

NOMBRE DEL TRABAJO

**Espinal\_2023\_Tesis\_UNTELS.pdf**

AUTOR

**Daniel Espinal**

RECUENTO DE PALABRAS

**37141 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**161718 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**133 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**8.3MB**

FECHA DE ENTREGA

**Feb 28, 2024 10:54 AM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Feb 28, 2024 10:56 AM GMT-5****● 10% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 10% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 7% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

**● Excluir del Reporte de Similitud**

- Fuentes excluidas manualmente
- Bloques de texto excluidos manualmente



UNIVERSIDAD NACIONAL  
TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

**FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA  
PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN  
EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTELS**  
(Art. 45° de la ley N° 30220 – Ley)

Autorización de la propiedad intelectual del autor para la publicación de tesis en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur (<https://repositorio.untels.edu.pe>), de conformidad con el Decreto Legislativo N° 822, sobre la Ley de los Derechos de Autor, Ley N° 30035 del Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, Art. 10° del Rgto. Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales en las universidades – RENATI Res. N° 084-2022-SUNEDU/CD, publicado en El Peruano el 16 de agosto de 2022; y la RCO N° 061-2023-UNTELS del 01 marzo 2023.

**TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

- 1). TESIS (X)      2). TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL ( )

**DATOS PERSONALES**

Apellidos y Nombres: <i>Espinal de la Cruz Daniel Abel?</i>
D.N.I.: <i>70848655</i>
Otro Documento:
Nacionalidad: <i>Peruano</i>
Teléfono: <i>991434615</i>
e-mail: <i>danesuber@gmail.com</i>

**DATOS ACADÉMICOS**

**Pregrado**

Facultad: <i>Facultad de ingeniería y gestión</i>
Programa Académico: <i>Tesis</i>
Título Profesional otorgado: <i>Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones</i>

**Postgrado**

Universidad de Procedencia:
País:
Grado Académico otorgado:

**Datos de trabajo de investigación**

Título: <i>ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN BIO-INSPIRADOS PARA EL DISEÑO DE ANTENAS PATCH EN SERIE</i>
Fecha de Sustentación: <i>13 de diciembre del 2023</i>
Calificación: <i>Aprobado con Distinción</i>
Año de Publicación: <i>2024</i>



### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN VERSIÓN ELECTRÓNICA

A través de la presente, autorizo la publicación del texto completo de la tesis, en el Repositorio Institucional de la UNTELS especificando los siguientes términos:

Marcar con una X su elección.

- 1) Usted otorga una licencia especial para publicación de obras en el REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR.

Si autorizo  No autorizo

- 2) Usted autoriza para que la obra sea puesta a disposición del público conservando los derechos de autor y para ello se elige el siguiente tipo de acceso.

Derechos de autor		
TIPO DE ACCESO	ATRIBUCIONES DE ACCESO	ELECCIÓN
ACCESO ABIERTO 12.1(*)	<b>info:eu-repo/semantics/openAccess</b> (Para documentos en acceso abierto)	(X)

- 3) Si usted dispone de una **PATENTE** puede elegir el tipo de **ACCESO RESTRINGIDO** como derecho de autor y en el marco de confiabilidad dispuesto por los numerales 5.2 y 6.7 de la directiva N° 004-2016-CONCYTEC DEGC que regula el Repositorio Nacional Digital de CONCYTEC (Se colgará únicamente datos del autor y el resumen del trabajo de investigación).

Derechos de autor		
TIPO DE ACCESO	ATRIBUCIONES DE ACCESO	ELECCIÓN
ACCESO RESTRINGIDO	<b>info:eu-repo/semantics/restrictedAccess</b> (Para documentos restringidos)	( )
	<b>info:eu-repo/semantics/embargoedAccess</b> (Para documentos con períodos de embargo. Se debe especificar las fechas de embargo)	( )
	<b>info:eu-repo/semantics/closedAccess</b> (para documentos confidenciales)	( )

(\*) <http://renati.sunedu.gob.pe>



UNIVERSIDAD NACIONAL  
TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

Rellene la siguiente información si su trabajo de investigación es de acceso restringido:

Atribuciones de acceso restringido:

---

---

Motivos de la elección del acceso restringido:

---

---

---

---

---

*Espinal de la Cruz, Daniel Abel*

APELLIDOS Y NOMBRES

*70848655*

DNI

*D. Espinal*

Firma y huella:



Lima, 19 de enero del 20 24

**UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y**  
**TELECOMUNICACIONES**



**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN  
BIO-INSPIRADOS PARA EL DISEÑO DE ANTENAS PATCH EN SERIE”**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de

**INGENIERO ELECTRÓNICO Y TELECOMUNICACIONES**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER**

ESPINAL DE LA CRUZ, DANIEL ABEL  
ORCID: 0009-0007-1061-2309

**ASESOR**

CLEMENTE ARENAS, MARK DONNY  
ORCID: 0000-0002-2806-1513

**Villa El Salvador**  
**2023**



**DECANATO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO Y TELECOMUNICACIONES**

En Villa El Salvador, siendo las 10:00 horas del día 13 de diciembre del 2023, en la Facultad de Ingeniería y Gestión, los miembros del Jurado Evaluador, integrado por:

**PRESIDENTE:** Dr. CARLOS ANDRES MUGRUZA VASSALLO DNI N° 15759394 C.I.P. N° 102334  
**SECRETARIO:** Dr. JINMI GREGORY LEZAMA CALVO DNI N° 42294872 C.I.P. N° 97712  
**VOCAL :** Mg. PABLO ANDRES VILLEGAS CHUNGA DNI N° 09694556 C.I.P. N° 199274  
**ASESOR :** Dr.. MARK DONNY CLEMENTE ARENAS DNI N° 41962207 C.I.P. N° 181400

Designados mediante Resolución de Facultad de Ingeniería y Gestión N° 635-2023-UNTELS-R-D de fecha 02 de octubre del 2023 quienes dan inicio a la Sesión Pública de Sustentación y Evaluación de Tesis.

Acto seguido, el (la) aspirante al : Grado de Bachiller  Título Profesional

Don: DANIEL ABEL ESPINAL DE LA CRUZ identificado(a) con D.N.I. N° 70848655 procedió a la Sustentación de:

Trabajo de investigación  Tesis  Trabajo de suficiencia  Artículo científico

Titulado: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN BIO-INSPIRADOS PARA EL DISEÑO DE ANTENAS PATCH EN SERIE".

Aprobado mediante Resolución de Facultad de Ingeniería y Gestión N° 298-2022-UNTELS-CO-V.ACAD-FIG de fecha 30 de junio de 2022, de conformidad con las disposiciones del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales vigentes, sustentó y absolvió las interrogantes que le formularon los señores miembros del Jurado Evaluador.

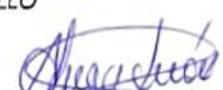
Concluida la Sustentación se procedió a la evaluación y calificación correspondiente, resultando el aspirante **APROBADO** por... DISTINCIÓN ..... con la nota de: DIECISEIS (letras) 16 ..... (números), de acuerdo al Art. 65° del Reglamento General para optar el Título Profesional.

CALIFICACIÓN		CONDICIÓN	EQUIVALENCIA
NÚMERO	LETRAS		
16	DIECISEIS	APROBADO CON DISTINCIÓN	MUY BUENO

Siendo las 11:00 horas del día 13 de diciembre del 2023, se dio por concluido el acto de sustentación, firmando el jurado evaluador el Acta de Sustentación, que obra en el Decanato de la Facultad de Ingeniería y Gestión.

  
 Dr. JINMI GREGORY LEZAMA CALVO  
 SECRETARIO  
 C.I.P. N° 97712

  
 Dr. CARLOS ANDRES MUGRUZA VASSALLO  
 PRESIDENTE  
 C.I.P. N° 102334

  
 Mg. PABLO ANDRES VILLEGAS CHUNGA  
 VOCAL  
 C.I.P. N° 199274

  
 DANIEL ABEL ESPINAL DE LA CRUZ  
 BACHILLER

## **DEDICATORIA**

A mis familiares, por el apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a los maestros de la carrera profesional Ingeniería electrónica y telecomunicaciones por su dedicación, esfuerzo y tiempo dedicados a nuestro desarrollo profesional y lograr de nosotros personas útiles para la sociedad.

## RESUMEN

La tesis presentada en este trabajo se titula "Análisis Comparativo de Algoritmos de Optimización Bio-inspirados para el Diseño de Antenas de Parche en Serie". El objetivo de este trabajo fue implementar tres algoritmos de optimización para evaluar cuál es el más adecuado para un problema de optimización que consiste en una antena de parche en serie de 8 elementos. Los algoritmos implementados fueron: el Algoritmo de Murciélago (BA), el Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) y el Algoritmo Genético (GA).

Para validar el proceso de optimización, se estableció una función de aptitud que incluye siete parámetros geométricos de la antena. Además, se consideraron dos casos en la función de aptitud; en el primer caso, se dio prioridad al ancho de banda (BW) y, en el otro, la prioridad fue la ganancia (G). El software Matlab se utilizó para la implementación de los algoritmos con la antena. Los parámetros de la antena se extrajeron de un simulador electromagnético estándar.

Para realizar el análisis comparativo de los algoritmos, se realizaron veinte intentos para cada algoritmo con treinta iteraciones en cada intento para los dos casos de prioridad de la función objetivo. Una vez obtenidos los resultados, se analizaron los intentos que lograron el objetivo en los tres algoritmos. También se compararon los valores de cada parámetro de la mejor antena obtenida de cada algoritmo de optimización. De esta manera, se logró el objetivo propuesto de esta tesis, ya que se implementaron los tres algoritmos de optimización y se analizaron los parámetros de una antena. Además, se identificó el algoritmo BA ser el más adecuado para la optimización de una antena parche en serie de 8 elementos en los dos casos establecidos en una función objetivo que comprende siete parámetros de antena.

Palabras clave: algoritmo de optimización, antena, función objetivo.

## ABSTRACT

The thesis presented in this work is titled "Comparative Analysis of Bio-Inspired Optimization Algorithms for the Design of Series Patch Antennas." The objective of this work was to implement three optimization algorithms to evaluate which one is most suitable for an optimization problem involving an 8-element series patch antenna. The implemented algorithms were the Bat Algorithm (BA), the Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO), and the Genetic Algorithm (GA).

To validate the optimization process, a fitness function was established that includes seven geometric parameters of the antenna. Additionally, two cases were considered in the fitness function; in the first case, bandwidth (BW) was prioritized, and in the other, gain (G) was the priority. Matlab software was used for the implementation of the algorithms with the antenna. The antenna parameters were extracted from a standard electromagnetic simulator.

To perform the comparative analysis of the algorithms, twenty attempts were made for each algorithm with thirty iterations in each attempt for the two priority cases of the objective function. Once the results were obtained, the attempts that achieved the objective in all three algorithms were analyzed. The values of each parameter of the best antenna obtained from each optimization algorithm were also compared. This way, the proposed objective of this thesis was achieved since the three optimization algorithms were implemented, and the antenna parameters were analyzed. Furthermore, the BA algorithm was identified as the most suitable for optimizing an 8-element series patch antenna in the two cases established in an objective function comprising seven antenna parameters.

Keywords: optimization algorithm, antenna, objective function.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>V</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>2</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Estado del arte . . . . .	2
1.3. Descripción del problema . . . . .	3
1.4. Formulación del Problema . . . . .	4
1.4.1. Problema General . . . . .	4
1.4.2. Problemas específicos . . . . .	5
1.5. Objetivos . . . . .	5
1.5.1. Objetivo General . . . . .	5
1.5.2. Objetivos específicos . . . . .	5
1.6. Justificación . . . . .	6
<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO</b>	<b>8</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	8
2.2. Bases teóricas . . . . .	9
2.2.1. Parámetros Fundamentales de antena . . . . .	9
2.2.2. Tipos de antenas . . . . .	14
2.2.3. Arreglos de antenas . . . . .	15
2.2.4. Algoritmos de optimización . . . . .	17
2.2.5. Algoritmos utilizados en antenas . . . . .	19
2.2.6. Algoritmo murciélago . . . . .	21
2.2.7. Algoritmo genético . . . . .	23
2.2.8. Algoritmo de optimización del enjambre de partículas . . . . .	27

<b>CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>29</b>
3.1. Línea de investigación . . . . .	29
3.2. Descripción de la metodología . . . . .	29
3.2.1. Función Objetivo . . . . .	30
3.2.2. Descripción de la antena de referencia . . . . .	32
3.2.3. Implementación y prueba del algoritmo BA en diseño de antena . . . . .	46
3.2.4. Implementación y prueba del algoritmo PSO . . . . .	56
3.2.5. Implementación del algoritmo GA . . . . .	66
3.2.6. Análisis comparativo de los 3 algoritmos para el diseño de antenas . . . . .	75
<b>CAPITULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>96</b>
<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES</b>	<b>98</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>99</b>
<b>PRESPECTIVA</b>	<b>100</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>102</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>109</b>

## LISTADO DE FIGURAS

1.1. Evolución exportaciones Perú . . . . .	6
2.1. Patrón de radiación 3D . . . . .	11
2.2. Ancho de Banda BW . . . . .	11
2.3. Polarización . . . . .	12
2.4. Ancho de haz de media potencia . . . . .	13
2.5. Diagrama polar de phi . . . . .	13
2.6. Antena dipolo y monopolo . . . . .	14
2.7. Antena reflectora . . . . .	15
2.8. Antena microstrip . . . . .	16
2.9. Arreglo de antenas . . . . .	16
2.10. Beamforming . . . . .	17
2.11. Ecolocalización de los murciélagos . . . . .	21
2.12. Partes del individuo . . . . .	23
2.13. Representación Binaria . . . . .	24
2.14. Representación Entera . . . . .	24
2.15. Representación Real . . . . .	24
2.16. Selección de individuos . . . . .	25
2.17. Mutación de un bit . . . . .	25
2.18. Cruce de un punto . . . . .	26
2.19. Cruce de dos puntos . . . . .	26
2.20. Movimiento de las partículas . . . . .	27
3.1. Etapas de investigación . . . . .	30
3.2. Antena parche serial de 8 elementos . . . . .	32
3.3. Antena 8-PSA . . . . .	33
3.4. Muesca en la 8 placa . . . . .	34
3.5. Proceso del algoritmo . . . . .	36
3.6. Selección de la región para el BW . . . . .	40
3.7. Error en la selección de regiones de BW . . . . .	41
3.8. Análisis de inflexiones . . . . .	41

3.9. Selección de región y de inflexiones . . . . .	42
3.10. Ganancia máxima . . . . .	43
3.11. Parámetro $\delta\overline{G}_{\theta=1}$ . . . . .	44
3.12. Ángulo de ganancia máxima . . . . .	44
3.13. Ancho de Haz . . . . .	45
3.14. Radio vector . . . . .	48
3.15. Método de la ruleta . . . . .	67
3.16. Intentos del algoritmo BA con prioridad BW . . . . .	76
3.17. Intentos del algoritmo PSO con prioridad BW . . . . .	76
3.18. Intentos del algoritmo GA con prioridad BW . . . . .	77
3.19. Comparación de BW con prioridad BW . . . . .	79
3.20. Patrón de radiación 3D con prioridad BW . . . . .	80
3.21. Patrón de radiación 2D del parámetro $\delta\overline{G}_{\theta=1}$ con prioridad BW . . . . .	81
3.22. Plano cartesiano de la ganancia con $\Phi=90^\circ$ - Prioridad BW . . . . .	83
3.23. Plano cartesiano de la ganancia con $\Phi=0^\circ$ - Prioridad BW . . . . .	84
3.24. Intentos del algoritmo BA con prioridad G . . . . .	85
3.25. Intentos del algoritmo PSO con prioridad G . . . . .	86
3.26. Intentos del algoritmo GA con prioridad G . . . . .	87
3.27. Comparación de BW con prioridad G . . . . .	88
3.28. Patrón de radiación 3D con prioridad G . . . . .	89
3.29. Patrón de radiación 2D del parámetro $\delta\overline{G}_{\theta=1}$ con prioridad G . . . . .	90
3.30. Plano cartesiano de la ganancia con $\Phi=90^\circ$ - Prioridad G . . . . .	92
3.31. Plano cartesiano de la ganancia con $\Phi=0^\circ$ - Prioridad G . . . . .	93

## LISTADO DE TABLAS

3.1. Dimensiones de la antena . . . . .	35
3.2. Pseudo código del análisis de los parámetros . . . . .	37
3.3. Dimensiones iniciales de las antenas . . . . .	38
3.4. Parámetros iniciales de las antenas . . . . .	39
3.5. Parámetros del BA para la optimización . . . . .	46
3.6. Pseudo código del algoritmo murciélago (BA) . . . . .	47
3.7. Intervalos de cumplimiento BA de función objetivo con prioridad BW . . . . .	49
3.8. Dimensiones óptimas de las antenas BA-BW . . . . .	50
3.9. Parámetros óptimos de las antenas BA-BW . . . . .	51
3.10. Intervalos de cumplimiento BA de función objetivo con prioridad G . . . . .	52
3.11. Dimensiones óptimas de las antenas BA-G . . . . .	54
3.12. Parámetros óptimos de las antenas BA-G . . . . .	55
3.13. Parámetros del PSO para la optimización . . . . .	57
3.14. Pseudo código del algoritmo PSO . . . . .	58
3.15. Intervalos de cumplimiento PSO de función objetivo con prioridad BW . . . . .	59
3.16. Dimensiones óptimas de las antenas PSO-BW . . . . .	60
3.17. Parámetros óptimos de las antenas PSO-BW . . . . .	61
3.18. Intervalos de cumplimiento PSO de función objetivo con prioridad G . . . . .	62
3.19. Dimensiones óptimas de las antenas PSO-G . . . . .	64
3.20. Parámetros óptimos de las antenas PSO-G . . . . .	65
3.21. Parámetros del GA para la optimización . . . . .	66
3.22. Pseudo código del algoritmo Genético . . . . .	68
3.23. Intervalos de cumplimiento GA de función objetivo con prioridad BW . . . . .	69
3.24. Dimensiones óptimas de las antenas GA-BW . . . . .	70
3.25. Parámetros óptimos de las antenas GA-BW . . . . .	71
3.26. Intervalos de cumplimiento GA de función objetivo con prioridad G . . . . .	72
3.27. Dimensiones óptimas de las antenas GA-G . . . . .	73
3.28. Parámetros óptimos de las antenas GA-G . . . . .	74
3.29. Porcentaje por iteraciones con prioridad BW . . . . .	75

3.30. Porcentaje de intervalo de función objetivo con prioridad BW . . . . .	78
3.31. Porcentaje por iteraciones con prioridad G . . . . .	86
3.32. Porcentaje de intervalo de función objetivo con prioridad G . . . . .	87
3.33. Resumen de mejores resultados por algoritmo y por prioridad . . . . .	95
3.34. Comparación de la antena parche serial . . . . .	97
6.1. Parámetros óptimos BA Prioridad BW . . . . .	109
6.2. Dimensiones óptimas BA con prioridad BW . . . . .	110
6.3. Parámetros óptimos BA Prioridad Ganancia . . . . .	111
6.4. Dimensiones óptimas BA con prioridad Ganancia . . . . .	112
6.5. Parámetros óptimos PSO Prioridad BW . . . . .	113
6.6. Dimensiones óptimas PSO con prioridad BW . . . . .	114
6.7. Parámetros óptimos PSO Prioridad Ganancia . . . . .	115
6.8. Dimensiones óptimas PSO con prioridad Ganancia . . . . .	116
6.9. Parámetros óptimos GA Prioridad BW . . . . .	117
6.10. Dimensiones óptimas GA con prioridad BW . . . . .	118
6.11. Parámetros óptimos GA Prioridad Ganancia . . . . .	119
6.12. Dimensiones óptimas GA con prioridad Ganancia . . . . .	120
6.13. Matriz de consistencia . . . . .	121

## INTRODUCCIÓN

El diseño de antenas es un problema complejo de múltiples variables que envuelve la interacción de onda-materia a múltiples rangos de frecuencia como las bandas milimétricas, multibandas y así como su relación con diseños circuitales restringido debido al perfil del dispositivo. Esta complejidad implica problemas para el ingeniero diseñador que puede solucionar aplicando métodos de optimización que permitan automatizar algunos procesos repetitivos. En el diseño geométrico de una antena se utilizan estrategias analíticas con diferentes herramientas para el diseño de estructuras y la determinación de los parámetros geométricos de antena. Por este motivo, los métodos de optimización son usados cada vez más para estimar con las dimensiones geométricas y de los materiales para que brinden un rendimiento requerido.

Los algoritmos de optimización son iterativos, cuyo objetivo es resolver un problema de múltiples variable, como el diseño de antenas. La solución en cada iteración se valida o no, si una función objetivo se aproxima a un valor requerido. Esta función objetivo contiene un conjunto de parámetros y variables determinado por el ingeniero diseñador. Los parámetros optimizables utilizan variables con valores binarios o decimal que se reemplazan en la función objetivo, cuyos valores bajos obtenidos representan diseños más deseables que los de valores más altos.

La evaluación de la función objetivo incluye software de cálculo y de simulación para evaluar las variables de entrada asociados a parámetros. El software de simulación devuelve parámetros de salida que pasan por la función objetivo obteniendo varios valores, escogiendo el objetivo más óptimo en cada iteración. Las simulaciones son procesos que consume mucho tiempo, es muy deseable utilizar un algoritmo de optimización que requiera el menor número de iteración para alcanzar el objetivo deseado de la función objetivo.

Existen muchos tipos de algoritmo de optimización que evalúan la distancia del valor hacia el objetivo, otros evalúan la distancia del objetivo con el patrón de sus valores, algunas suelen ser más adecuadas para ciertas clases de diseños de antenas que otras. En este trabajo utilizará algoritmos bio-inspirados que evalúa la distancia del valor hacia el objetivo. Se analizará una visión general de cada algoritmo, se comparará con varias funciones objetivo y diferentes poblaciones para obtener menor tiempo de simulación para alcanzar el objetivo.

## **CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Motivación**

El presente proyecto de tesis se realiza con la motivación de implementar herramientas computacionales que permitan acelerar el proceso de diseño y desarrollo de dispositivos, circuitos y sistemas electrónicos de alta frecuencia (27.5 GHz hasta 28.25 GHz). Los algoritmos de optimización son herramientas de inteligencia artificial que encuentran aplicaciones en muchas áreas de la ingeniería, y la electrónica no es la excepción. El diseño de antenas es un problema complejo de múltiples variables, donde los parámetros circuitales de las antenas juegan un papel importantísimo en las propiedades de radiación, y la situación es similar en el sentido inverso. Es necesario por lo tanto esclarecer los métodos mas apropiados para problemas específicos de antenas. En el presente caso se aborda el problema donde hay múltiples elementos de antena parche en un mismo sustrato. Esto con el fin de establecer el método mas eficiente para el desarrollo de la tecnología de direccionamiento de haz o beamforming. Es así, que el presente trabajo de tesis plantea encontrar el mejor método entre 3 de los métodos mas utilizados y recientes; algoritmo genético GA, enjambre de partículas PSO, y de murciélago BA.

