telecomunicaciones UPS.*