### **1.2. Estado del arte**

Dentro del estado del arte en la temática de diseño de antenas y el uso de métodos de optimización para disminuir o automatizar el proceso de diseño, se han encontrado una serie de artículos y tesis.

En el artículo de Kumar (A. S. Kumar, 2017) titulado: "Rectangular Micro Strip Antenna Design Using Particle Swarm Optimization, Neural Networks and Genetic Algorithms". En este artículo se presentan ecuaciones complejas en la función objetivo para direccionar los haces y minimizar el nivel de los lóbulos laterales. Así mismo, se presenta una comparación entre los algoritmos Genético, PSO y Red Neuronal en un arreglo de antenas de 10 parches. El algoritmo PSO permite sintetizar los patrones de radiación requeridos por los autores en un menor tiempo de simulación, en comparación con los dos otros algoritmos. La com-

paración es interesante porque el algoritmo PSO y Genético requiere de 200 y 360 ciclos respectivamente mientras que la Red Neuronal requiere de 410. Es necesario mencionar que los dos mejores algoritmos de dicho trabajo se utilizaran en la presente tesis. A diferencia de dicho trabajo, en el presente trabajo de investigación se desea establecer que algoritmo es mejor en la optimización de los parámetros de una antena patch serial. Además, se utilizaran función de objetivos mas sencillas en comparación a las funciones complejas presentadas en el trabajo citado.

### **1.3. Descripción del problema**

En la actualidad numerosas tecnologías vienen usando el direccionamiento de haz o beamforming (Presnell, 1974), para la mejora de las figuras de merito o rendimiento. Podemos mencionar a los sistemas de radar (Deng y Himed, 2009) y a los sistemas de comunicaciones satelitales (Miura, Tanaka, Chiba, Horie, y Karasawa, 1997), como algunos de los que ya la usan. Entre los que se espera que adopten al beamforming se encuentran los sistemas de posicionamiento de precisión (Carsenat y Decroze, 2012), comunicaciones móviles de quinta generación (Yoshida y cols., 2013), etc. El beamforming consiste en utilizar sistemas mecánicos/electrónicos necesarios para direccionar el patrón de radiación de una antena de manera dinámica. En su versión mas reciente se usa el control electrónico, para manipular la alimentación de elementos de antena individuales dentro de un arreglo de antenas. El desarrollo de estos arreglos de antenas implica etapas de diseño, fabricación, optimización y validación de los prototipos. El diseño y la optimización se realizan con la ayuda de herramientas computacionales, que por lo general tienen recursos limitados en nuestro país.

Los procesos de optimización se hacen aun mas complejos a medida que la antena presenta geometrías, métodos de alimentación o técnicas sofisticadas de mejora de rendimiento. Para el beamforming se utilizan arreglos de antenas por lo general planares como las Microstrip. Con el fin de mejorar los parámetros de antena dentro de los rangos de operación de los sistemas inalámbricos y compensar el aumento de las perdidas de trayecto, se diseñan e utilizan los llamados arreglos de antenas. Los cuales necesitan ser diseñados matemáticamente para obtener parámetros de antena requeridos por los sistemas mencionado. Es así, que se han implementado distintos métodos para disminuir el tiempo de diseño y mejorar los parámetros

de antena.

Existen en la literatura implementaciones de algoritmos de optimización bioinspirados como el algoritmo Bat (Shao, Qiu, y Zhang, 2020), PSO (Bansal, Sethi, y Sharma, 2018), Genético (Pumallica-Paro, Arizaca-Cusicuna, y Clemente-Arenas, 2019), (X. Liang y cols., 2020), etc. A pesar de que dichos métodos pueden obtener resultados de manera eficiente, muchos de ellos presentan problemas como la gran cantidad de iteraciones, consumo de recursos computacionales, etc. Estos problemas no hacen posible una comparación eficaz, ya que los casos de aplicación son distintos. En el trabajo de (Pan y Zhang, 2019) se presenta una comparación entre el algoritmo BA y GA para minimizar los lóbulos laterales. En dicha publicación, requiere como mínimo 100 iteraciones para lograr su objetivo. También, en la publicación de (Van Luyen y Vu Bang Giang, 2017), busca suprimir la interferencia del ancho de haz.

Realizando una comparación con el algoritmo BA, PSO y GA. En dicho trabajo requieren de 50 iteraciones para acercarse a su objetivo. Sin embargo, no se ha podido encontrar soluciones de optimización hechas a medida para el diseño arreglo de antena parche serial y mucho menos análisis comparativos que permitan establecer el método más eficaz. El diseño y optimización de antenas requieren del uso de paquetes de softwares de simulación de electromagnética. Estos se basan en la resolución de las ecuaciones de Maxwell, usando diferentes métodos computacionales, para el cálculo de los campos radiados en un espacio tridimensional. Es así que se pueden simular prototipos de antenas. Es más se puede controlar el flujo de diseño y sobretodo el de optimización usando los algoritmos bioinspirados como el algoritmo murciélago, algoritmo genético y de enjambre de partículas para obtener valores óptimos. Un análisis comparativo permitiría identificar el algoritmo más eficiente para un arreglo de antenas microstrip seriales.

## **1.4. Formulación del Problema**

### **1.4.1. Problema General**

El diseño de antenas patch en serie es un proceso complejo que involucra múltiples parámetros y variables, lo que dificulta su optimización utilizando métodos convencionales. Por lo tanto, es necesario evaluar el desempeño de diferentes algoritmos de optimización bio-

inspirados para determinar el más adecuado para la optimización de antenas patch en serie y mejorar su eficiencia y rendimiento.

#### **1.4.2. Problemas específicos**

- ¿Que función objetivo es la más adecuada para optimización del ancho de banda y la ganancia de la antena y que incluya los siete parámetros de la antena?
- ¿Cómo se pueden adaptar los algoritmos bio-inspirados para la optimización de una antena serial de 8 parches?
- ¿Cuál es el impacto de la priorización de los parámetros de la función objetivo en los resultados para el mejoramiento de la antena?
- ¿Cómo se pueden analizar y comparar los resultados de los tres algoritmos de optimización y determinar cuál es el más apropiado para el mejoramiento de la antena serial de 8 parches?

### **1.5. Objetivos**

#### **1.5.1. Objetivo General**

Realizar un análisis comparativo de la eficiencia de los tres algoritmos de optimización bio-inspirados para el diseño de antenas patch en serie, adaptándolos para la optimización de una antena serial de 8 parches y determinar el algoritmo más apropiado para su optimización.

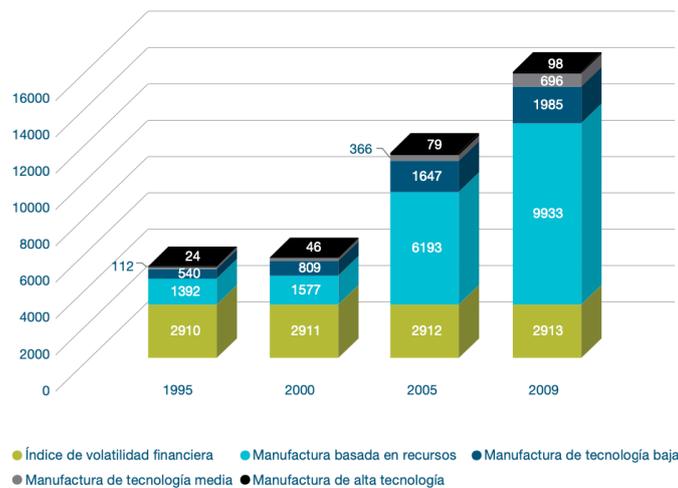
#### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Establecer una función objetivo que incluya siete parámetros de la antena y dos casos en la función de aptitud: uno para el ancho de banda y otro para la ganancia.
- Implementar y adaptar los algoritmos de optimización bio-inspirados murciélago (BA), optimización del enjambre de partículas (PSO) y algoritmo genético (GA) para la optimización de una antena serial de 8 parches.
- Analizar la eficacia de los tres algoritmos de optimización en términos de la priorización en los parámetros para mejorar los parámetros de la antena serial de 8 parches.

- Comparar los resultados obtenidos de los tres algoritmos de optimización y determinar el algoritmo más apropiado para el mejoramiento de la antena serial de 8 parches en términos de su capacidad para cumplir con la función objetivo.

## 1.6. Justificación

Actualmente en el Perú vivimos una dependencia tecnológica preocupante. Es así que, un abrumador porcentaje de nuestra producción interna y de nuestras exportaciones se basan en la explotación de recursos naturales, como se puede observar en la Figura 1.1. La misma nos indica que nuestro país esta todavía en un muy incipiente estado de desarrollo tecnológico. Esto trae como consecuencia, una falta de diversidad en el sector productivo y que se ve altamente vulnerable a posibles crisis económicas. Es así que, se produce un ciclo vicioso, donde el sector productivo no invierte en el desarrollo tecnológico y esa falta de inversión produce una vulnerabilidad muy grande que limita la capacidad de decisión hacia sectores que diversifiquen la oferta tecnológica.



*Figura 1.1.* Evolución de las exportaciones de bienes, en base a su intensidad tecnológica

(según clasificación de productos de Lall) (Millones de USD): 1995-2009.

Fuente: (Palomino de la Gala y cols., 2016), Examen de las Políticas de Ciencia, Tecnología e Innovación. Perú.

Es de urgencia que se apliquen múltiples esfuerzos desde todos los sectores de nuestra sociedad para aumentar las capacidades tecnológicas. Uno de los sectores llamados a proponer soluciones, es la academia o el sector universitario. En el caso de nuestra universidad, se puede contribuir en las temáticas relacionadas a nuestras carreras profesionales. Una de estas áreas de actualidad, son las comunicaciones móviles de quinta generación. Al ser la quinta

iteración de dicha tecnología, se le considera ya en un estado de completa maduración. Es así que, muchas etapas propuestas en los estándares de dichos sistemas ya presentan un nivel de complejidad bastante elevado. Lo que implica la necesidad de utilizar recursos tecnológicos y herramientas muy especializadas, costosa y escasas en nuestro país. Una de las áreas de estos sistemas es el desarrollo de antenas para cumplir con los requisitos de 5G. El desarrollo implica etapas de diseño, fabricación, optimización, validación y test de los prototipos. En la presente tesis nos enfocaremos en la etapa de optimización de los prototipos diseñados. La optimización es un proceso iterativo que implica la utilización de recursos computacionales, que por lo general son limitados en nuestro país.

## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

El trabajo realizado por (Shao y cols., 2020). que tiene como titulo: "Design of wideband differentially fed multilayer stacked patch antennas based on bat algorithm". En dicho trabajo se presenta una comparación entre los algoritmos PSO, Genético y Murciélago. Donde se puede apreciar que para la antena de patches apilados, la función objetivo del algoritmo de murciélago llega a valores mas bajos en menos iteración comparado con los otros algoritmos. Dicha comparación resulta muy interesante para la presente tesis, debido a que también se hará una comparación de los mismos algoritmos de optimización. A diferencia de dicha comparación, en la presente tesis se desea establecer si las mejores prestaciones del algoritmo Bat, son ligadas al tipo de antena usada en dicho trabajo, o si es independiente de la geometría de la antena. Por otro, en la presente tesis se han utilizado 8 variables para el diseño y optimización con el algoritmo, en comparación a las 7 usadas en el articulo citado. Considerando además que las funciones objetivos son diferentes e independientes para cada parámetro de antena.

El trabajo realizado por (Arce Casas, 2008) que tiene como titulo: "Síntesis de agrupaciones de antenas por medio de optimización estocástica". En este trabajo de maestría se optimiza el diagrama de radiación de agrupaciones lineales utilizando el algoritmo genético y PSO. Se utiliza tres ecuaciones objetivos, comenzando por una sencilla hasta una mas compleja para comparar dichos algoritmos. En el primer problema, el tiempo de optimización para el algoritmo genético y PSO fue de 10.286 segundos y 7.995 segundos respectivamente, en el segundo problema fue de 176.638 segundos para el genético y 83.076 segundos para el PSO, por último, en el tercer problema el PSO lo optimizó en 466.9157 segundos y el genético en 943.265 segundos. El algoritmo PSO tiene una mayor rapidez de convergencia respecto al genético. En el presente trabajo se optimizará el ancho del haz a media potencia (HPBW) para  $\phi=0^\circ$  y  $\phi=90^\circ$  centrado a  $0^\circ$ .

El trabajo realizado por (Silva, 2013) que tiene como titulo: "Optimización del diseño de

antenas Yagi-Uda usando Algoritmos Genéticos”. En este trabajo adapta el algoritmo genético para optimizar el desempeño de una antena yagi. Su función objetivo utiliza la directividad y la relación frontal-trasera que lo obtiene por la formulación matemática del método de los momentos. También, utiliza una población de 20 individuos ya que al aumentar la población no había mejoras. Para la selección de los mejores resultado utiliza el método de la competencia, es decir, escoge aleatoriamente los individuos y lo comparara por su peso con su valor objetivo ganando el que se acerca mas al objetivo. En este trabajo se utilizará el método de la ruleta y etilismo para la selección de los mejores individuos con la misma población de 20.

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Parámetros Fundamentales de antena

#### Definición del concepto de antena

El IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) define una antena como “aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas” (“IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas”, 1983).

#### Coefficiente de reflexión

Se define como la razón de la onda de tensión reflejada  $V_o^-$  normalizada respecto a la amplitud de la onda de tensión incidente  $V_o^+$ . La tensión está relacionada con la impedancia de la carga, por lo que el coeficiente de reflexión puede ser expresado por la impedancia de carga  $Z_L$  y la impedancia de la línea de transmisión  $Z_0$  (Pozar, 2011).

$$\Gamma = \frac{V_o^-}{V_o^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.1)$$

#### Parámetros S

La matriz de dispersión proporciona información de la amplitud de la onda de voltaje incidente  $V_j^+$  respecto a la onda de voltaje reflejada  $V_i^-$  como indica la Ec. 2.2.

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & & & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & & S_{NN} \\ \vdots & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Un elemento  $S_{ij}$ , si no se recibe en ningún puerto una onda incidente, se define como la relación de la amplitud de la onda de tensión reflejada  $V_i^-$  en el puerto  $i$  sobre la onda de tensión incidente  $V_j^+$  desde el puerto  $j$  (Pozar, 2011).

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0 \text{ para } k \neq j} \quad (2.3)$$

### Directividad

Se define como la relación entre la intensidad de la radiación en una cierta dirección y la densidad media que radiaría a la misma distancia una antena isotrópica, es decir, en todas las direcciones. Donde  $P_t$  es la potencia transmitida (Stutzman y Thiele, 2012).

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\phi(\theta, \varphi)}{P_t / (4\pi d^2)} \quad (2.4)$$

### Ganancia

Se define como la relación entre la intensidad de la radiación en una cierta dirección y la densidad media que radiaría a la misma distancia una antena isotrópica, incluyendo las pérdidas de potencia en los materiales que componen la antena. La ganancia máxima no toma en cuenta la dirección angular como se muestra en la Ec. 2.5 (Markus Voelter, 2003).

$$D = \frac{\phi_{max}}{P_t / (4\pi d^2)} \quad (2.5)$$

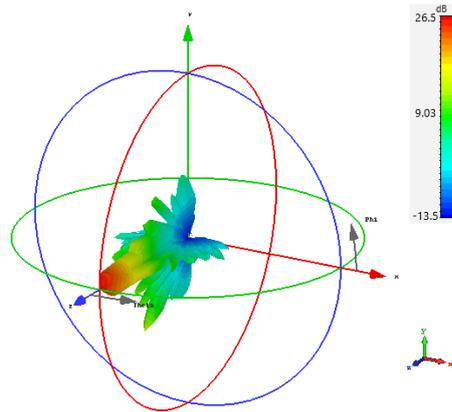


Figura 2.1. Patrón de radiación 3D en el campo lejano Far-field  
Fuente: Elaboración propia

### Ancho de banda (BW)

Es el rango de frecuencias sobre la cual la antena cumple un estándar específico. Usualmente el rango de frecuencias se considera a partir donde la curva es menor a -10dB como se muestra en la Figura 2.2. El BW se considera del punto 1 hasta el punto 2.

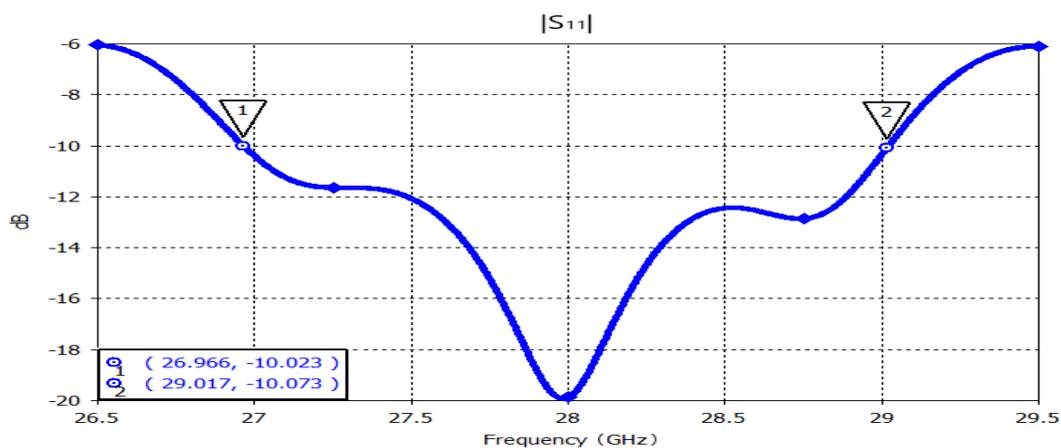


Figura 2.2. Ancho de Banda BW  
Fuente: Elaboración propia

### Polarización

La polarización es definida por la dirección del vector del campo eléctrico radiado (“IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas”, 1983). Las definiciones de Ludwig se muestran en la Figura 2.3 En la primera definición, el vector del campo eléctrico se proyecta sobre los ejes x e y que se encuentran en el plano. La segunda definición, utiliza los vectores unitarios

esféricos, tangentes a una superficie esférica, que se utilizan para representar las direcciones de los vectores unitarios con la excepción de las dos direcciones singulares a lo largo del eje Y como eje polar. Por último, en la tercera definición, los vectores unitarios pueden obtenerse girando los vectores unitarios en torno a la dirección radial por un ángulo  $\varphi$  (Aboserwal y cols., 2018).

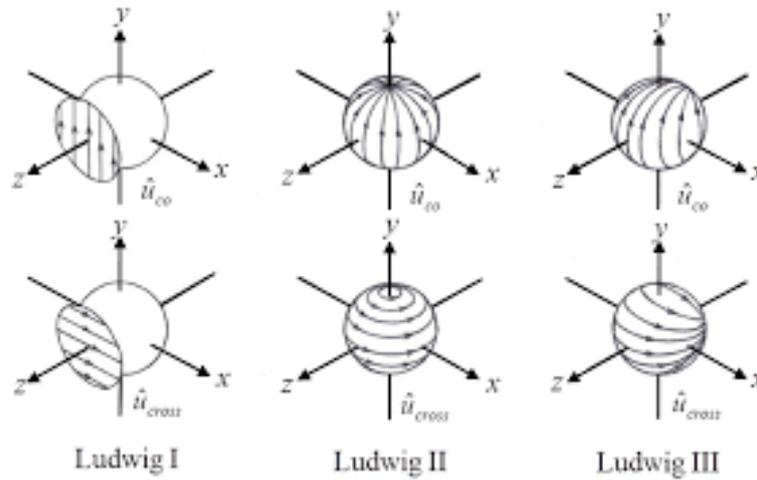


Figura 2.3. Las tres definiciones de la polarización de Ludwig  
Fuente: (Aboserwal y cols., 2018)

### Ancho de Haz

Conocido por sus siglas HPBW (Half Power Beamwidth), es la separación angular donde el haz principal del patrón de potencia es igual a la mitad del valor máximo, siendo -3dB en ambos extremos del valor máximo del haz principal.

$$HPBW = |\theta_{HPBW \text{ left}} - \theta_{HPBW \text{ right}}| \quad (2.6)$$

$$E = j\omega \sin \theta A_z \hat{\theta} \quad (2.7)$$

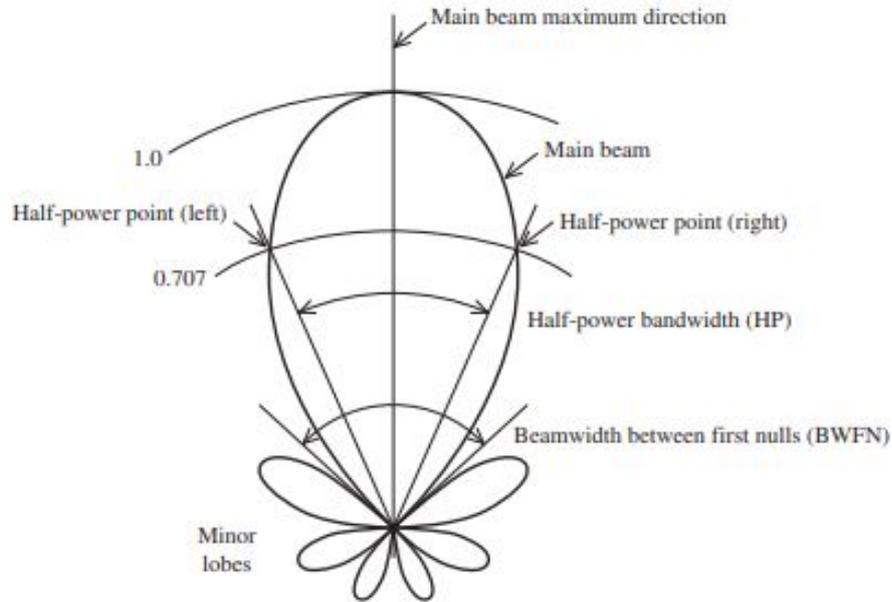


Figura 2.4. Ancho de haz de media potencia  
 Fuente: (Stutzman y Thiele, 2012)

HPBW se origina de la proyección del elemento de la corriente en la dirección  $\theta$  de la ecuación 2.7. En diseño de antenas se analiza  $\Phi = 0^\circ$  y  $\Phi = 90^\circ$  siendo la vista final de una corriente infinitesimal Figura 2.5.a) y la longitud máxima de la corriente Figura 2.5.b) (Stutzman y Thiele, 2012).

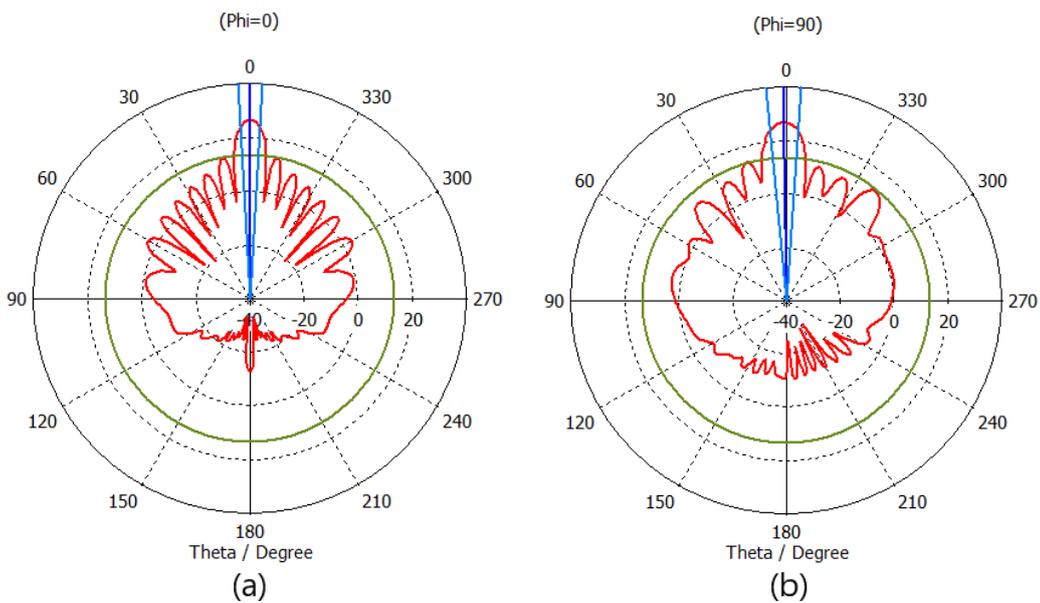


Figura 2.5. a) Diagrama polar en  $\Phi = 0^\circ$ . b) Diagrama polar en  $\Phi = 90^\circ$   
 Fuente: Elaboración propia

## 2.2.2. Tipos de antenas

### Antena Dipolo

Una antena dipolo tiene dos brazos radiantes simétricos, compuesto por dos cables rígidos o dos varillas metálica lineal con un punto de alimentación en el centro, como se observa en la Figura 2.6.a). Debido a su compleja fabricación se usa la antena monopolo que tiene un solo brazo radiante, como se visualiza en la Figura 2.6.b). Los monopolos se utilizan sobre un plano de tierra total o parcial. Las reflexiones del plano de tierra producen un monopolo virtual por debajo del suelo, por lo que una antena monopolo sobre un plano de tierra perfecto puede ser evaluarse de la misma manera que una antena dipolo, como se observa en la Figura 2.6.c). Las antenas dipolo y monopolo se utilizaron a comienzos del siglo XXI en teléfonos inalámbricos y celulares (Balanis, 2008).

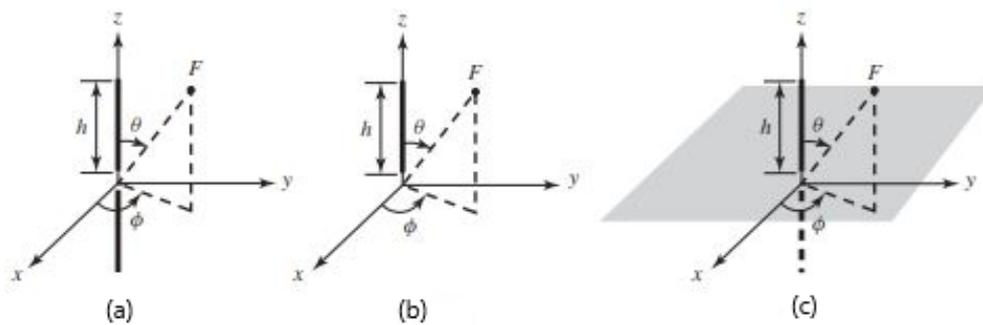


Figura 2.6. a) Antena dipolo. b) Antena monopolo. c) Antena monopolo sobre un plano de tierra mostrando la fuente virtual por debajo.

Fuente: (Balanis, 2008)

### Antena Reflectora

Las antenas reflectoras surgieron en la astronomía óptica y para maximizar la señal en una sola dirección. Su geometría consiste de un reflector parabólico con un punto focal para recibir toda la señal reflejada. Son usadas en aplicaciones de comunicaciones y radares desde mediados del siglo XX. En la actualidad se ven en torres para enlaces de telecomunicaciones punto a punto, en casas para la televisión y en comunicaciones de satélites espaciales (Z.-N. Chen, Liu, Nakano, Qing, y Zwick, 2016), como se observa en la Figura 2.7.



*Figura 2.7.* Antena reflectora en Australia

Fuente: (Z.-N. Chen y cols., 2016)

### **Antena Microstrip**

La geometría de una antena de parche microstrip (MPA) consiste en un parche metálico impreso en un sustrato conectado a tierra en su reverso. La forma del parche puede ser arbitraria. En la práctica, el rectángulo y el círculo son formas comunes. La antena suele estar alimentada por una línea de contacto, como se puede observar en la Figura 2.8.a) o por una sonda coaxial, como se muestra en la Figura 2.8.b). En la línea de contacto, la energía se acopla al parche de varias maneras: por conexión directa, por acoplamiento de proximidad y por acoplamiento de apertura. La antena de parche surge a mitad del siglo XX pero comenzó a usarse a fines del siglo XX por sus ventajas, entre las que se encuentra, su bajo costo, la adaptabilidad a una superficie con forma, la facilidad de fabricación y la compatibilidad con la tecnología de circuitos integrados (Z.-N. Chen y cols., 2016).

#### **2.2.3. Arreglos de antenas**

Los arreglos de antenas se usan para obtener el patrón de radiación directivo, alta ganancia y el direccionamiento de haz, como se puede visualizar en la Figura 2.8.a). Debido a sus beneficios son utilizados en la ingeniería de antenas y electromagnética. Los arreglos están conformados por elementos de antenas idénticos, siendo más utilizado en antenas microstrip, como se puede observar en la Figura 2.8.b). Estos sistemas usan por lo general, métodos complejos de alimentación para cada elemento como los lentes de Rotman. Estos lentes sirven para generar diferencias de fase específicas a cada línea dentro de un arreglo de elementos seriales.

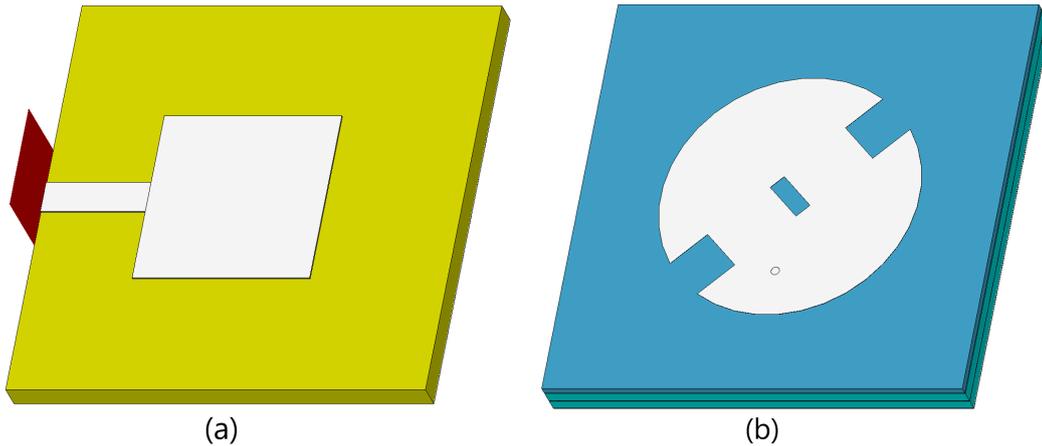


Figura 2.8. a) Antena microstrip cuadrada. b) Antena microstrip circular.  
Fuente: Elaboración propia

- **Arreglo lineal:** se ubican a lo largo de una línea recta los elementos de la antena.
- **Arreglo planar:** los elementos de la antena se distribuyen en un plano.
- **Arreglo de volumen:** la distribución de los elementos de la antena es tridimensional.

Los arreglos lineales es la base para todos los arreglos de antenas y su metodología de diseño puede aplicarse en varios tipos de arreglos (Weng, Yang, y Elsherbeni, 2007).

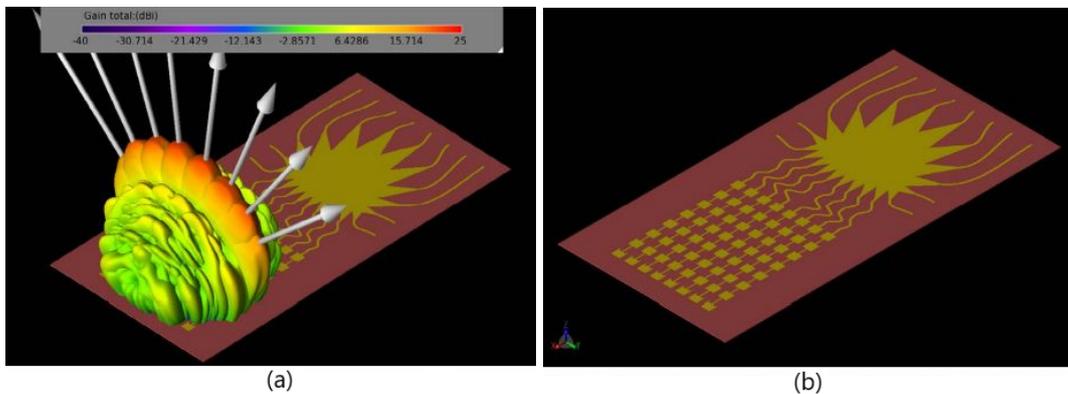


Figura 2.9. (a) Los ocho posibles patrones de haz de del arreglo generados al activar uno de los puertos de lente de Rotman. (b) Arreglo de antena 8x8 con la formación de haz de lente de Rotman.  
Fuente: (Remcom, 2019)

## Beamforming

El principio básico del beamforming consiste en controlar la fase relativa entre los elementos de la antena para direccionar el patrón de haz, como se muestra en la Figura 2.10.a). La generación de dos o más haces desde el mismo arreglo de antenas suele ser ventajosa en comparación con el barrido de un solo haz. La velocidad de datos se incrementa cuando hay varios haces con diferentes canales de frecuencia. El arreglo de antena utiliza la matriz Butler para alimentar directamente a los elementos para crear variaciones de fase lineales entre los elementos radiantes, como se puede observar en la Figura 2.10.b). Una matriz Butler de  $M \times M$  puertos puede utilizarse para excitar  $M$  modos de fase independientes, ya que de lo contrario una señal alimentada a un puerto se irradiará en más de un haz. Cada haz irradia un patrón de amplitud omnidireccional, pero con diferentes variaciones de fase con el ángulo (Josefsson y Persson, 2006).

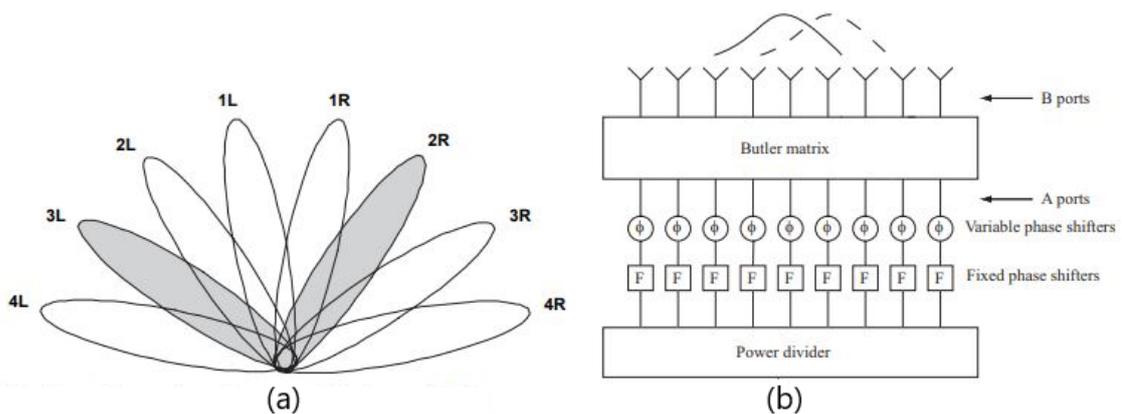


Figura 2.10. (a) 8 haces ortogonales. (b) Matriz de Butler 8x8.

Fuente: (Balanis y Ioannides, 2007) (Josefsson y Persson, 2006)

### 2.2.4. Algoritmos de optimización

Un algoritmo es un procedimiento de instrucciones que siguen pasos o etapas que impliquen cálculos matemáticos. Los pasos y procedimientos dependen del algoritmo utilizado y del contexto de interés. Los algoritmos de optimización siguen procedimientos de búsqueda eficientes, obteniendo resultados diferentes pero no lejanos en cada simulación, es decir, es metaheurístico. Por su naturaleza iterativa, son usados en muchas aplicaciones, como la robótica (Gao, Wang, Gao, y Cheng, 2021), los diseños industriales (Feng, Zhang, Han, Kang, y Wang, 2020) y la ingeniería (Dong y cols., 2019). Los objetivos de la optimización son de dos tipos: minimizar y/o maximizar parámetros dentro de un problema multivariable. Por

ejemplo, se pueden usar para minimizar los costos de producción y/o maximizar la eficiencia de un sistema. Muchas variables como los recursos computacionales, el tiempo, el dinero, la eficiencia, ancho de banda son generalmente limitados o escasos en las aplicaciones de ingeniería. Debido a eso, se tiene que encontrar soluciones para utilizar de forma óptima estos valiosos recursos bajo diversas restricciones. Los algoritmos de optimización tratan de solucionar estos problemas mediante herramientas matemáticas (Yang, 2020). En la presente tesis se usaran las herramientas que imitan algunos comportamientos de animales. Es así, que en la literatura se encuentran varios algoritmos de optimización bio-inspirado, como los que describimos a continuación.

- **El algoritmo de la luciérnaga (FA):** Este algoritmo fue desarrollado por Xin-She Yang (Yang, 2010a). El algoritmo se inspira en los patrones de iluminación intermitente producidos por las luciérnagas. Estas producen una luz generada químicamente desde su estómago inferior. La bio-luminiscencia con patrones de parpadeo se utiliza para permitir la comunicación entre dos insectos adyacentes en busca de presas y también para encontrar pareja. El FA se aplica en análisis de imágenes digitales y puede tratar problemas de optimización multimodal no lineales de forma efectiva y natural (Dey, 2020).
- **El algoritmo salto de ranas combinado (SFLA):** Se inspira en las ranas que buscan comida en un estanque sobre piedras. El SFLA es una conocida técnica de optimización basada en reglas metaheurísticas propuesto por Eusuff y Lansey (Eusuff y Lansey, 2003). Combina el algoritmo memético y la PSO siendo muy popular. Además, su simplicidad y la alta velocidad de convergencia, hacen del SFLA un eficiente optimizador global. La población del algoritmo está compuesta por un conjunto de ranas donde cada una indica una posible solución al problema definido. SFLA se aplica en máquinas eléctricas permitiendo la medición e identificación de parámetros. (Moayedi, Bui, y Thi Ngo, 2020)
- **El algoritmo búsqueda de cuco (CS):** Desarrollado en 2009 por Xin-She Yang y Suash Deb (Yang y Deb, 2009). El algoritmo metaheurístico se basa en el parasitismo de las crías de algunas especies de cucos. Los cucos ponen sus huevos en nidos comunales y pueden quitar los de otros para aumentar la probabilidad de eclosión de sus huevos. El algoritmo consiste en poner un huevo a la vez y depositarlo en un ni-

do elegido al azar; cada huevo en un nido representa una solución, y cada cuco puede poner sólo un huevo. El objetivo es utilizar las nuevas y mejores soluciones para reemplazar una solución no tan buena en los nidos utilizan una combinación equilibrada de un paseo aleatorio local y el paseo aleatorio global. CS se puede aplicar en la colocación de los condensadores, palas de aerogenerador, diseño de estructuras de celosía, estructuras de acero, entre otros (Yang, 2013).

Otros algoritmos utilizan la inteligencia de enjambre para ayudarse colectivamente a la búsqueda de una solución global, como el algoritmo de polinización de las flores inspirado en el proceso de polinización de las plantas con flores (Z. Wang, Xie, He, y Chan, 2019), el algoritmo de la colonia de hormigas simulando el método de búsqueda utilizando el feromona como mensajero químico (Y. Sun, Dong, y Chen, 2017), el algoritmo de forrajeo bacteriano que imita la búsqueda de alimento de las bacterias (Xu y cols., 2020), el algoritmo de colonia de abejas que simula el comportamiento de las abejas en búsqueda de miel (J.-Q. Li y cols., 2020), entre otras.

Incluso con varias ventajas de cada método, estos algoritmos pueden tener algunas restricciones y limitaciones, como seleccionar el número de población e iteraciones. La mayoría de los casos de optimización, se puede encontrar soluciones óptimas rápido y bastante efectivas. Aunque puede ser difícil encontrar la verdadera solución óptima para un problema definido. Por ejemplo, cuando se utiliza algoritmo de la luciérnaga se necesita definir los parámetros iniciales, requiriendo estudios paramétricos o sino puede converger prematuramente. Otro ejemplo son las limitaciones del algoritmo salto de ranas combinado, en cuanto a su población inicial no uniforme y lenta en las últimas iteraciones. Esto, lo puede llevar a quedar atrapado fácilmente en los extremos locales.

### **2.2.5. Algoritmos utilizados en antenas**

En nuestro caso, el problema multivariable es el diseño de una antena de múltiples elementos. Dentro de esta temática podemos encontrar que muchos algoritmos han sido ya utilizados. Por ejemplo, tenemos el algoritmo Cuco (G. Sun y cols., 2018), que su utilizó para un arreglo de antenas circulares concéntricas, obteniendo un nivel de lóbulos laterales máximo de -22,17 dB y una rápida convergencia en comparación con el algoritmo basado en la biogeografía. Por otro lado tenemos el algoritmo de colonia de abejas (L. Wang, Zhang,

y Zhang, 2019) que fue utilizado en un arreglo de antenas lineales, obteniendo posiciones óptimas de 50 elementos para minimizar el lóbulo lateral. Por otra parte, el algoritmo de forrajeo bacteriano (F. Li y cols., 2020) se usó para el diseño de un sistema MIMO. Para esto se utilizó un arreglo de antenas lineal, logrando descubrir que cuando el número de celdas es fijo y a medida que aumenta los usuarios, el rendimiento del sistema aumenta significativamente. Además, si todos los usuarios mantienen una tasa de transmisión mínima aceptable, el rendimiento del sistema es mayor.

La técnica de optimización del GA ha sido utilizado en varias áreas de investigación hasta la actualidad. Su potente método de búsqueda global se combina con otros métodos de búsqueda local (Y. Wang y Zhu, 2021) para disminuir el tiempo de optimización. Sus operadores de cruce y mutación mejora la convergencia del óptimo global en otros algoritmos (Dziwiński y Bartczuk, 2020), también, el GA es parte de una etapa de optimización (Rousis, Konstantelos, y Strbac, 2020).

El PSO utiliza el comportamiento de la inteligencia de enjambre permitiendo encontrar mejores soluciones. Se han aplicado con éxito en el campo de investigación asociada a procesos de calidad de red eléctrica (Rodríguez-Guerrero y cols., 2018). Su método del óptimo local y óptimo global se utiliza como híbrido con otros algoritmos para mejorar la optimización y selección de resultados (Kaur y cols., 2021).

El BA explora en un rango definido por el usuario requiriendo poco control. Se aplica en sistemas de energía para evitar la convergencia prematura (H. Liang, Liu, Shen, Li, y Man, 2018), también, para aumentar la capacidad de búsqueda global ampliando el área de explotación de forma híbrida con otros algoritmos (G. Chen, Qian, Zhang, y Sun, 2019).

Siendo estas las razones se implementa el algoritmo GA, PSO y BA en este trabajo de tesis.

### 2.2.6. Algoritmo murciélago

El método utiliza y simula el comportamiento de los murciélagos, que utilizan el ultrasonidos para detectar obstáculos y localizar presas. Es el segundo mamífero en cantidad de especies a nivel mundial, con más de 1300 especies. Diferenciándose así por su tamaño. Además, es el único mamífero que tiene alas. Los Murciélagos del tipo Microchiroptera son un grupo de pequeños individuos que utilizan una sofisticada ecolocalización para cartografiar el entorno que les rodea, orientarse y encontrar fuentes de alimentos, incluso en la oscuridad total. Emiten un breve pulso de ondas sonoras y luego, al escuchar sus ecos, pueden distinguir las presas de los objetos peligrosos y a los depredadores (Rodríguez-San Pedro, Allendes, Carrasco-Lagos, y Moreno, 2014). En la Figura 2.11 se visualiza su comportamiento con el ultrasonido. Basándose en este comportamiento, Xin-She Yang ha desarrollado un nuevo algoritmo de optimización, denominado Algoritmo del Murciélago BA (Yang, 2010b). El principio de optimización del BA consiste en asignar una población de murciélagos individuales al espacio del problema de N dimensiones y luego simular el proceso de localización para encontrar una solución, que en nuestro caso sería una antena óptima que cumpla con los objetivos requeridos.



*Figura 2.11.* Ecolocalización de los murciélagos

Fuente: Elaboración propia

Si idealizamos algunas de las características de ecolocalización de los Microchiroptera en el algoritmo BA, podemos expresar las siguientes reglas.

1. Todos los murciélagos utilizan la ecolocalización para saber la distancia y la posición.

Un murciélago  $x_i$  se considera como una solución al problema de optimización.

2. Los murciélagos vuelan aleatoriamente con una velocidad  $v_i$  en la posición  $x_i$ . Además, pueden variar y ajustar su frecuencia  $Q_i$ , el volumen  $A$  y la tasa de emisión de pulso  $r$ , dependiendo de la cercanía de su objetivo.
3. El volumen del pulso varía desde un valor positivo alto  $A_0$  hasta un valor constante mínimo  $A_{min}$  y la tasa de emisión de impulsos  $r$  varía de un valor constante inferior a un valor valor más alto.

El algoritmo trata cada solución como un murciélago virtual en una población de  $N$  individuos. La velocidad de los murciélagos se define como  $v_i$  en la posición  $x_i$ . También, emiten un sonido con una frecuencia fija  $Q_{min}$ , que varía hasta una frecuencia  $Q_{max}$  para buscar objetivos. Estas frecuencias se actualizan en cada iteración  $t$  (Yang y Gandomi, 2012), utilizando la Ec. 2.8. Cada nueva velocidad  $v_i^t$  y posición  $x_i^t$  se calculan con las ecuaciones 2.9 y 2.10.

$$Q_i = Q_{min} + (Q_{max} - Q_{min})\beta \quad (2.8)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x^*)Q_i \quad (2.9)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (2.10)$$

Donde  $\beta \in [0 1]$  es un número aleatorio para una distribución uniforme y  $x^*$  representa la mejor solución encontrada para la función objetivo entre los murciélagos. Después de actualizar la solución de la función objetivo, la varianza de la posición varía según la proximidad al objetivo por la Ec. 2.11

$$X_{new} = X_{old} + W_B A^t \quad (2.11)$$

Donde  $A^t$  denota la media del volumen del pulso de todos los murciélagos en cada iteración y  $W_B$  es un (radio vector) aleatorio. En cada iteración, se acepta una nueva solución si la tasa de emisión de pulso aumenta y el volumen del pulso disminuye cuando se acerca al objetivo. El volumen del pulso  $A_i$  y la tasa de emisión de pulso  $r_i$  se actualizan utilizando la

Ecuación. 2.12 y 2.13 .

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t; \quad (2.12)$$

$$r_i^{t+1} = r_0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (2.13)$$

Donde  $r_0$  es la frecuencia de pulso inicial bajo la distribución uniforme,  $\alpha$  es el factor de atenuación del volumen del pulso y  $\gamma$  es el factor de mejora de la tasa de emisión de pulso. Por lo tanto, la nueva solución para cada iteración se calcula mediante las ecuaciones 2.8 a 2.13.

### 2.2.7. Algoritmo genético

Son algoritmos metaheurístico basados en la selección y la genética natural, combinando la supervivencia del más apto. Intercambia información aleatoria con otros individuos en la búsqueda de algo innovador. Basándose en este comportamiento, John Holland desarrolló a finales del siglo XX en la Universidad de Michigan el algoritmo genético (GA). El algoritmo consiste en un conjunto de individuos artificiales que intercambia aleatoriamente los genes de los individuos mas aptos por medio del cruzamiento y utiliza el método de la mutación para buscar nuevos puntos de búsqueda con un rendimiento mejorado (Goldberg, 1989).

#### Población

La población del GA son representadas por cromosomas que contienen genes como se visualiza en la Figura 2.12. Los valores de los genes son generados aleatoriamente pero dichos valores tienen varias representaciones.

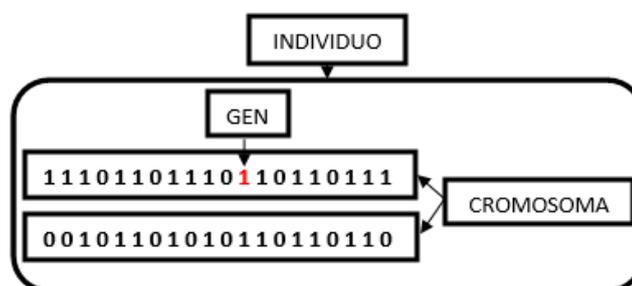


Figura 2.12. Partes del individuo

Fuente: Elaboración propia

- **Representación Binaria:** Es representada por valores de 0 ó 1. Es la primera codificación que apareció, siendo muy usada actualmente.

0	1	0	1	1	0	0
---	---	---	---	---	---	---

Figura 2.13. Representación Binaria

Fuente: Elaboración propia

- **Representación Entera:** Surgió para codificar los valores binarios en valores decimales de los cromosomas para facilitar los resultados obtenidos en muchos trabajos de optimización.

3	1	7	3	-2	-1	8
---	---	---	---	----	----	---

Figura 2.14. Representación Entera

Fuente: Elaboración propia

- **Representación Real:** Utiliza la codificación entera para limitar los cromosomas en un intervalo de valores  $[I_{min}, I_{max}]$ . En la ecuación 2.14 transforma los valores decimales en valores reales, siendo  $L$  la longitud del cromosoma.

1.41	2.15	4.12	3.02	-1.5	0	6.2
------	------	------	------	------	---	-----

Figura 2.15. Representación Real

Fuente: Elaboración propia

$$C_{real} = (I_{max} - I_{min}) * \frac{C_{entero}}{2^L - 1} + I_{min} \quad (2.14)$$

## Selección

Los individuos más aptos son los que deben reproducirse en cada iteración y crear una nueva descendencia más óptima. Cada individuo pasa por la función objetivo para asignarle un valor, si no cumple con lo requerido se le pone un valor de penalidad ( $P_n$ ) constante

en cada iteración. Para seleccionar a los individuos para reproducirse se ordena de menor a mayor según el valor obtenido de la función objetivo, los individuos penalizados se ubica en las últimas posiciones. Lo descrito se muestra en la Figura 2.16.

Individuos	F(x)	Individuos	F(x)
101000101001	1.1	001001101001	0.5
001001101001	0.5	101000101001	1.1
111000001000	Pn	111001101000	1.5
111001101000	1.5	111000001000	Pn

Figura 2.16. Selección de individuos

Fuente: Elaboración propia

### Mutación

Para mutar un gen de los cromosomas se escoge un método de selección de bit para mutarlo, como ejemplo se escoge el séptimo gen del primer cromosoma resaltado en rojo de la Figura 2.17. El método de la ruleta asigna un peso al bit, el peso del bit aumenta del más significativo al menos significativo para cambiarlo de 1 a 0 o viceversa, logrando así que el cambio no sea tan grande. Además, la mutación da diversidad a la población explorando en otro espacio de búsqueda evitando la convergencia prematura de la población. (Whitley, 1994)

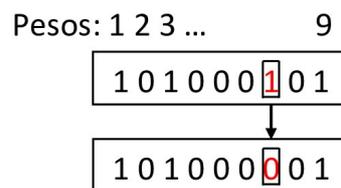


Figura 2.17. Mutación de un bit

Fuente: Elaboración propia

### Cruce

El método de cruce consiste en coger dos padres al azar de una muestra de padres que se acerca al objetivo, de la población total. Se corta sus cromosomas en una posición escogida

aleatoriamente, para generar dos partes de cromosomas iniciales y dos partes de cromosomas finales. Se intercambian las dos partes de cromosomas finales, generando dos nuevos cromosomas completos que heredan los genes de sus padres. (Whitley, 1994)

- **Cruce de un punto:** Este cruce consiste en dividir por un punto al azar el cromosoma para cruzarlo con otro cromosoma dividido por el mismo cruce.

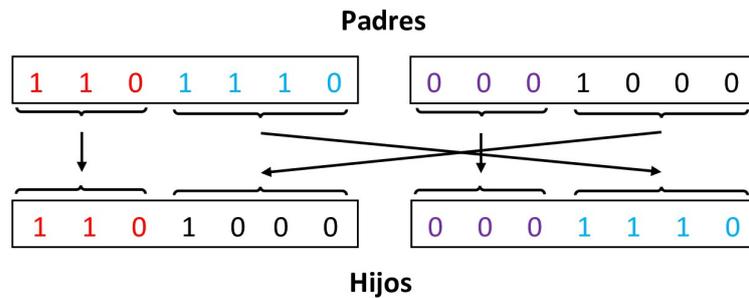


Figura 2.18. Cruce de un punto

Fuente: Elaboración propia

- **Cruce de dos puntos:** Este cruce consiste en dividir por dos puntos al azar el cromosoma para cruzarlo con otro cromosoma dividido por el mismo cruce.

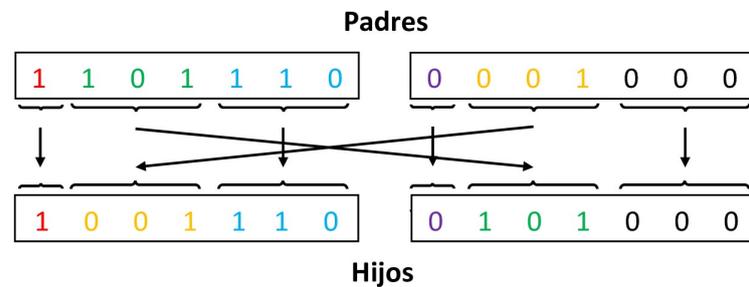


Figura 2.19. Cruce de dos puntos

Fuente: Elaboración propia

## Etilismo

Cuando se realiza el cruce y la mutación, se puede perder el individuo con mejor valor objetivo. El etilismo consiste en copiar el mejor individuo para ser utilizado en la siguiente iteración si no se haya generado un individuo mejor.

### 2.2.8. Algoritmo de optimización del enjambre de partículas

Es un algoritmo estocástico motivado por el enfoque social de los animales que prefieren estar en manadas para buscar alimentos y/o escapar de depredadores. Fue propuesto por Kennedy en 1995 (Kennedy y Eberhart, 1995) dándole el nombre de optimización del enjambre de partículas (PSO). El PSO inicia con un tamaño fijo de partículas y cada partícula es una posible solución potencial en un espacio de búsqueda. El algoritmo es la suma de tres vectores como se muestra en la Figura 2.20. La partícula está influenciada por su mejor posición local y global.

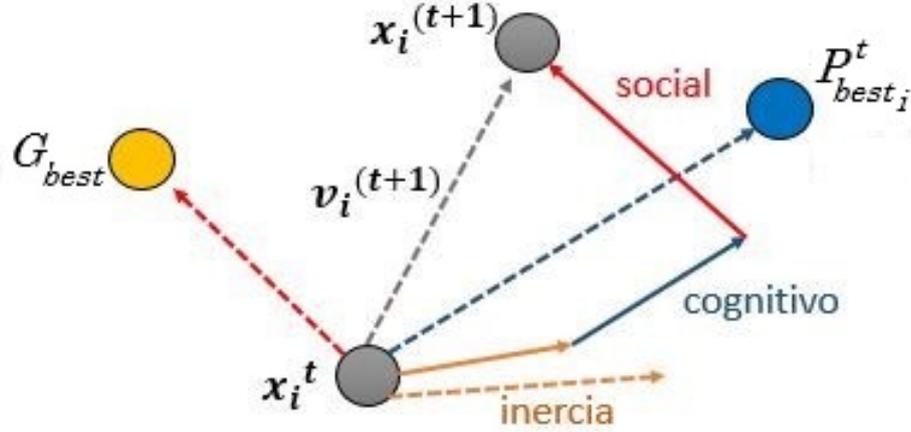


Figura 2.20. Movimiento de las partículas

Fuente: Elaboración propia

La posición puede representarse como un vector. La velocidad  $v_i$  de la partícula está representada por los vectores *inercia*, *cognitivo* y *social* como se representa en la ecuación 2.15. La posición  $x_i$  de la partícula y la velocidad  $v_i$  se calculan con las ecuaciones 2.16 y 2.17.

$$v_i^{t+1} = inercia + cognitivo + social \quad (2.15)$$

$$v_i^{t+1} = W * v_i^t + C_1 * rand * (P_{best_i}^t - x_i^t) + C_2 * rand * (G_{best}^t - x_i^t) \quad (2.16)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \Delta t * v_i^{t+1} \quad (2.17)$$

Donde  $rand \in [0, 1]$  es un número aleatorio para una distribución uniforme.  $C_1$  y  $C_2$  son factores de corrección.  $P_{best_i}$  es la mejor posición local,  $G_{best}$  es la mejor posición global,  $x_i$  es la posición actual.  $W$  es peso de la inercia que se utiliza para obtener un equilibrio entre

la exploración global y la explotación local (Mercangöz, 2021).

A pesar de la versatilidad y flexibilidad, el PSO se atasca en los mínimos locales durante la búsqueda de la solución. Los investigadores se han esforzado por mejorar el PSO presentando nuevas variables de la fórmula para regular y controlar el proceso de búsqueda óptima. Algunos estudiosos se enfocaron en regular el peso de la inercia haciéndolo, constante (Lin, Wang, y Wang, 2019), oscilantes (N. Kumar y Kumar Sharma, 2018), variable en el tiempo (Ding y You, 2020) y el más conocido es de Clerc (Eberhart y Shi, 2000a) dando mejores resultados.

## CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1. Línea de investigación

La presente tesis tiene como línea de investigación Ciencia de la Electrónica, Telecomunicaciones y Tecnología de Información. En el área de investigación de Telecomunicaciones y Automatización, con los temas relacionados a Diseño de Antenas e Inteligencia Artificial.

### 3.2. Descripción de la metodología

La tesis tiene etapas bien definidas para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos específicos. En la Figura 3.1, se puede observar las etapas necesarias para la evaluación comparativa de la eficiencia de los algoritmos de optimización para el diseño de antenas planares. Metodologías similares se han utilizado desde los años 90 y 2000 para la optimización de antenas alámbricas (Altshuler, 2002), patch (Kerkhoff y Ling, 2007), banda ancha (Jin y Rahmat-Samii, 2005), etc. Estos métodos utilizan un algoritmo que se implementa en un lenguaje de programación y se apoya en un simulador electromagnético que se encarga de obtener los parámetros de antena, a partir de las dimensiones geométricas de la misma.

Para el trabajo se extrajo una versión básica del algoritmo murciélago (BAT) (Gupta, 2021), algoritmo de optimización del enjambre de partículas (PSO) (Korani, 2021) y del algoritmo genético (GA) (SeckTuoh, Medina, y Hernandez, 2016) que fueron modificados para el diseño de la antena patch en serie.

Después de adecuar los algoritmos y priorizar los parámetros de antena deseados implementados en el software Matlab, es necesario utilizar un simulador electromagnético. Dicho software permite el cálculo de las ecuaciones de Maxwell de diseños CAD de antenas. El software Matlab se comunica con el simulador electromagnético, dándole la descripción para la construcción de la antena inicial. Al final de la simulación electromagnética, el simulador comercial se comunica devuelta con el software, entregando los resultados de la simulación de la antena para una iteración dada. El Matlab evaluará si los resultados coinciden con los requerimientos deseados. De ser así, se guardan las variables de la antena y los valores de la

función objetivo. De no ser el caso, el algoritmo varía las variables de la antena para repetir el proceso para una nueva iteración.

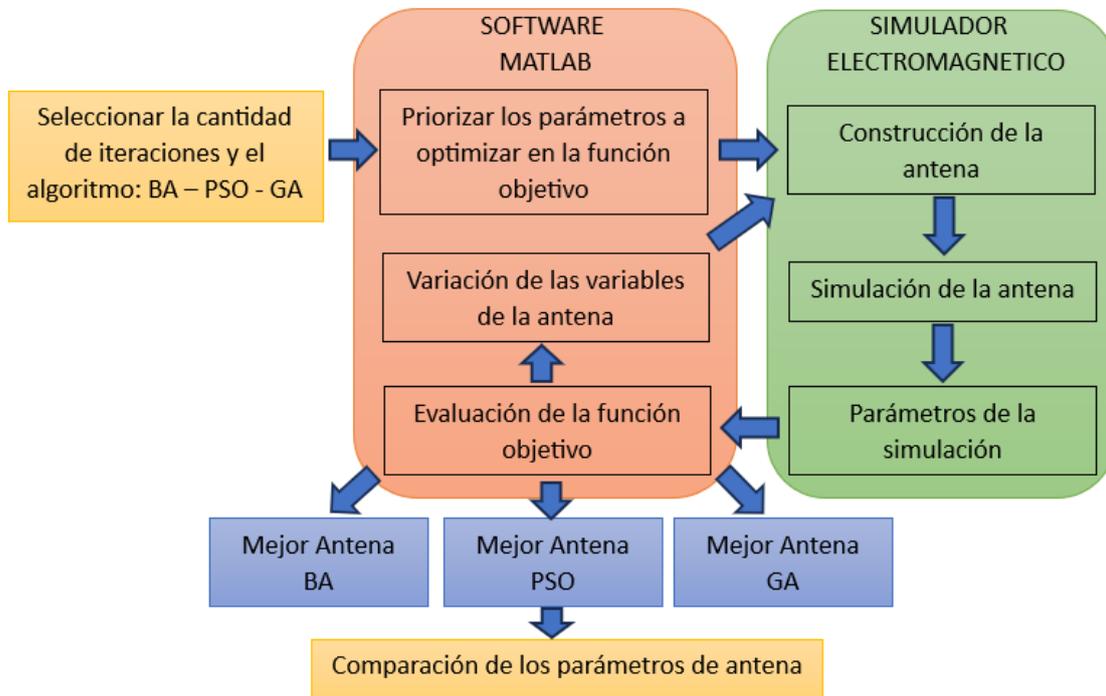


Figura 3.1. Etapas de la investigación para el análisis comparativo de algoritmos de optimización

Fuente: Elaboración propia

Se repite el proceso con todos los algoritmos implementados para cada antena (BA, GA y PSO). Se guardan el mejor resultados de cada algoritmo en cada iteración, escogiendo al final el mejor resultado cuando concluye la cantidad de iteraciones escogido. El proceso concluye con la comparación del mejor resultado de cada algoritmo.

### 3.2.1. Función Objetivo

Es una función que indica cuán cercana está la solución obtenida de la solución requerida. Esta utiliza múltiples variables y representa una única figura de mérito. En esta tesis se utiliza una función objetivo con siete variables en donde en cada iteración se busca que su valor llegue lo mas cercano a cero. La ecuación 3.1 permite el cálculo de la función objetivo.

$$\begin{aligned}
F(i)_{objetivo} = & P_1 * (BW_D - BW_{O_i}) + P_2 * (HPBW_{\phi=0}^{O_i} - HPBW_{\phi=0}^D) \\
& + P_3 * (HPBW_{\phi=90}^{O_i} - HPBW_{\phi=90}^D) \\
& + P_4 * (G_D - G_{O_i}) + P_5 * (\delta\overline{G}_{\theta=1}^{O_i} - \delta\overline{G}_{\theta=1}^D) \\
& + P_6 * \angle G_{\phi=90}^{max_{O_i}} + P_7 * \angle G_{\phi=0}^{max_{O_i}}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Donde: el subíndice  $O$  y  $D$  el valor obtenido y deseado respectivamente.  $BW$  es el ancho de banda,  $HPBW$  es el ancho de haz para los planos E y H ( $\phi = 0^\circ$  y  $\phi = 90^\circ$ ),  $G$  es la ganancia,  $\delta\overline{G}_{\theta=0} = \overline{G}_{\theta=0}^{prom} - G_{max}$ ,  $\angle G_{\phi}^{max_{O_i}}$  es la desviación de la dirección de la ganancia máxima respecto a  $\theta = 0^\circ$  para el plano  $\phi = 0^\circ$  y  $\phi = 90^\circ$ .

En el presente trabajo se desea obtener en algunos requisitos mínimos. Por ejemplo se desea un ancho de banda mínimo de  $BW_D = 3GHz$  para abarcar 4 operadoras (GSMA, 2021). Así mismo, se desea que el patrón de radiación presente anchos de haces de  $HPBW_{\phi=0}^D = 50^\circ$  y  $HPBW_{\phi=90}^D = 8^\circ$  ya que son valores menores a lo establecido en antenas seriales (Farasat, Thalakatuna, Hu, y Yang, 2021). Normalmente en términos de ganancia, en antenas seriales no se llega los 17dBi, por tal motivo se escoge  $G_D = 17dBi$ .  $\delta\overline{G}_{D\theta=0} = 0,1dBi$  para lograr que la diferencia sea lo mas cercado a la ganancia máxima y por último, se elige valores  $\angle G_{\phi}^{max_{O_i}} \leq 3^\circ$  para evitar desalinearnos.

En la tesis se usará una única función objetivo, sin embargo, los pesos  $P_i$  variaran según sea el caso del análisis.

## Prioridad G

Para dar prioridad a G se escoge  $P_1 = 0,3$  para que el  $BW$  sea no sea prioritario.  $P_2 = 0,2$  y  $P_3 = 0,1$  son menores para que la función objetivo disminuya rápido cuando se encuentre ancho de haz pequeño.  $P_4 = 0,25$  permite que la ganancia no impacte tanto en los demás parámetros que son mas complicado en optimizar. Los pesos restantes  $P_5 = 0,05$ ,  $P_6 = 0,08$  y  $P_7 = 0,02$  serán constantes en ambos casos por no ser parámetros que se requiere como prioridad.

## Prioridad BW

En el caso de dar prioridad al ancho de banda BW,  $P_1 = 0,1$  será pequeño para quedarse con los valores altos.  $P_2 = 0,3$  y  $P_3 = 0,25$  se aumenta en referencia al caso anterior por no ser prioritarios.  $P_4 = 0,2$  es 0.5 menor a la prioridad G para que la función objetivo disminuya porque encontrar un gran BW es muy complicado.  $P_5 = 0,05$ ,  $P_6 = 0,08$  y  $P_7 = 0,02$  es igual al caso anterior. En los dos casos mencionados la sumatoria  $\sum_{i=1}^7 P_i$  será igual a 1. Con dichas prioridades, el establecimiento de la función objetivo cumple el primer objetivo específico de la presente tesis.

### 3.2.2. Descripción de la antena de referencia

La geometría de la antena comprende un conjunto de 8 antenas parche cuadrado conectadas en serie por una línea de transmisión microstrip. Los parches se colocan en la cara superior del sustrato y el plano de tierra en la cara opuesta, como se visualiza en la Fig 3.2 y Fig 3.3.

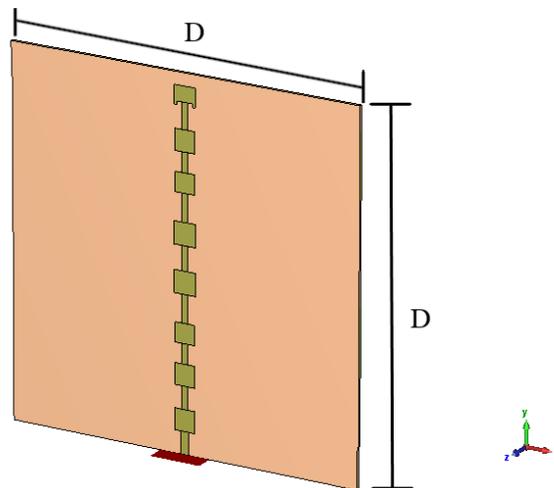


Figura 3.2. Vista en perspectiva de la antena con puerto de onda completa  
Fuente: Elaboración propia

Para el diseño de la antena se utiliza como referencia el trabajo de Remcom, los valores del sustrato y corte de muesca son utilizados en esta tesis. La antena utiliza un sustrato de Teflón con permitividad relativa  $\epsilon_r = 2.2$  y  $\tan\delta = 0,001$  (Remcom, 2019). Este tiene un espesor  $h = 0.508$  mm y con un área de  $D \times D$  cm<sup>2</sup>. El largo D de la antena se define mediante la ecuación 3.2, ya que su dimensión final depende de las variables calculadas por los algoritmos.

$$D = \sum_{i=1}^4 (W_i + l_i) + 2L \quad (3.2)$$

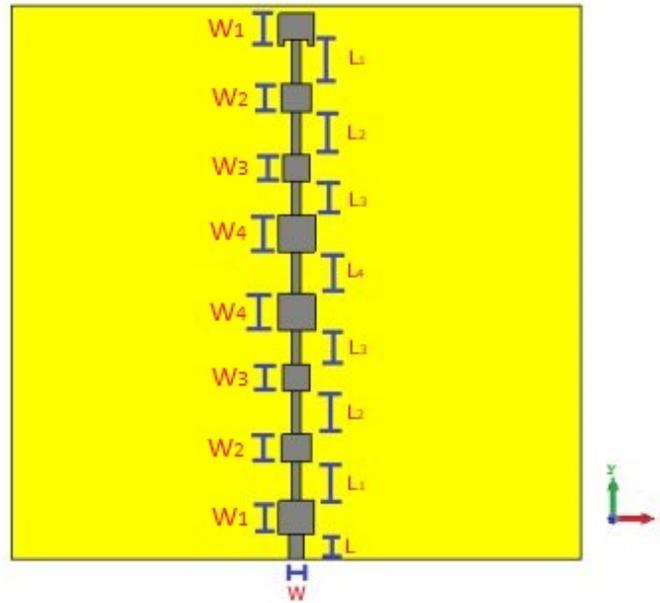


Figura 3.3. Antena 8-PSA  
Fuente: Elaboración propia

Cada línea de conexión de los parches, tiene un ancho de  $W=1$  mm. Los siete primeros parches son de forma cuadrada y el último parche de la antena tiene una muesca de  $0,6269$  mm x  $2,727$  mm en el lado de la conexión (Remcom, 2019) como se muestra en la Fig 3.4. En los primeros siete parches se provoca un comportamiento de onda constante, es decir que se encuentra en fase. Mientras que el octavo elemento es diferente para generar comportamiento de onda móvil debido a que se empareja mediante una técnica de alimentación por inserción (Kamran, Abd Rahman, Yamada, y Sakakibara, 2017). Esto se debe al efecto combinado de la alimentación insertada y el parche para irradiar eficazmente la potencia máxima que llega al último elemento.

Como ya se mencionó, la antena utiliza un sustrato de  $\epsilon_r = 2,2$  y  $\tan\delta = 0,001$  y es alimentada por un puerto de onda completa a través de una línea de transmisión. El ancho de la línea  $W$  es calculado por la Ec 3.3. Luego es necesario el cálculo de la permitividad eléctrica efectiva  $\epsilon_{ref}$  y se calcula con la Ec 3.4. Esto se debe a que las líneas de campo eléctrico  $E$  atraviesa por una combinación de dos medios: el aire y el teflón. Por lo tanto,

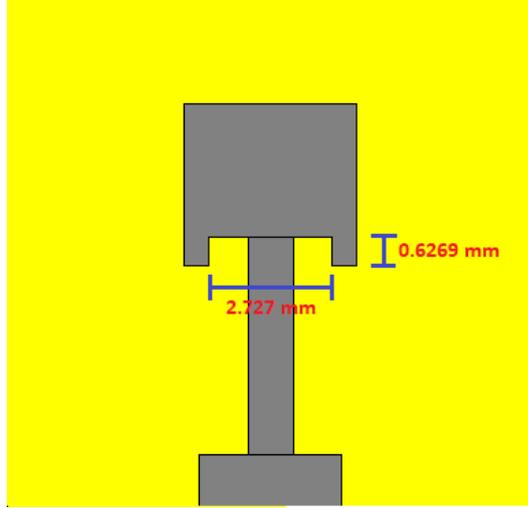


Figura 3.4. Muesca en la 8 placa

Fuente: Elaboración propia

para su modelamiento es necesario considerar una permitividad equivalente o efectiva  $\epsilon_{ref}$ . En el análisis de la trayectoria de la corriente eléctrica, los efectos de borde que se producen en los límites de la metalización se toman en cuenta considerando una variación virtual de longitud del parche o  $\Delta L$ . Esta variación de la longitud  $\Delta L$  se calcula con Ec 3.5. Finalmente la longitud real  $L$  necesaria para producir una resonancia en una frecuencia deseada se calcula mediante la Ec 3.6.

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_o \epsilon_o}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.3)$$

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \left( \frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \left( \frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (3.5)$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}} \sqrt{\mu_o \epsilon_o}} - 2\Delta L \quad (3.6)$$

Donde:  $f_r$  es la frecuencia de operación,  $\mu_o$  es la permeabilidad del espacio libre,  $\epsilon_o$  es la permitividad del vacío,  $\epsilon_r$  es la permitividad eléctrica del sustrato,  $c$  es la velocidad de la luz en el espacio libre,  $h$  la altura del sustrato y  $\Delta L$  es la variación de la longitud. Lo descrito arriba es el método analítico para hallar  $W$  conociendo  $\epsilon_r$ . Para este caso, se calculó las

dimensiones de la línea de transmisión y se obtuvo  $W = 1,53$  mm y  $L = 3,94$  mm.

El método descrito corresponde a un procedimiento analítico basado en líneas de transmisión. Dicho método, a pesar de ser muy preciso no es apropiado para este caso, la optimización de dicho método para la geometría en estudio, puede ser tema de otro trabajo de investigación. Sin embargo, en la presente tesis nos enfocaremos en optimizar los resultados usando el método de onda completa, proporcionado por los simuladores comerciales. Para la optimización de la antena de parches serial, se utiliza 8 variables de las dimensiones geométricas en la antena. La Tabla 3.1 describen las longitudes de cada antena patch con su respectiva variable y en la Fig 3.3 se muestra la geometría de la antena con la ubicación de las 8 variables.

Tabla 3.1

*Dimensiones de la antena*

Variables	Descripción
$W_1$	Longitud del 1 y 8 parche
$W_2$	Longitud del 2 y 7 parche
$W_3$	Longitud del 3 y 6 parche
$W_4$	Longitud del 4 y 5 parche
$L_1$	Distancia entre parches 1 y 2, también 7 y 8
$L_2$	Distancia entre parches 2 y 3, también 6 y 7
$L_3$	Distancia entre parches 3 y 4, también 5 y 6
$L_4$	Distancia entre parches 4 y 5

En la Fig. 3.5 se detalla el procedimiento de la obtención de los parámetros con su evaluación en la función objetivo. Primero se establece las dimensiones geométricas (8 variables) iniciales utilizando una rutina en Matlab para obtener la geometría de la antena. Luego dicha geometría se envía por macros al simulador electromagnético donde se construye la antena en 3D y después de una simulación se obtiene los resultados de siete parámetros característicos de antena. Por último, los valores de los parámetros son procesados en Matlab para su evaluación en la función objetivo.

### Caso inicial

Para una comparación efectiva de los tres algoritmos (BA, PSO, GA) se estableció 20 antenas iniciales que serán utilizados en dos casos; uno donde se da prioridad a  $BW$  y otro donde se prioriza  $G$ . Cada una de las 20 antenas utiliza 8 dimensiones que fueron generadas aleatoriamente, donde el valor de  $L$  y  $W$  se encuentra en el rango de [3-5]. Estos valores son utilizados en los tres algoritmos como caso inicial, con el objetivo de que dichos algoritmos empiecen con los mismos valores de la función objetivo para hacer posible una comparación.

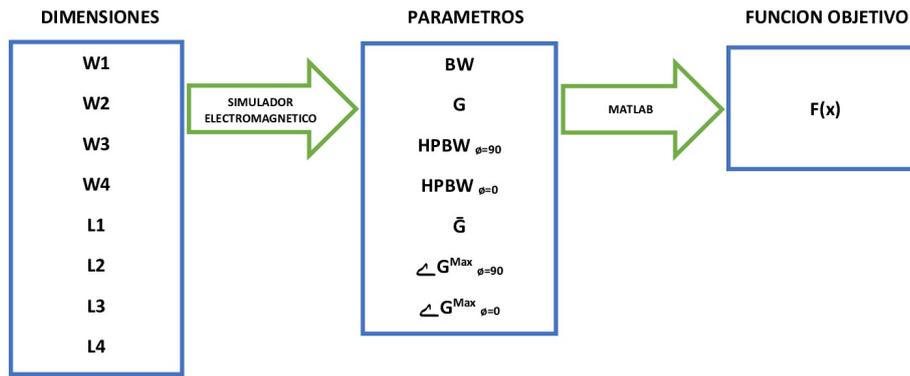


Figura 3.5. Mejorar la grafica  
Fuente: Elaboración propia

Los valores aleatorios se detalla en la tabla3.3. En la última fila de dicha tabla se muestra la variación de cada variable, acercándose a los limites establecidos.

Las antenas fueron simuladas en el software para obtener sus parámetros de antena y con Matlab se calcula el valor de la función objetivo siguiendo el diagrama de bloques de la Fig. 3.5. Con cada antena, la primera condición que debe cumplir es encontrar un mínimo ancho de banda. Para esto se evalúa el coeficiente de reflexión que se obtiene en el simulador a través del parámetro  $|S_{11}|$  en dB, y este debe ser menor a -10dB. Por consiguiente, el ancho de banda, se define en un rango de frecuencias de  $f_{min}^D$  a  $f_{max}^D$  donde el parámetro  $|S_{11}|$  este por debajo de  $|S_{11}^{min}| = -10$  dB. En otras palabras, la antena debe operar dentro de dicho rango de frecuencias deseado  $\in [f_{min}^D, f_{max}^D]$ . Para los efectos de estas optimizaciones usamos la banda N261 definida por la comisión federal de comunicaciones de Estados Unidos o FCC que regula el espectro de comunicaciones móviles de 5G (3GPP, 2021). La banda mencionada abarca las frecuencias de 27.5 GHz hasta 28.25 GHz. Para nuestro algoritmo, solo se acepta una nueva solución si la curva de  $|S_{11}|$  es menor que -10 dB en la región [27.8,28.2] GHz. Caso contrario se descarta el valor de la dimensión. Además, se genera otras dimensiones aleatoriamente obviando las condiciones posteriores y se asigna un valor de penalidad a la función objetivo de  $F(x_i) = 25$ , para indicar que la solución obtenida esta muy lejos de los deseado.

Una vez cumplida la primera condición, se procede a evaluar la segunda, la cual consiste en analizar el parámetro  $\angle G_{\phi=0}^{max_{\phi=i}}$  y  $\angle G_{\phi=90}^{max_{\phi=i}}$  que debe ser como máximo 3 grados para que se acepte el valor de  $HPBW_{\phi=0}$  y  $HPBW_{\phi=90}$ , que son obtenidos del simulador, caso contrario se le asigna un valor de penalidad a  $HPBW_{\phi=0} = 90$  y  $HPBW_{\phi=90} = 50$ , similar a

la primera condición.

La tercera condición analiza el parámetro  $\bar{G}$ , si el valor de  $\bar{G} \notin [0 \ 1]$  se le asigna una penalidad con el valor de  $\bar{G} = 1$ . Los valores de las penalidades son altos, con el fin de que el valor de la función objetivo se eleve y la antena pueda ser cambiada con facilidad en la siguiente iteración. Dicho análisis de los parámetros se describe en el pseudo código mostrado en la Tabla 3.2 y será utilizado en los tres algoritmos. Una vez satisfechas todas las condiciones requeridas para los parámetros, se procede a evaluar los siete parámetros en la función objetivo utilizando la Eq. 3.1.

Tabla 3.2

*Pseudo código del análisis de los parámetros*

<b>Pseudo código del análisis de los parámetros</b>
<b>if</b> ( $ S_{11}  < -10_{dB}$ ) y ( $27,8_{GHz} \leq  S_{11}  \leq 28,2_{GHz}$ ) <b>if</b> ( $AG_{Phi^0} \leq 3^\circ$ ) Acepta el valor de $HPBW_{\phi=0}$ del simulador <b>else</b> Se asigna $HPBW_{\phi=0} = 90$ <b>end if</b> <b>if</b> ( $AG_{Phi^{90}} \leq 3^\circ$ ) Acepta el valor de $HPBW_{\phi=90}$ del simulador <b>else</b> Se asigna $HPBW_{\phi=90} = 50$ <b>end if</b> <b>if</b> ( $0 \leq \bar{G} \leq 1$ ) Acepta el valor de $\bar{G}$ <b>else</b> Se asigna $\bar{G} = 1$ <b>end if</b> Evalúa la función objetivo [ecuación 3.1] <b>end if</b>

El valor de la función objetivo de las 20 antenas iniciales se muestra en la Tabla 3.4 para las dos prioridades: ancho de banda y ganancia. También, las 20 antenas iniciales, solo el 15% cumple la condición del  $BW$ . En la tabla mencionada anteriormente, en la fila  $Ant_4$  el valor 22.888 y 13.674 se tomará como valor inicial de la función objetivo en el caso de prioridad  $BW$  y  $G$ , respectivamente, para los tres algoritmos.

Tabla 3.3

Dimensiones iniciales de las antenas

DIMENSIONES INICIALES DE LAS ANTENAS									
	Dimensiones								
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	
<i>Ant</i> <sub>1</sub>	3.9128	4.1803	4.6848	4.7328	4.4342	4.6939	3.2769	3.2684	
<i>Ant</i> <sub>2</sub>	3.7779	3.9362	3.5693	4.70613	3.9123	3.4042	4.6681	3.0045	
<i>Ant</i> <sub>3</sub>	3.7466	4.1419	3.0387	3.9704	3.398	3.7291	3.7283	4.0748	
<i>Ant</i> <sub>4</sub>	3.8268	3.1586	3.0053	4.0841	4.2229	4.7241	3.7122	4.6944	
<i>Ant</i> <sub>5</sub>	4.5164	3.2658	4.1145	3.7438	3.8981	3.9332	3.3596	3.705	
<i>Ant</i> <sub>6</sub>	4.9678	4.7279	4.8699	3.6051	3.7978	4.1233	3.2418	3.5156	
<i>Ant</i> <sub>7</sub>	4.8324	3.3988	3.9738	4.2024	4.1149	4.7458	4.48442	3.6502	
<i>Ant</i> <sub>8</sub>	4.256	3.952	3.0019	3.147	3.9171	4.1844	3.8345	4.4047	
<i>Ant</i> <sub>9</sub>	3.1049	4.6131	4.6403	3.6959	4.9942	3.5563	3.9684	4.5664	
<i>Ant</i> <sub>10</sub>	3.9569	3.5035	3.6403	4.2265	4.4728	4.9827	3.0396	4.8137	
<i>Ant</i> <sub>11</sub>	3.965	4.1732	4.6194	3.7696	4.3178	4.22	4.094	3.405	
<i>Ant</i> <sub>12</sub>	4.1429	4.47336	3.2284	3.6996	3.9731	3.2273	4.4702	4.0887	
<i>Ant</i> <sub>13</sub>	3.4591	4.0111	3.8918	4.1708	4.6768	3.7951	4.6007	3.5722	
<i>Ant</i> <sub>14</sub>	3.9052	4.0705	4.6401	4.6869	3.6051	4.7352	4.0125	4.1462	
<i>Ant</i> <sub>15</sub>	3.5691	4.7728	3.3229	3.8219	4.4027	3.782	4.6657	4.7169	
<i>Ant</i> <sub>16</sub>	3.5703	3.5458	3.953	3.1944	4.3651	4.7659	4.8415	4.9267	
<i>Ant</i> <sub>17</sub>	3.1055	3.5135	4.9783	4.6156	3.4985	3.8156	3.3576	4.4187	
<i>Ant</i> <sub>18</sub>	3.4597	3.5238	4.2388	3.1784	3.6275	3.5516	3.9466	3.1312	
<i>Ant</i> <sub>19</sub>	4.5611	4.0755	4.4824	4.9746	3.36	3.2152	4.0943	3.4105	
<i>Ant</i> <sub>20</sub>	4.2994	3.1045	4.4283	4.1473	3.196	4.1282	3.3081	3.9092	
Variación	[3.10 - 4.96]	[3.10 - 4.77]	[3.00 - 4.97]	[3.14 - 4.97]	[3.19 - 4.99]	[3.21 - 4.98]	[3.03 - 4.84]	[3.00 - 4.92]	

Tabla 3.4

Parámetros iniciales de las antenas

PARÁMETROS INICIALES DE LAS ANTENAS										
	Parámetros									
	BW	G	$\delta G_{\theta=1}$	$HPBW_{\phi=90}$	$HPBW_{\phi=0}$	$\angle G_{\phi=90}^{max\phi}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\phi}$	Prioridad BW	Prioridad G	
<i>Ant</i> <sub>1</sub>	0	14.3832	1	50	90	19	33	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>2</sub>	0	14.3394	0.7750	50	73	13	1	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>3</sub>	0	15.2926	0.6087	50	71	4	1	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>4</sub>	159	15.1404	1	50	90	10	18	22.888	13.6742	13.6742
<i>Ant</i> <sub>5</sub>	0	14.6810	1	50	90	7	16	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>6</sub>	0	10.7781	1	50	90	16	16	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>7</sub>	0	15.2449	1	50	90	16	4	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>8</sub>	0	15.3519	1	50	77	6	1	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>9</sub>	60	13.1731	0.5901	50	90	16	1	23.5109	14.4152	14.4152
<i>Ant</i> <sub>10</sub>	0	14.8183	1	50	90	16	17	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>11</sub>	0	14.6163	1	50	97	17	1	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>12</sub>	0	15.2486	1	50	90	9	67	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>13</sub>	0	14.6777	1	50	37	17	1	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>14</sub>	0	14.8753	1	50	69	21	1	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>15</sub>	0	14.3989	0.3520	50	90	17	29	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>16</sub>	0	14.5160	1	50	90	16	36	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>17</sub>	0	11.5460	0.2341	50	90	15	37	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>18</sub>	0	16.2602	0.1272	9	71	1	1	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>19</sub>	0	11.9072	0.1142	50	90	15	4	25	25	25
<i>Ant</i> <sub>20</sub>	114	13.8414	1	50	90	9	64	24.0923	14.9525	14.9525
%	15	100	35	5	35	5	40	15	15	15

## Análisis de la obtención del ancho de banda con los parámetros S

Para el análisis del ancho de banda se eligió un solo canal de 5G mmW de 750 MHz al rededor de 28 GHz como requerimiento mínimo. Es así que se extrae los valores de  $S_{11}$  del simulador, en el rango de 26.5GHz hasta 29.5GHz. Los valores son transformados en dimensiones de decibelios dB para la representación del coeficiente de reflexión  $|S_{11}|_{dB}$  en el eje de ordenada y frecuencia en el eje de la abscisa. Para la obtención del ancho de banda se segmenta por regiones siendo 28 GHz el eje central. En la Fig. 3.6 se escoge inicialmente una región de 200 MHz, es decir, se escoge una región de 27,9 GHz hasta 28.1 GHz (amarillo). Si la curva de  $|S_{11}|_{dB}$  que esta en la región amarilla es menor a -10dB, se aumenta 100 MHz en ambos extremos siendo la segunda región de 27,8 GHz hasta 28.2 GHz (verde). Si la curva de  $|S_{11}|_{dB}$  sigue siendo menor a -10dB se escoge la región celeste de 27,7 GHz hasta 28.3 GHz. Se seguirá expandiendo la región 100 MHz hasta que  $|S_{11}|_{dB}$  en cualquier extremo hasta que ya no sea menor a -10dB.

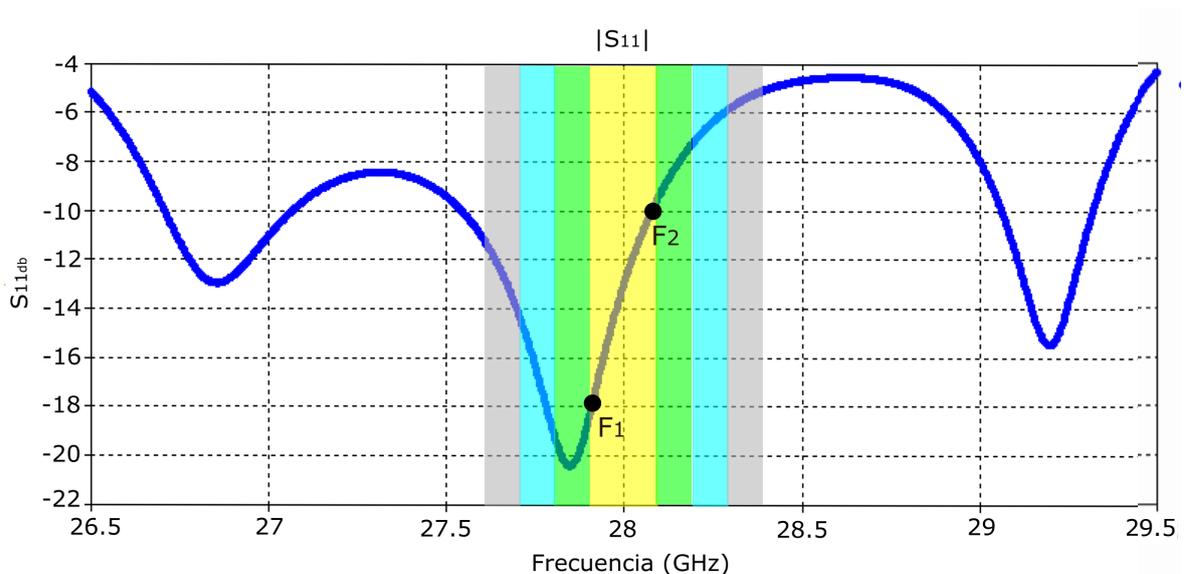


Figura 3.6. Selección de la región para el BW

Fuente: Elaboración propia

Se tomó como referencia el resultado de  $Ant_4$  de la Tabla 3.4 para la Fig. 3.6. En dicha figura la curva  $|S_{11}|_{dB}$  solo se quedó en la región amarilla debido a que  $F_2 = 28.05$  GHz llegó al límite de -10 dB.  $F_1$  toma el valor del límite de la región amarilla, es decir 27.9 GHz. El ancho de banda obtenido es la diferencia de  $F_2$  con  $F_1$  siendo  $BW = 159 MHz$ .

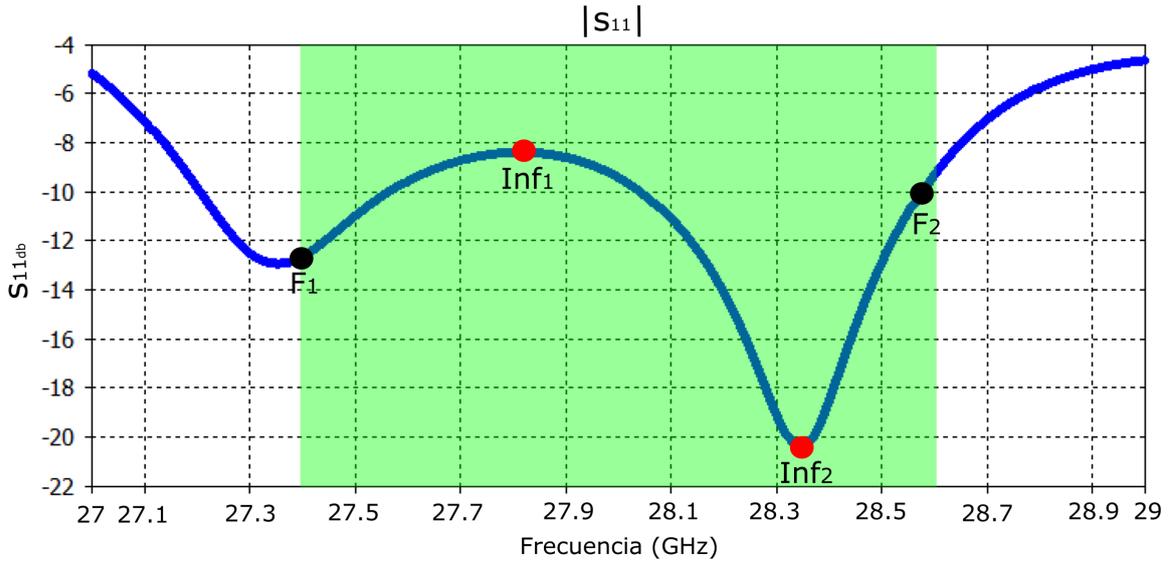


Figura 3.7. Error en la selección de regiones de BW

Fuente: Elaboración propia

El fin de dividir la curva  $|S_{11}|_{dB}$  en tramos de frecuencias tiene la finalidad de evitar que inflexiones  $Inf_i$  crucen el  $|S_{11}|_{dB} = -10dB$  más de una vez obteniendo un BW erróneo. En la Fig. 3.7 se muestra dicho error de la inflexión. Si se escogiera solo la región de 27.4GHz hasta 28.6GHz, escogiendo los puntos extremos ( $F_1$  y  $F_2$ ) para la obtención del BW se obtendría un BW = 1.2GHz, pero toda la curva no esta por debajo de  $|S_{11}|_{dB} = -10dB$  a causa de  $Inf_1 = -8.37dB$ .

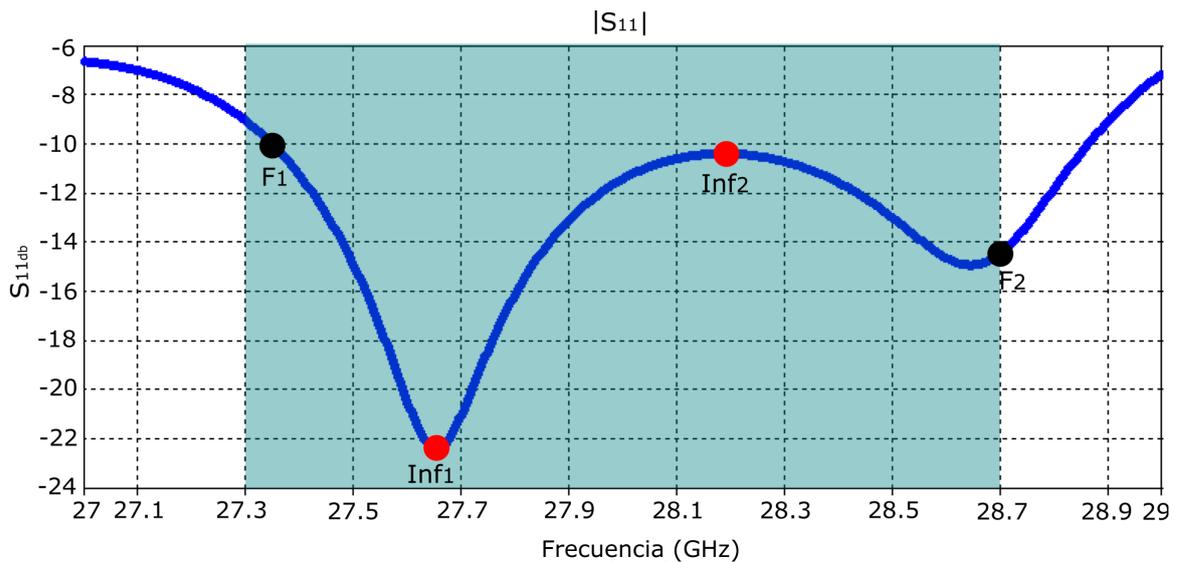


Figura 3.8. Análisis de inflexiones

Fuente: Elaboración propia

El análisis de los segmentos puede evitar los errores producidos por puntos de inflexión que cruzan más de una vez el límite  $|S_{11}| = -10$  dB pero no analiza los valores de las inflexiones que se encuentran en el segmento. En la Fig. 3.8 se visualizan las inflexiones ( $Inf_i$ ) que no cruzan el límite -10 dB. La inflexión  $Inf_2 = -10.1$  dB cumple la condición del límite pero es un resultado no tan satisfactorio. Para evitar dicho resultado, se agregó a los segmentos el análisis de las inflexiones. Dicho análisis consiste en escoger primero el segmento. Luego en la curva  $|S_{11}|$  que se encuentra en el segmento se analiza el valor de cada punto y se guarda los valores de las inflexiones en un vector  $POS_x$ . Los valores admitidos de las inflexiones deben ser menores a -10.5 dB. El primer valor de  $POS_x$  es el valor de  $F_1$  y el último es  $F_2$ .

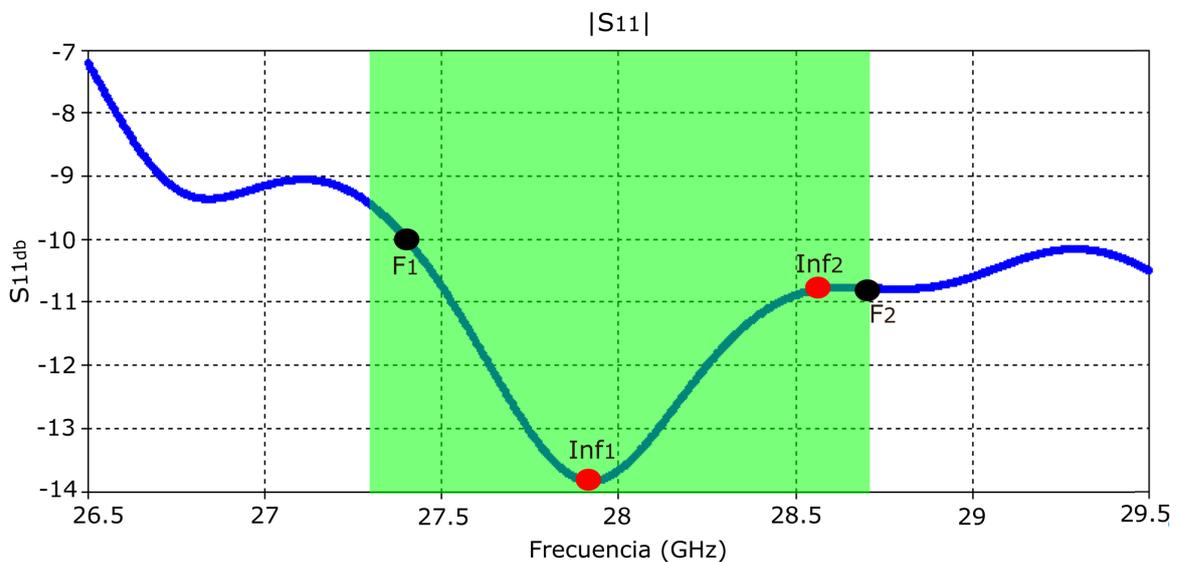


Figura 3.9. Selección de región y de inflexiones

Fuente: Elaboración propia

Se escogió como referencia el resultado  $Int_3$  de la Tabla 6.9 del anexo 2 para la Fig. 3.9. En dicha figura la curva  $|S_{11}|_{dB}$  solo se quedó en la región verde de 27.4 GHz hasta 28.6 GHz debido a que  $F_1 = 27.469$  GHz llegó al límite de -10 dB.  $F_1$  obtiene el valor del límite de la región, es decir 28.6 GHz. En dicha figura se obtiene dos puntos de inflexiones  $Inf_1 = -13.83$  dB y  $Inf_2 = -10.76$  dB cumpliendo la condición de ser menor a -10.5 dB. Para la obtención del  $BW$  se escoge el vector  $POS_x$  y se resta el último valor con el primero obteniendo un  $BW = 1.131$  GHz.

### Análisis de la obtención de la ganancia máxima

Para la obtención de la ganancia máxima ( $G_{max}$ ) se debe extraer del simulador electromagnético la matriz que contiene las componentes vectoriales de la ganancia, es decir  $G^\theta$  y  $G^\phi$  distribuidas en 3 dimensiones para variaciones de los ángulos  $\theta \in [-180^\circ - 180^\circ]$  y  $\phi \in [0^\circ - 360^\circ]$ . Con las componentes de la Ganancia  $G^\theta$  y  $G^\phi$  se obtiene la matriz  $G^{total}$  conteniendo  $\theta \times \phi$  valores y usando Matlab se escoge el valor máximo de dicha matriz siendo este valor, la ganancia máxima de la antena  $G_{max}$ .

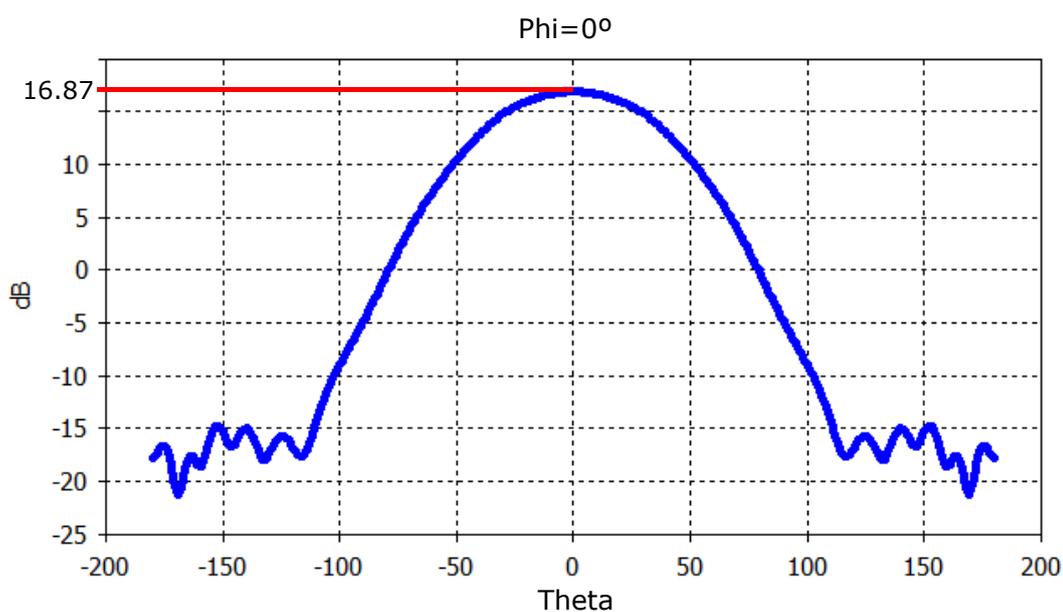


Figura 3.10. Ganancia máxima

Fuente: Elaboración propia

Con fines ilustrativos se muestra la Fig. 3.10 ya que contiene el resultado de  $Int_{20}$  de la Tabla 6.5. En dicha figura se gráfica la ganancia  $G(\phi = 0^\circ)$  a lo largo de  $\theta$  variando de  $-180^\circ$  hasta  $180^\circ$ . La ganancia máxima es el punto más alto de la curva siendo  $G_{max} = 16,87dB$ . Si se escoge  $\phi$  con otro valor, la ganancia máxima será la misma.

### Análisis de $\delta\overline{G}_{\theta=1}$

Para obtener el valor de  $\delta\overline{G}_{\theta=1}$ , primero se extrae del simulador electromagnético la matriz  $\theta \times \phi$  que contiene las componentes vectoriales de la ganancia, es decir,  $G^\theta$  y  $G^\phi$  para variaciones de los ángulos  $\phi \in [(-180^\circ) - 180^\circ]$  y  $\theta = 1^\circ$ . Luego, usando Matlab se extrae el valor máximo  $G_{\theta=1^\circ}^{max}$  y el promedio  $G_{\theta=1^\circ}^{prom}$  de dicha matriz. Por último, la diferencia de dichos valores se obtiene  $\delta\overline{G}_{\theta=1}$ .

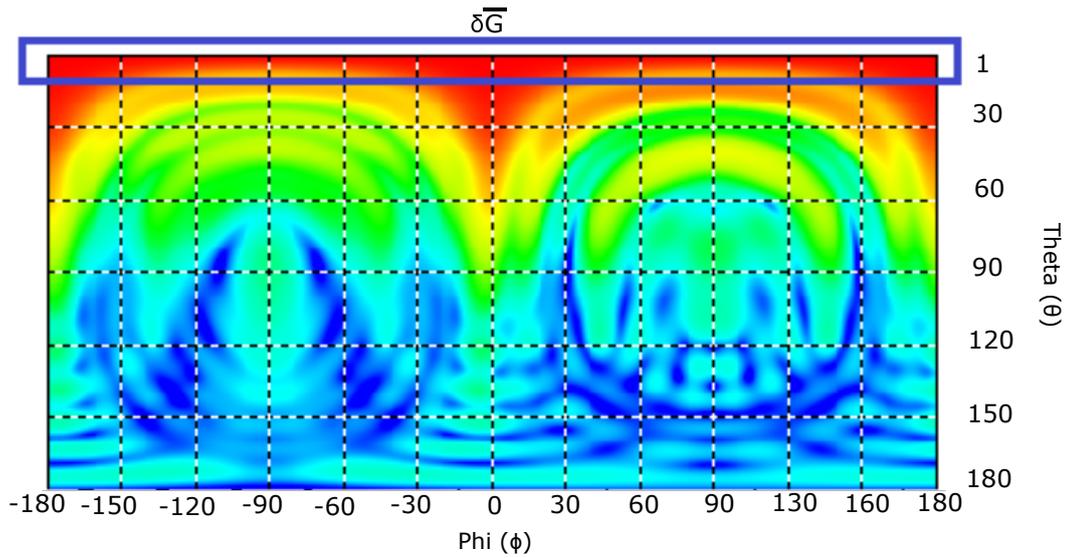


Figura 3.11. Parámetro  $\delta\bar{G}_{\theta=1}$   
 Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 3.11, se enmarcó con un recuadro azul los valores de las componentes  $\phi \in [(-180^\circ) - 180^\circ]$  y  $\theta = 1^\circ$ . La región encerrada son los valores de las ganancias para obtener  $\delta\bar{G}_{D\theta=1}$ .

### Análisis del ángulo de ganancia máxima

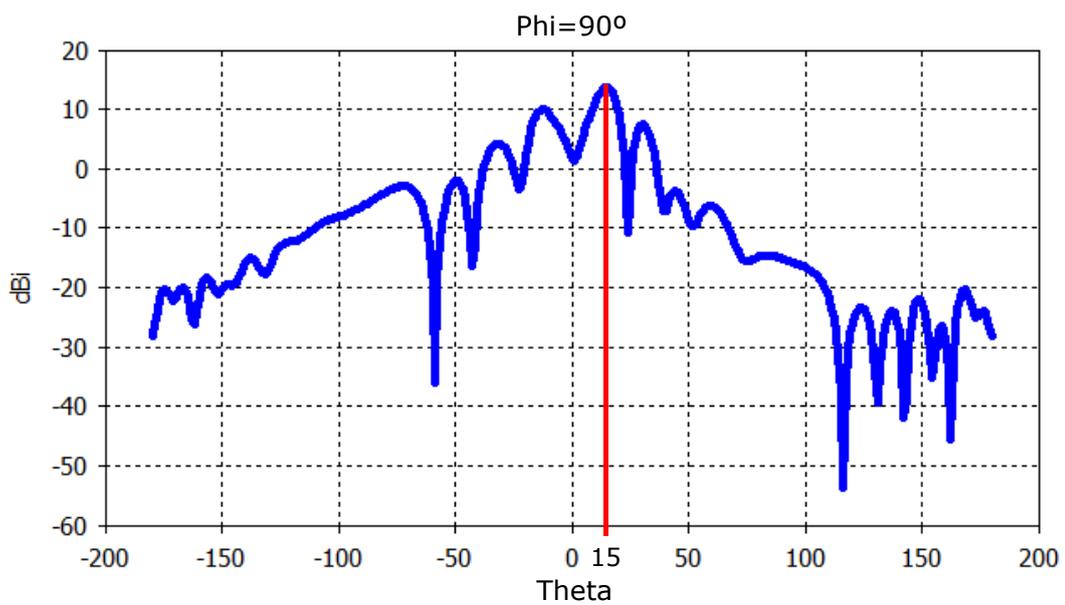


Figura 3.12. Ángulo de ganancia máxima  
 Fuente: Elaboración propia

Para la obtención del ángulo  $\angle G^{max}$ , primero se debe determinar la ganancia máxima, luego determinar a que grado de  $\theta$  se encuentra dicha ganancia. Si se obtiene el grado negativo de  $\theta$ , se aplicará su valor absoluto.

En la Fig. 3.12 se grafica el resultado de  $Ant_{\theta}$  de la Tabla 3.4. Ubicando la ganancia máxima, se determina el ángulo siendo  $\angle G^{max} = 15^{\circ}$

### Análisis de la obtención ancho de haz

Con los mismos datos obtenidos de la matriz  $G^{total}$  de  $\theta$  x  $\phi$  elementos, se debe obtener primero la ganancia máxima  $G_{max}$ . Una vez ubicado el valor de  $G_{max}$ , se resta 3dB y con este valor obtenido se encuentra en que puntos intercepta con la gráfica de la ganancia. Estas dos interceptaciones permiten ubicar dos valores de  $\theta$ . Finalmente, para obtener el ancho de haz  $HPBW$ , solo se debe restar los dos valores mencionados de  $\theta$ . Dicho proceso se realiza para los planos  $\phi = 0^{\circ}$  y  $\phi = 90^{\circ}$

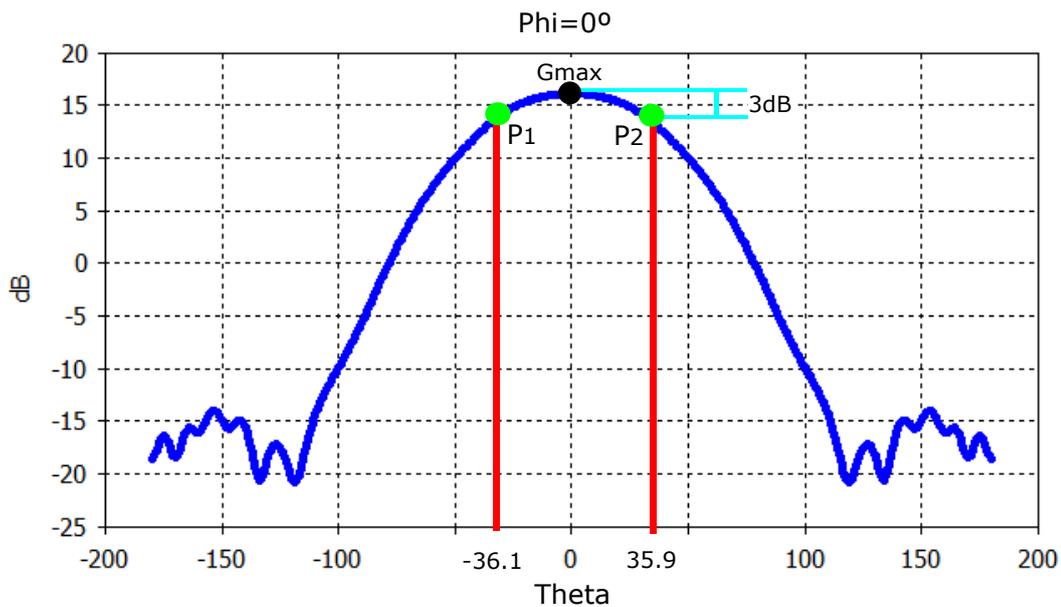


Figura 3.13. Ancho de Haz

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 3.13 se grafica el resultado de  $Int_{20}$  de la Tabla 6.3. Primero se ubicó  $G_{max} = 16.4733$  dB, se le restó 3dB obteniendo el valor de 13.4733 dB. Se ubicó las dos coordenadas con la abscisa 13.4733 dB siendo  $P_1 = (13.4733 ; -36.1)$  y  $P_2 = (13.4733 ; 35.9)$ . Con los dos valores de la ordenadas se resta obteniendo  $HPBW_{\phi=0} = 72^{\circ}$ .

### 3.2.3. Implementación y prueba del algoritmo BA en diseño de antena

Antes de dar inicio a la descripción del algoritmo, primero se define el parámetro de prioridad para establecer los pesos de la función objetivo. Para esta implementación del algoritmo, la posición de un murciélago representa las dimensiones de una antena. Usando estas dimensiones geométricas se obtienen los parámetros característicos de una antena a través del simulador electromagnético. El algoritmo se inicia con una población de 20 murciélagos (antenas). Para esto, se define el límite mínimo  $L_b$  y máximo  $U_b$  de las dimensiones, el valor de la frecuencia mínima  $Q_{min}$ , frecuencia máxima  $Q_{max}$ , frecuencia inicial  $Q_0$ , volumen del pulso  $A$ , velocidad inicial  $v_0$ , emisión de pulso inicial  $r_0$ , emisión de pulso  $r$ , el factor de atenuación  $\alpha$ , factor de mejora de la emisión de pulso  $\gamma$ , número de iteraciones  $N_{int}$  y el radio vector  $W_B$ . Es necesario mencionar que las frecuencias  $Q_0$ ,  $Q_{min}$  y  $Q_{max}$  se refieren al rango de frecuencias del sonido que emiten los murciélagos, estas son diferentes al rango de operación de las antenas. Una vez establecidos dichos parámetros que se muestran en la Tabla 3.5, se generan aleatoriamente la frecuencia  $Q_i$  y la velocidad  $v_i$  del murciélago-antena utilizando la Eq. 2.9 y la Eq. 2.10.

Tabla 3.5  
Parámetros del BA para la optimización

Parámetro	Valor	Descripción
$n$	20	Población de murciélagos
$d$	8	Dimensión
$L_b$	3	Límite mínimo
$U_b$	5	Límite máximo
$Q_{min}$	1	Frecuencia mínima
$Q_{max}$	2	Frecuencia máxima
$Q_0$	0	Frecuencia inicial
$A$	0.9	volumen del pulso
$v_0$	0	Velocidad inicial
$r_0$	0.001	Emisión de pulso inicial
$r$	[0 1]	Emisión de pulso
$\alpha$	0.9	Factor de atenuación
$\gamma$	0.9	Factor de mejora de la frecuencia de pulso
$N_{int}$	30	Número de iteraciones
$W_B$	[-0.9 0.9]	Vector variable

Los valores iniciales de la Tabla 3.3 con los parámetros del algoritmo siguen el proceso de la Fig. 3.5. Se extrae los valores de los parámetros de la antena para ser analizados (Tabla 3.2) y obtener el valor de la función objetivo utilizando la Eq. 3.1. El menor valor obtenido

de dicha función se le denomina como  $F(best)$  y a las dimensiones del murciélago-antena como  $x^*$ .

Una vez obtenido  $F(best)$ , el algoritmo de optimización ingresa a un bucle definido por una cantidad de iteraciones definidas previamente (30 iteraciones). En dicho bucle se genera aleatoriamente nuevas dimensiones, frecuencias y velocidad del murciélago-antena utilizando las Eq. 2.8, Eq. 2.9 y Eq. 2.10. A la par, se genera un número aleatorio  $rand \in [0 \ 1]$ . Si se obtiene un número mayor al pulso  $r_i$ , se seleccionan los valores de las dimensiones del murciélago-antena ( $x^*$ ) para generar una nueva solución en torno a él, utilizando la Eq. 2.11 como se visualiza en la Fig. 3.14. Luego, las nuevas dimensiones de la siguiente generación de murciélagos se envía al simulador electromagnético para obtener los siete parámetros de antena. Los nuevos parámetros son analizados mediante el proceso de la Tabla 3.2. Por último, se evalúa su función objetivo  $F(x_i)$ .

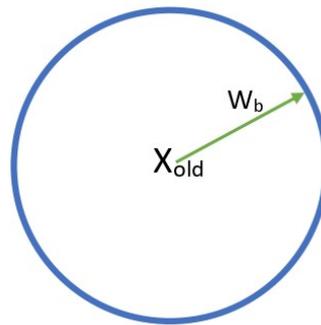
Tabla 3.6

*Pseudo código del algoritmo murciélago (BA)*

<b>Pseudo código del algoritmo murciélago (BA)</b>
Función Objetivo $F(x)$ , $x = x_1, x_2, \dots, x_n$
Inicia la población murciélago, $x_i$ ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Genera aleatoriamente la frecuencia $f_i$ y la velocidad $v_i$
Se extrae los parámetros de la antena
Se analiza los parámetros [tabla 3.2]
Evalúa la función objetivo [ecuación 3.1]
<b>while</b> (Número de iteraciones)
Genera nuevas frecuencias [ecuación 2.8]
Actualiza las posiciones y velocidad [ecuación 2.9 y 2.10]
<b>if</b> ( $rand > r_i$ )
Selecciona la mejor solución
Genera una solución local entorno a ella [ecuación 2.11]
<b>end if</b>
Se extrae los parámetros del simulador electromagnético
Se analiza los parámetros [tabla 3.2]
Evalúa la función objetivo [ecuación 3.1]
<b>if</b> ( $rand < A_i$ ) y ( $F(x_i) < F(best)$ )
Acepta la nueva solución
Actualiza $r_i$ y $A_i$ [ecuación 2.12 y 2.13]
<b>end if</b>
<b>end while</b>
Retorna la mejor solución $x^*$

Con el valor  $F(x_i)$  del murciélago-antena, se ingresa por una condición propia del algoritmo, la cual consiste en generar un valor aleatorio  $rand \in [0 \ 1]$ , evaluando dicho valor si es

menor al volumen del pulso  $A_i$ . Además, se evalúa si el valor de la función objetivo  $F(x_i)$  es inferior al valor de la mejor solución  $F(best)$  de la iteración anterior. De ser así, se acepta la nueva dimensión como la nueva mejor solución y se actualiza  $F(best)$ . Por otro lado, se actualiza la frecuencia de pulso  $r_i$  y el volumen del pulso  $A_i$  utilizando las Eq. 2.12 y 2.13. Este proceso se repite cíclicamente hasta que se cumple la cantidad de iteraciones indicadas previamente. Al finalizar las iteraciones, el algoritmo entrega la mejor solución obtenida. Dicho proceso se describe en el pseudo código mostrado en la Tabla 3.6.



*Figura 3.14.* Radio vector  
Fuente: Elaboración propia

Con fines ilustrativos en la Fig. 3.14 la variable  $W_B$  representa el radio y  $X_{old}$  el centro de la circunferencia. El algoritmo escoge un valor aleatorio en el área circular para obtener una dimensión cercana a  $x^*$ .

### **Análisis de resultados con prioridad BW**

Para recordar, en este caso se desea obtener un gran ancho de banda (BW), dejando como segundo plano el valor de la ganancia y la dirección del patrón de radiación debido a que es un parámetro muy difícil de mejorar. En la presente tesis se realizaron 20 intentos con 30 iteraciones cada una. Las dimensiones y valores de los parámetros obtenidos en cada intento se encuentran en la Tabla 6.1 y 6.2. El mejor resultado de los intentos es el  $int_{13}$  de las tablas mencionadas anteriormente. En dicho intento se tienen las 20 antenas optimizadas, resultado de las 30 iteraciones. En la Tabla 3.9 se detallan los parámetros de las 20 antenas que se obtuvieron. En la penúltima fila (%) de dicha tabla, se muestra un 80% de las antenas que cumplieron la primera condición del ancho de banda. En la segunda condición solo cumplió el 80% y en la tercera condición solo se llegó a 75% en el caso de  $HPBW_{\phi=90}$  con  $\angle G_{\phi=90}^{max_{oi}}$ , pero en los parámetros restantes se llegó al 100%. El menor valor objetivo de las 20 antenas

lo tiene la  $Ant_{18}$  con  $F(x) = 4,6291$  resaltado de gris. En la última fila se detalla los mejores parámetros obtenidos con su valor objetivo.

Haciendo referencia a los parámetros iniciales de la tabla 3.4 se evidencia un gran aumento de 65 % que cumple la primera condición. Un aumento de 45 % en la segunda condición. En los parámetros  $HPBW_{\phi=90}$ ,  $HPBW_{\phi=0}$ ,  $\angle G_{\phi=90}^{max_{O^i}}$ ,  $\angle G_{\phi=0}^{max_{O^i}}$  se obtuvo un aumento de 70 %, 65 %, 70 %, 60 % respectivamente. En el caso del valor objetivo incremento en 60 %.

Para considerar que una antena cumplió con los requerimientos mínimos, se definió que el valor objetivo obtenido debe oscilar en el intervalo [0 - 10]. Dicho intervalo es escogido porque los valores de los parámetros empiezan a mejorar según las pruebas realizadas al comienzo de la tesis. En la tabla 3.7 se recopila los valores objetivos en intervalos de 5 para un mejor análisis. En dicha tabla, el 45 % de los valores de la función objetivos son mayores  $F(x) > 10$ . Además, la mitad de la población se concentra en el intervalo  $\langle 5 - 10 \rangle$  y un pequeño porcentaje del 5 % son menores  $F(x) < 5$ .

Tabla 3.7

*Intervalos de cumplimiento BA de función objetivo con prioridad BW*

<b>F(x)</b>	<b>%</b>
$\langle 20 - 25 \rangle$	25
$\langle 15 - 20 \rangle$	20
$\langle 10 - 15 \rangle$	0
$\langle 5 - 10 \rangle$	50
[0 - 5]	5

En las dimensiones de las 20 antenas optimizadas que se muestra en la tabla 3.8, se obtuvo una reducción en la variación de las dimensiones. En la dimensión  $W_4$  el intervalo se redujo de [3.14 - 4.97] a [3.00 - 3.33] y en la dimensión  $L_3$  de [3.03 - 4.84] a [3.00 - 3.89] siendo las reducciones mas notable. La mejor medida obtenida  $X^*$  se muestra en la última fila de dicha tabla.

Tabla 3.8

Dimensiones óptimas de las antenas BA-BW

DIMENSIONES ÓPTIMAS DE LAS ANTENAS									
Dimensiones									
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	
<i>Ant</i> <sub>1</sub>	3.2175	3.2009	3.9211	3.0000	4.0176	3.7443	3.7189	4.7095	
<i>Ant</i> <sub>2</sub>	3.5518	3.2023	4.2171	3.3091	3.7505	3.5715	3.8529	4.3221	
<i>Ant</i> <sub>3</sub>	3.2531	3.0000	3.9703	3.0000	4.0992	3.7944	3.8950	5.0000	
<i>Ant</i> <sub>4</sub>	3.5388	3.6615	4.0480	3.0665	4.3932	3.8141	3.3041	5.0000	
<i>Ant</i> <sub>5</sub>	3.1581	3.3374	4.1837	3.0000	3.7692	3.5559	3.8168	4.6862	
<i>Ant</i> <sub>6</sub>	3.0000	3.4409	3.7695	3.0000	4.1309	3.5356	3.8477	4.4223	
<i>Ant</i> <sub>7</sub>	3.4338	3.5977	3.7209	3.0486	3.9131	4.0837	3.4392	4.5213	
<i>Ant</i> <sub>8</sub>	3.8452	3.6837	3.7485	3.0000	3.7755	4.2727	3.4452	4.3795	
<i>Ant</i> <sub>9</sub>	3.9902	3.9154	3.8367	3.0000	3.3959	4.5437	3.5942	4.2839	
<i>Ant</i> <sub>10</sub>	3.5198	4.1103	3.4759	3.0306	3.5148	4.3631	3.6737	4.4532	
<i>Ant</i> <sub>11</sub>	4.1971	3.2734	3.5969	3.0000	4.1257	3.8768	3.2280	4.2672	
<i>Ant</i> <sub>12</sub>	3.6062	3.5341	3.7150	3.0000	3.9035	4.4746	3.7195	4.5390	
<i>Ant</i> <sub>13</sub>	3.7397	3.5006	3.9846	3.0090	3.7472	3.9486	3.2171	3.9599	
<i>Ant</i> <sub>14</sub>	3.6300	3.6206	3.8736	3.1665	3.3582	3.8713	3.3294	4.0991	
<i>Ant</i> <sub>15</sub>	3.9263	3.6258	3.9854	3.0000	3.1495	4.1701	3.3703	3.8949	
<i>Ant</i> <sub>16</sub>	3.8870	3.6396	3.8064	3.0000	3.3567	3.7293	3.4332	4.3530	
<i>Ant</i> <sub>17</sub>	3.4942	3.2903	4.0098	3.3345	3.4516	3.7743	3.1210	4.3600	
<i>Ant</i> <sub>18</sub>	3.2592	3.8922	4.1343	3.0000	3.5400	3.7637	3.0609	4.0612	
<i>Ant</i> <sub>19</sub>	3.0000	3.5530	4.2746	3.0000	3.8615	3.5758	3.0000	4.3913	
<i>Ant</i> <sub>20</sub>	3.1947	3.9383	4.0742	3.0000	3.6654	3.6587	3.2810	3.7479	
Variación	[3.00 - 4.19]	[3.00 - 4.11]	[3.47 - 4.27]	[3.00 - 3.33]	[3.14 - 4.13]	[3.53 - 4.54]	[3.00 - 3.89]	[3.74 - 5.00]	
X*	3.2592	3.8922	4.1343	3.0000	3.5400	3.7637	3.0609	4.0612	

Tabla 3.9

Parámetros óptimos de las antenas BA-BW

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ANTENAS										
	Parámetros									Prioridad BW
	BW	$G$	$\delta\bar{G}_{\theta=1}$	$HPBW_{\phi=90}$	$HPBW_{\phi=0}$	$\angle G_{\phi=90}^{max\phi}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\phi}$			$F(x)$
<i>Ant</i> <sub>1</sub>	339	16.3152	0.4022	9	72	1	0			5.9752
<i>Ant</i> <sub>2</sub>	0	15.558	0.9285	50	74	4	0			25
<i>Ant</i> <sub>3</sub>	87	15.5139	1	50	75	4	0			17.5805
<i>Ant</i> <sub>4</sub>	378	14.0947	1	50	77	7	0			18.6753
<i>Ant</i> <sub>5</sub>	120	15.8392	0.545	10	72	2	0			6.4294
<i>Ant</i> <sub>6</sub>	300	16.002	0.3769	9	73	1	0			6.3404
<i>Ant</i> <sub>7</sub>	474	16.3376	0.4115	9	72	1	0			5.9577
<i>Ant</i> <sub>8</sub>	0	16.398	0.5291	9	71	2	0			25
<i>Ant</i> <sub>9</sub>	78	15.8185	0.8557	9	72	3	0			6.2833
<i>Ant</i> <sub>10</sub>	129	15.286	1	50	75	8	0			17.9419
<i>Ant</i> <sub>11</sub>	549	13.8707	0.5319	8	73	1	0			6.4996
<i>Ant</i> <sub>12</sub>	168	15.7843	1	50	76	8	0			18.1383
<i>Ant</i> <sub>13</sub>	0	16.628	0.1211	9	70	0	0			25
<i>Ant</i> <sub>14</sub>	252	16.6541	0.0767	9	70	0	0			5.2198
<i>Ant</i> <sub>15</sub>	0	16.2839	0.0978	9	70	0	0			25
<i>Ant</i> <sub>16</sub>	198	16.5042	0.0774	9	71	0	0			5.5552
<i>Ant</i> <sub>17</sub>	363	16.5721	0.0661	10	70	0	0			5.4746
<i>Ant</i> <sub>18</sub>	312	16.5760	0.0693	9	68	0	0			4.6291
<i>Ant</i> <sub>19</sub>	345	16.3787	0.0551	10	69	0	0			5.2145
<i>Ant</i> <sub>20</sub>	0	16.5775	0.0712	10	70	0	0			25
%	80	100	80	75	100	75	100			75
<i>F</i> ( <i>best</i> )	312	16.576	0.0693	9	68	0	0			4.6291

## Análisis de resultados con prioridad G

En esta prioridad se busca obtener una buena ganancia con el direccionamiento del patrón de radiación en  $\theta = 0^\circ$ , dejando de lado el valor del ancho de banda pero al menos contar con un poco de BW para que cumpla la primera condición. Las dimensiones y valores de los parámetros obtenidos en cada intento se encuentran en la Tabla 6.3 y 6.4. El mejor resultado de los intentos es el  $int_{18}$  de las tablas mencionadas anteriormente. En dicho intento se tienen las 20 antenas optimizadas, resultado de las 30 iteraciones. En la Tabla 3.12 se detallan los parámetros de las 20 antenas que se obtuvieron. En la penúltima fila (%) de dicha tabla, se muestra un 95 % de las antenas que cumplieron la primera y segunda condición. En la tercera condición se llegó a 95 % en el caso de  $HPBW_{\phi=90}$  con  $\angle G_{\phi=90}^{max_{oi}}$ , pero en los parámetros restantes se llegó al 100 %. El menor valor objetivo de las 20 antenas lo tiene la  $Ant_5$  con  $F(x) = 3,6407$  resaltado de gris. En la última fila se detalla los mejores parámetros obtenidos con su valor objetivo.

Haciendo referencia a los parámetros iniciales de la tabla 3.4 se evidencia un gran aumento de 80 % que cumple la primera condición. Un aumento de 60 % en la segunda condición. En los parámetros  $HPBW_{\phi=90}$ ,  $HPBW_{\phi=0}$ ,  $\angle G_{\phi=90}^{max_{oi}}$ ,  $\angle G_{\phi=0}^{max_{oi}}$  se obtuvo un aumento de 90 %, 65 %, 90 %, 60 % respectivamente. En el caso del valor objetivo se obtuvo un gran incremento de 80 %.

En la tabla 3.10 solo el 5 % de los valores objetivos son mayores  $F(x) > 10$ . El 95 % son valores objetivos aceptables por ser menores a 10. Además, el 85 % de la población se concentra en el intervalo  $[0 - 5]$ , aproximándose al objetivo de  $F(x) = 0$ .

Tabla 3.10

*Intervalos de cumplimiento BA de función objetivo con prioridad G*

F(x)	%
$\langle 20 - 25 \rangle$	5
$\langle 15 - 20 \rangle$	0
$\langle 10 - 15 \rangle$	0
$\langle 5 - 10 \rangle$	10
$[0 - 5]$	85

En la tabla 3.11, la dimensión  $W_3$  el intervalo se redujo de  $[3.00 - 4.97]$  a  $[3.00 - 4.13]$ , en la variable  $W_4$  se redujo de  $[3.14 - 4.97]$  a  $[3.00 - 3.52]$  y en la variable  $L_2$  de  $[3.21 - 4.98]$

a [3.00 - 3.76]. En el caso de la dimensión  $L_1$  los valores de dicha columna son menores de 4.0229 ( $Ant_{17}$ ). En resumen, las cuatro variables mencionadas, convergen en el intervalo [3.0 - 4.0].

Tabla 3.11

Dimensiones óptimas de las antenas BA-G

DIMENSIONES ÓPTIMAS DE LAS ANTENAS PRIORIDAD GAIN									
	Dimensiones								
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	
<i>Ant</i> <sub>1</sub>	3.5726	4.3632	3.1480	3.0000	3.5326	3.3671	3.8994	4.5194	
<i>Ant</i> <sub>2</sub>	3.8044	4.2759	3.2311	3.0000	3.3076	3.0000	4.1747	5.0000	
<i>Ant</i> <sub>3</sub>	3.4648	4.3438	3.1058	3.1529	3.6900	3.3576	3.5319	4.5012	
<i>Ant</i> <sub>4</sub>	3.5333	4.0582	3.2551	3.5237	3.5081	3.0000	3.3532	4.1065	
<i>Ant</i> <sub>5</sub>	3.2613	3.8942	4.1563	3.0000	3.6405	3.7637	3.0510	4.0802	
<i>Ant</i> <sub>6</sub>	3.5633	3.9693	3.6825	3.0000	3.0770	3.0000	3.7823	4.8987	
<i>Ant</i> <sub>7</sub>	3.3779	4.7411	3.0215	3.0000	3.6371	3.0000	3.9071	4.9877	
<i>Ant</i> <sub>8</sub>	3.7443	4.4222	3.1411	3.1647	3.5558	3.0000	4.0071	4.3275	
<i>Ant</i> <sub>9</sub>	3.3738	4.6252	3.3501	3.0170	3.6376	3.0182	3.5680	4.5883	
<i>Ant</i> <sub>10</sub>	3.7252	4.0891	3.5376	3.0000	3.3786	3.5031	3.4429	4.5735	
<i>Ant</i> <sub>11</sub>	3.2764	4.5925	3.0000	3.0000	3.7687	3.2877	3.9274	4.0131	
<i>Ant</i> <sub>12</sub>	3.5333	4.2651	3.5489	3.0000	3.3855	3.3783	4.2930	4.6472	
<i>Ant</i> <sub>13</sub>	3.0838	4.3730	3.0108	3.1107	3.9066	3.0603	4.3089	4.3198	
<i>Ant</i> <sub>14</sub>	3.2344	4.1359	3.0000	3.0000	3.7410	3.5665	4.2536	4.7544	
<i>Ant</i> <sub>15</sub>	3.3169	4.2397	3.0700	3.1820	3.5639	3.2840	3.8106	4.9913	
<i>Ant</i> <sub>16</sub>	3.7511	4.0831	3.1134	3.3377	3.5184	3.2891	3.3583	5.0000	
<i>Ant</i> <sub>17</sub>	3.0000	4.5510	3.0000	3.0000	4.0229	3.0000	3.9486	5.0000	
<i>Ant</i> <sub>18</sub>	3.3799	4.2714	3.0308	3.0000	3.4878	3.3268	4.0800	4.8339	
<i>Ant</i> <sub>19</sub>	3.5354	4.5845	3.0000	3.1752	3.3402	3.0000	3.8193	4.8568	
<i>Ant</i> <sub>20</sub>	3.4888	4.5330	3.0063	3.0000	3.2517	3.3253	3.8558	4.6525	
Variación	[3.00 - 3.80]	[3.87 - 4.74]	[3.00 - 4.13]	[3.00 - 3.52]	[3.07 - 4.02]	[3.00 - 3.76]	[3.06 - 4.29]	[3.80 - 5.00]	
X*	3.2613	3.8942	4.1563	3.0000	3.6405	3.7637	3.0510	4.0802	

Tabla 3.12  
 Parámetros óptimos de las antenas BA-G

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ANTENAS									
	Parámetros						Prioridad G		
	BW	G	$\delta\bar{G}_{\theta=1}$	HPBW $_{\phi=90}$	HPBW $_{\phi=0}$	$\angle G_{\phi=90}^{max\phi}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\phi}$	$F(x)$	
Ant <sub>1</sub>	87	16.6824	0.1253	9	70	0	0	4.1066	
Ant <sub>2</sub>	120	16.5159	0.1093	9	71	0	0	4.3375	
Ant <sub>3</sub>	306	16.6070	0.0666	9	70	0	0	4.0568	
Ant <sub>4</sub>	309	16.4620	0.1972	10	71	1	0	4.4787	
Ant <sub>5</sub>	315	16.6621	0.0752	9	68	0	0	3.6407	
Ant <sub>6</sub>	36	14.7101	0.1523	9	76	0	1	5.8363	
Ant <sub>7</sub>	189	16.2709	0.0985	10	71	0	0	4.4775	
Ant <sub>8</sub>	126	16.5975	0.0996	10	71	0	0	4.4148	
Ant <sub>9</sub>	39	16.3809	0.0629	10	70	0	0	4.2932	
Ant <sub>10</sub>	159	16.6722	0.0728	9	70	0	0	4.0849	
Ant <sub>11</sub>	198	16.3865	0.0781	9	71	0	0	4.3449	
Ant <sub>12</sub>	129	15.5767	1	50	74	5	0	9.7141	
Ant <sub>13</sub>	168	16.4104	0.1563	9	73	1	0	4.8318	
Ant <sub>14</sub>	165	16.5866	0.3358	9	71	1	0	4.3976	
Ant <sub>15</sub>	315	16.6659	0.1167	9	70	0	0	4.0419	
Ant <sub>16</sub>	339	16.5452	0.0732	9	70	0	0	4.0627	
Ant <sub>17</sub>	69	16.1425	0.1186	10	72	0	0	4.7466	
Ant <sub>18</sub>	0	16.5689	0.1180	9	71	0	0	25	
Ant <sub>19</sub>	174	16.2972	0.0762	10	71	0	0	4.4743	
Ant <sub>20</sub>	255	16.4624	0.0640	9	71	0	0	4.3081	
%	95	100	95	95	100	95	100	95	
F(best)	315	16.6621	0.0752	9	68	0	0	3.6407	

Recapitulando, la  $Ant_{18}$  de la prioridad  $BW$  cumple con la primera condición de contar con un ancho de banda en el rango solicitado con  $312MHz$ , también, cumple con la segunda condición, direccionando su máxima ganancia en  $\theta = 0^\circ$  y por último, la tercera condición por tener muy bajo el valor de  $\bar{G} = 0,0693$  indicando que casi todos los valores de la ganancia en  $\theta = 0^\circ$  es cercano a la ganancia máxima.

En la prioridad  $G$ , la  $Ant_5$  cumple con las tres condiciones, además es una de las antenas que tienen una gran ganancia e incluso es mayor que la ganancia de la prioridad  $BW$ . Además, tiene un ancho de banda de  $312MHz$  y direccionado en  $\theta = 0^\circ$ . Con dichos resultados, se puede afirmar que el algoritmo  $BA$  cumple el segundo objetivo específico de la presente tesis.

### 3.2.4. Implementación y prueba del algoritmo PSO

De manera similar al caso del algoritmo de murciélago, en la implementación del presente algoritmo, se inicia estableciendo una función objetivo que se representa mediante la Eq. 3.1. Así mismo, se define el parámetro de prioridad ( $G$  o  $BW$ ) para establecer los pesos de  $P_i$ . El algoritmo  $PSO$  inicia con una población de 20 partículas-antenas y con 8 dimensiones iniciales en cada partícula-antena. Luego, se define el número de iteraciones  $N_{it}$ , velocidad inicial  $v_0$ , límite mínimo  $L_b$  y máximo  $U_b$  de las dimensiones. Para la selección del peso de inercia y de los factores de corrección, se utilizará la constante de Clerc o factor de restricción de Clerc  $K$ . Dicho factor está descrito por la siguiente ecuación:

$$K = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \quad \varphi = C_1 + C_2, \quad \varphi > 4 \quad (3.7)$$

Donde la Eq. 2.16 quedaría simplificado por el factor de restricción.

$$v_i^{t+1} = K * [v_i^t + C_1 * rand * (P_{best_i}^t - x_i^t) + C_2 * rand * (G_{best}^t - x_i^t)] \quad (3.8)$$

Se define el valor de  $\varphi = 4.1$ , siendo el valor de  $C_1 = 2.05$ ,  $C_2 = 2.05$  y  $K = 0.729$  (Eberhart y Shi, 2000b). Una vez establecidos los parámetros que se muestran en la Tabla 3.13, se genera aleatoriamente la velocidad  $v$  de la partícula-antena utilizando la Eq. 3.8 y se obtiene la posición con la Eq. 2.17

Tabla 3.13  
*Parámetros del PSO para la optimización*

Parámetro	Valor	Descripción
$n$	20	Población de partículas
$d$	8	Dimensión
$L_b$	3	Limite mínimo
$U_b$	5	Limite máximo
$v_0$	0	Velocidad inicial
$K$	0.729	Factor de constricción
$C_1$	2.05	Factor de corrección local
$C_2$	2.05	Factor de corrección global
$N_{it}$	30	Número de iteraciones

En la Fig. 3.5 se detalla el procedimiento de la obtención de los parámetros de la antena con las dimensiones iniciales de la Tabla 3.3. Se analiza los parámetros mediante el proceso de la Tabla 3.2. Los valores de los parámetros obtenidos se evalúan en la función objetivo utilizando la Eq. 3.1, donde cada partícula guarda su valor inicial de la función objetivo con el nombre de  $P_{best}$  y se escoge la partícula que tenga el menor valor objetivo, denominándose  $G_{best}$ .

Una vez obtenido el  $P_{best}$  y  $G_{best}$ , el algoritmo de optimización ingresa a un bucle definido por una cantidad de iteraciones definidas previamente (30 iteraciones). En dicho bucle se genera aleatoriamente nuevas dimensiones y velocidad de la partícula-antena utilizando la Eq. 3.8 y Eq. 2.17. Luego, las nuevas dimensiones de la siguiente generación de partículas se envía al simulador electromagnético para obtener los parámetros de antena. Con los parámetros obtenidos se analiza nuevamente con el proceso de la Tabla 3.2. Por último, se evalúa la función objetivo  $F(x_i)$  de cada partícula.

Con el valor  $F(x_i)$  de la partícula-antena, se pasa por una nueva condición propia del algoritmo, la cual consiste en que si el nuevo valor  $F(x_i)$  de cada partícula-antena es menor a su  $P_{best}$ , entonces, se acepta la nueva solución y es el nuevo  $P_{best}$ , caso contrario se genera nuevas posiciones aleatorias. Además, si el valor  $F(x_i)$  es menor al  $G_{best}$  se aceptará como nueva solución global y será el nuevo  $G_{best}$ . Este proceso se repite cíclicamente hasta que se cumpla las 30 iteraciones indicadas previamente. Al finalizar las iteraciones, el algoritmo entrega el valor del  $G_{best}$ , siendo la mejor solución obtenida. Dicho proceso se describe en el pseudo código mostrado en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14

*Pseudo código del algoritmo PSO*

<b>Pseudo código del algoritmo PSO</b>
Función Objetivo $F(x)$ , $x = x_1, x_2, \dots, x_n$
Inicia la población de partículas, $x_i$ ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) y $v_i$
Extrae los parámetros de la antena
Analiza los parámetros [tabla 3.2]
Evalúa la función objetivo [ecuación 3.1]
Se escoge $P_{best}$ de cada partícula y $G_{best}$ de la población
<b>while</b> (Número de iteraciones)
Se actualiza la posición y velocidad [ecuación 2.16 y 2.17]
Se extrae los parámetros del simulador
Se analiza los parámetros [tabla 3.2]
Evalúa la función objetivo [ecuación 3.1]
<b>if</b> $F_x < P_{best_i}^{t-1}$
Se acepta la nueva posición $P_{best_i}$
<b>if</b> $F_x < G_{best}^{t-1}$
Se acepta la nueva posición $G_{best}$
<b>end if</b>
<b>else if</b>
Se genera una posición aleatoria
<b>end if</b>
<b>end while</b>
Retorna la mejor solución $G_{best}$

### **Análisis de resultados con prioridad BW**

Una vez mas se vuelve a recordar, en ese sentido, se desea obtener un gran ancho de banda (BW), dando poca prioridad el valor de la ganancia y la dirección del patrón de radiación. Las dimensiones y valores de los parámetros obtenidos en cada intento se encuentran en la Tabla 6.5 y 6.6. En este caso se obtuvo el  $int_{15}$  y  $int_{19}$  con el mejor resultado siendo iguales de las tablas mencionadas anteriormente.

Se escogió el intento  $int_{15}$  de las 20 antenas optimizadas, siendo resultado de las 30 iteraciones. En la Tabla 3.17 se detallan los parámetros de las 20 antenas que se obtuvieron. En la penúltima fila (%) de dicha tabla, se muestra que un 80% de las antenas cumplieron la primera condición y 45% la segunda condición. En la tercera condición se llegó a 40% en el caso de  $HPBW_{\phi=90}$  con  $\angle G_{\phi=90}^{max_{O^i}}$ , pero en los parámetros restantes se llegó al 60%. El menor valor objetivo de las 20 antenas lo tiene la  $Ant_{11}$  con  $F(x) = 5,1730$  resaltado de gris. En la última fila se detalla los mejores parámetros obtenidos con su valor objetivo.

Haciendo referencia a los parámetros iniciales de la tabla 3.4 se evidencia un gran aumento de 65 % que cumple la primera condición. Un pequeño aumento de 10 % en la segunda condición. En los parámetros  $HPBW_{\phi=90}$ ,  $HPBW_{\phi=0}$ ,  $\angle G_{\phi=90}^{max_{oi}}$ ,  $\angle G_{\phi=0}^{max_{oi}}$  se obtuvo un aumento de 35 %, 25 %, 35 %, 20 % respectivamente. En el caso del valor objetivo se obtuvo un gran incremento de 65 %.

En la tabla 3.15 el 60 % de los valores objetivos son mayores  $F(x) > 10$ . El 40 % son valores objetivos aceptables por ser menores a 10.

Tabla 3.15

*Intervalos de cumplimiento PSO de función objetivo con prioridad BW*

<b>F(x)</b>	<b>%</b>
$\langle 20 - 25 \rangle$	50
$\langle 15 - 20 \rangle$	10
$\langle 10 - 15 \rangle$	0
$\langle 5 - 10 \rangle$	40
$[0 - 5]$	0

En la tabla 3.16, el intervalo de la dimensión  $W_1$  se redujo de [3.10 - 4.96] a [3.10 - 3.78]; en el intervalo de la variable  $W_2$  se redujo de [3.10 - 4.77] a [3.27 - 4.03], en el caso de la variable  $L_2$  de [3.21 - 4.98] a [3.35 - 3.92] y en la dimensión  $L_3$  de [3.03 - 4.84] a [3.00 - 3.96]. En resumen, las cuatro dimensiones mencionadas, convergen en el intervalo [3.0 - 4.03]. La medida óptima que se encuentra en la última fila sus dimensiones se encuentran en el rango [3.53 - 3.63] con una diferencia de 0.1.

Tabla 3.16

Dimensiones óptimas de las antenas PSO-BW

DIMENSIONES ÓPTIMAS DE LAS ANTENAS PRIORIDAD BW									
Dimensiones									
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	
<i>Ant</i> <sub>1</sub>	3.1055	3.7722	4.9061	4.5043	3.8144	3.7824	3.6120	4.4913	
<i>Ant</i> <sub>2</sub>	3.2953	4.0377	4.4509	4.1789	4.1282	3.9299	3.7727	4.2160	
<i>Ant</i> <sub>3</sub>	3.7843	3.9106	4.3968	4.4098	4.0751	3.8802	3.9620	4.4036	
<i>Ant</i> <sub>4</sub>	3.1054	3.2750	4.3315	3.3324	3.4775	3.4371	3.3891	3.4427	
<i>Ant</i> <sub>5</sub>	3.1679	3.2946	4.4375	3.4559	3.2803	3.4117	3.0000	3.5665	
<i>Ant</i> <sub>6</sub>	3.2746	3.4091	3.9356	3.3696	3.4794	3.4230	3.3866	3.5300	
<i>Ant</i> <sub>7</sub>	3.2883	3.4566	3.8199	3.5008	3.5391	3.4799	3.5438	3.2966	
<i>Ant</i> <sub>8</sub>	3.1723	3.4359	3.9521	3.5163	3.3811	3.3921	3.3508	3.3031	
<i>Ant</i> <sub>9</sub>	3.2926	3.3410	4.2310	3.3194	3.4440	3.3908	3.3488	3.4454	
<i>Ant</i> <sub>10</sub>	3.2051	3.2974	3.7237	3.3241	3.4408	3.3513	3.3534	3.3899	
<i>Ant</i> <sub>11</sub>	3.5803	3.5476	3.5331	3.5472	3.5811	3.5697	3.6330	3.5328	
<i>Ant</i> <sub>12</sub>	3.6867	3.6735	4.1900	3.9441	3.7447	3.7055	3.5274	3.8425	
<i>Ant</i> <sub>13</sub>	3.1052	3.6181	4.4313	3.5204	4.1199	3.4977	3.7612	3.9494	
<i>Ant</i> <sub>14</sub>	3.4766	3.6229	4.2173	3.7808	3.7561	3.6949	3.7887	3.7176	
<i>Ant</i> <sub>15</sub>	3.1052	3.8780	4.4453	3.5174	3.8012	3.4966	3.6745	3.8556	
<i>Ant</i> <sub>16</sub>	3.2226	3.2905	4.0783	3.3259	3.4208	3.3434	3.3513	3.3923	
<i>Ant</i> <sub>17</sub>	3.2834	3.3449	3.9954	3.4890	3.5420	3.5422	3.3880	3.4263	
<i>Ant</i> <sub>18</sub>	3.1051	3.5321	4.5060	3.5303	4.0876	3.5074	3.4741	4.1263	
<i>Ant</i> <sub>19</sub>	3.2400	3.3054	3.7237	3.3264	3.3798	3.3767	3.3474	3.3745	
<i>Ant</i> <sub>20</sub>	3.1051	3.5666	4.5487	3.3181	4.1906	3.5253	3.5595	4.1370	
Variación	[3.10 - 3.78]	[3.27 - 4.03]	[3.53 - 4.90]	[3.31 - 4.50]	[3.28 - 4.19]	[3.35 - 3.92]	[3.00 - 3.96]	[3.30 - 4.40]	
X*	3.5803	3.5476	3.5331	3.5472	3.5811	3.5697	3.6330	3.5328	

Tabla 3.17

Parámetros óptimos de las antenas PSO-BW

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ANTENAS										
	Parámetros									Prioridad BW
	BW	G	$\delta\bar{G}_{\theta=1}$	HPBW $_{\phi=90}$	HPBW $_{\phi=0}$	$\angle G_{\phi=90}^{max\phi}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\phi}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\phi}$	$F(x)$	
<i>Ant</i> <sub>1</sub>	102	14.1211	0.6171	50	75	9	0	0	18.2384	
<i>Ant</i> <sub>2</sub>	195	15.4895	1	50	77	8	0	0	18.4946	
<i>Ant</i> <sub>3</sub>	1368	15.2439	1	50	89	8	0	0	22.0264	
<i>Ant</i> <sub>4</sub>	48	16.5938	0.1599	9	70	1	0	0	5.3364	
<i>Ant</i> <sub>5</sub>	75	15.2457	0.7553	9	74	3	1	1	7.0131	
<i>Ant</i> <sub>6</sub>	93	15.9824	0.3003	10	72	1	0	0	6.3112	
<i>Ant</i> <sub>7</sub>	369	16.6284	0.1409	9	71	1	0	0	5.5965	
<i>Ant</i> <sub>8</sub>	120	15.2743	0.6211	10	75	3	0	0	7.5262	
<i>Ant</i> <sub>9</sub>	363	16.3024	0.3024	9	71	1	0	0	5.6703	
<i>Ant</i> <sub>10</sub>	0	14.3705	1	50	90	7	29	25	25	
<i>Ant</i> <sub>11</sub>	360	16.8353	0.0810	9	70	0	0	0	5.1730	
<i>Ant</i> <sub>12</sub>	174	15.1602	1	50	90	8	34	34	23.1426	
<i>Ant</i> <sub>13</sub>	0	14.8447	1	50	89	8	3	3	25	
<i>Ant</i> <sub>14</sub>	156	15.2687	1	50	90	7	31	31	22.9827	
<i>Ant</i> <sub>15</sub>	153	14.7522	1	50	90	7	67	67	23.8063	
<i>Ant</i> <sub>16</sub>	0	14.4329	1	50	90	5	5	5	25	
<i>Ant</i> <sub>17</sub>	327	16.6846	0.1356	9	70	0	0	0	5.2092	
<i>Ant</i> <sub>18</sub>	42	14.6113	1	50	90	7	67	67	23.8455	
<i>Ant</i> <sub>19</sub>	0	14.2478	1	50	90	7	29	29	25	
<i>Ant</i> <sub>20</sub>	72	14.6294	1	50	90	7	68	68	23.8589	
%	80	100	45	40	60	40	60	60	80	
<i>F</i> (best)	360	16.8353	0.0810	9	70	0	0	0	5.1730	

## Análisis de resultados con prioridad G

Cuando se prioriza la ganancia G en la optimización, se da poca prioridad al ancho de banda BW. Es suficiente con que solo cumpla la primera condición además de obtener una buena ganancia con el direccionamiento del patrón de radiación en  $\theta = 0^\circ$ . Las dimensiones y valores de los parámetros obtenidos en cada intento se encuentran en la Tabla 6.7 y 6.8. El mejor resultado de todos los intentos es el número 18 o  $int_{18}$  que se mostró en las tablas mencionadas anteriormente. En dicho intento se tienen las 20 antenas optimizadas, resultado de las 30 iteraciones. En la Tabla 3.20 se detallan los parámetros de las 20 antenas que se obtuvieron. En la penúltima fila (%) de dicha tabla, se muestra todos los parámetros con un 100% de las antenas. El menor valor objetivo de las 20 antenas lo tiene la  $Ant_5$  con  $F(x) = 3,9871$  y se resalta en gris para distinguirlo del resto. En la última fila se detalla los mejores parámetros obtenidos con su valor objetivo.

Haciendo referencia a los parámetros iniciales de la tabla 3.4 se evidencia un gran aumento de 85% que cumple la primera condición. Un aumento de 65% en la segunda condición. En los parámetros  $HPBW_{\phi=90}$ ,  $HPBW_{\phi=0}$ ,  $\angle G_{\phi=90}^{max\phi}$ ,  $\angle G_{\phi=0}^{max\phi}$  se obtuvo un aumento de 95%, 65%, 95%, 60% respectivamente. En el caso del valor objetivo se obtuvo un gran incremento de 85%.

En la tabla 3.18 solo el 5% de los valores objetivos son menores  $F(x) < 5$  acercándose al objetivo  $F(x) = 0$ . El 95% de la población se concentra en el intervalo  $[5 - 10]$  siendo aceptable los valores.

Tabla 3.18

*Intervalos de cumplimiento PSO de función objetivo con prioridad G*

<b>F(x)</b>	<b>%</b>
$\langle 20 - 25 \rangle$	0
$\langle 15 - 20 \rangle$	0
$\langle 10 - 15 \rangle$	0
$\langle 5 - 10 \rangle$	95
$[0 - 5]$	5

En la tabla 3.19, los intervalos de las dimensiones  $W_1, W_2, W_3, W_4, L_1, L_2, L_3$  y  $L_4$  son 0.05, 0.06, 0.16, 0.09, 0.07, 0.09, 0.08 y 0.07, respectivamente. Con dichos valores se da a entender que las dimensiones de las antenas están convergiendo a un solo valor. La medida

óptima  $X^*$  se encuentra en el rango [3.50 - 3.62] con una diferencia de 0.12, cumpliendo con el criterio de convergencia y se puede observar en la última fila de la tabla 3.19.

Recapitulando, en la prioridad BW la  $Ant_{11}$  cumple con las tres condiciones. Teniendo un  $BW = 360 MHz$ ,  $\angle G_{\phi=90}^{max\phi} = 0^\circ$  y  $\angle G_{\phi=0}^{max\phi} = 0^\circ$ . Además, con  $\bar{G} = 0,0810 dB$  siendo un valor cercano al objetivo de 0,01.

Para el caso de la prioridad  $G$ , la  $Ant_5$  cumplió con todas las condiciones establecidas. Con una  $G = 16,8543 dB$ ,  $\bar{G} = 0,0889 dB$  y  $BW = 336 MHz$ , siendo buenos resultados obtenidos del algoritmo. Con dichos resultados, la implementación del algoritmo PSO cumple el segundo objetivo específico de la presente tesis.

Tabla 3.19

Dimensiones óptimas de las antenas PSO-G

DIMENSIONES ÓPTIMAS DE LAS ANTENAS PRIORIDAD GAIN									
	Dimensiones								
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	
<i>Ant</i> <sub>1</sub>	3.5511	3.6214	3.3593	3.6432	3.6556	3.6674	3.5376	3.6264	
<i>Ant</i> <sub>2</sub>	3.5482	3.6097	3.3786	3.6139	3.6313	3.6502	3.5423	3.5691	
<i>Ant</i> <sub>3</sub>	3.5467	3.6101	3.4073	3.5916	3.5914	3.6408	3.5450	3.5540	
<i>Ant</i> <sub>4</sub>	3.5441	3.5694	3.4600	3.6110	3.5925	3.5744	3.5451	3.5825	
<i>Ant</i> <sub>5</sub>	3.5915	3.5920	3.5019	3.6020	3.5550	3.6286	3.6110	3.6069	
<i>Ant</i> <sub>6</sub>	3.5487	3.5829	3.4977	3.5745	3.6271	3.5978	3.5431	3.5643	
<i>Ant</i> <sub>7</sub>	3.5497	3.5902	3.5146	3.5578	3.6440	3.6089	3.5424	3.5824	
<i>Ant</i> <sub>8</sub>	3.5507	3.5859	3.4796	3.5562	3.6149	3.6182	3.5455	3.5882	
<i>Ant</i> <sub>9</sub>	3.5431	3.6041	3.4962	3.5933	3.5887	3.6006	3.5359	3.5873	
<i>Ant</i> <sub>10</sub>	3.5444	3.6168	3.5078	3.5931	3.6148	3.5974	3.5395	3.5900	
<i>Ant</i> <sub>11</sub>	3.5455	3.6157	3.5119	3.5885	3.6039	3.6006	3.5408	3.5858	
<i>Ant</i> <sub>12</sub>	3.5461	3.5896	3.4875	3.5787	3.5982	3.5965	3.5421	3.5824	
<i>Ant</i> <sub>13</sub>	3.5467	3.5660	3.4726	3.5887	3.6008	3.5849	3.5414	3.5874	
<i>Ant</i> <sub>14</sub>	3.5346	3.5600	3.4671	3.5484	3.6040	3.6017	3.5309	3.5896	
<i>Ant</i> <sub>15</sub>	3.5483	3.5797	3.4693	3.5699	3.6093	3.6365	3.5396	3.5811	
<i>Ant</i> <sub>16</sub>	3.5505	3.5999	3.4414	3.5946	3.6018	3.6080	3.5458	3.5902	
<i>Ant</i> <sub>17</sub>	3.5507	3.5797	3.4595	3.5936	3.5850	3.5922	3.5434	3.5973	
<i>Ant</i> <sub>18</sub>	3.5505	3.5842	3.4819	3.5998	3.5991	3.6033	3.5434	3.5953	
<i>Ant</i> <sub>19</sub>	3.5473	3.5872	3.4603	3.6038	3.5982	3.6158	3.5395	3.5687	
<i>Ant</i> <sub>20</sub>	3.5459	3.5866	3.4519	3.6083	3.6224	3.6121	3.5407	3.5737	
Variación	[3.54 - 3.59]	[3.56 - 3.62]	[3.35 - 3.51]	[3.55 - 3.64]	[3.58 - 3.65]	[3.57 - 3.66]	[3.53 - 3.61]	[3.55 - 3.62]	
X *	3.5915	3.5920	3.5019	3.6020	3.5550	3.6286	3.6110	3.6069	

Tabla 3.20

Parámetros óptimos de las antenas PSO-G

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ANTENAS									
	Parámetros						Prioridad G		
	BW	G	$\delta\bar{G}_{\theta=1}$	HPBW $_{\phi=90}$	HPBW $_{\phi=0}$	$\angle G_{\phi=90}^{max\phi}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\phi}$	$F(x)$	
Ant <sub>1</sub>	333	16.8526	0.0887	9	70	0	0	5.1726	
Ant <sub>2</sub>	381	16.8363	0.0715	9	70	0	0	5.1702	
Ant <sub>3</sub>	342	16.8057	0.0641	9	71	0	0	5.4799	
Ant <sub>4</sub>	360	16.8036	0.0646	9	71	0	0	5.4785	
Ant <sub>5</sub>	336	16.8543	0.0889	9	70	0	0	3.9871	
Ant <sub>6</sub>	303	16.8493	0.0786	9	71	0	0	5.4758	
Ant <sub>7</sub>	321	16.8612	0.0835	9	70	0	0	5.1718	
Ant <sub>8</sub>	378	16.8331	0.0767	9	71	0	0	5.4714	
Ant <sub>9</sub>	324	16.8484	0.0761	9	70	0	0	5.1737	
Ant <sub>10</sub>	165	16.8636	0.0843	9	70	0	0	5.1870	
Ant <sub>11</sub>	177	16.8627	0.0827	9	70	0	0	5.1859	
Ant <sub>12</sub>	387	16.8365	0.0742	9	70	0	0	5.1697	
Ant <sub>13</sub>	363	16.8072	0.0648	9	71	0	0	5.4775	
Ant <sub>14</sub>	174	16.7634	0.0643	9	71	0	0	5.5051	
Ant <sub>15</sub>	381	16.8296	0.0778	9	71	0	0	5.4719	
Ant <sub>16</sub>	390	16.8322	0.0745	9	71	0	0	5.4703	
Ant <sub>17</sub>	372	16.8154	0.0660	9	71	0	0	5.4750	
Ant <sub>18</sub>	363	16.8498	0.0769	9	70	0	0	5.1696	
Ant <sub>19</sub>	393	16.8366	0.0704	9	71	0	0	5.4689	
Ant <sub>20</sub>	390	16.8416	0.0736	9	71	0	0	5.4684	
%	100	100	100	100	100	100	100	100	
F(best)	336	16.8543	0.0889	9	70	0	0	3.9871	

### 3.2.5. Implementación del algoritmo GA

En el algoritmo genético, y de la misma manera que en los anteriores, primero se define el parámetro de prioridad (BW o G) para definir los pesos de la función objetivo. Luego, la población de 20 individuos-antenas y 8 dimensiones que son las posiciones iniciales, todo esto fue explicado en la subsección 3.2.2. Posterior a ello, se define el número de iteraciones  $N_{it}$ , límite mínimo  $L_b$  y máximo  $U_b$  de las dimensiones, probabilidad de mutación  $P_M$ , tipo de cruce  $T_C$ , cantidad de padres  $P$ , de cruce  $C$ , de mutación  $M$ , de genes  $L_G$  y de elitismo  $E$ . Dichos parámetros se muestran en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21  
Parámetros del GA para la optimización

Parámetro	Valor	Descripción
$n$	20	Población de individuos
$N_{it}$	30	Número de iteraciones
$L_b$	3	Límite mínimo
$U_b$	5	Límite máximo
$L_G$	7	Número de genes
$d$	8	Dimensión
$T_C$	2	Tipo de cruce
$C$	8	Individuos para el cruce
$P_M$	4	Probabilidad de mutación
$M$	12	Individuos para la mutación
$P$	2	Cantidad de padres
$E$	2	Individuos para elitismo

La población binaria se generó manualmente y se usó la Eq. 2.14 para obtener los valores reales de las dimensiones iniciales que se usan en los algoritmos (BA y PSO). De manera similar a la implementación de los otros algoritmos, las dimensiones iniciales de la Tabla 3.3 son evaluados en el simulador electromagnético para obtener los parámetros de la antena. Se analiza los parámetros con el proceso de la Tabla 3.2. Se evalúa con la función objetivo  $F(x_i)$  utilizando la Eq. 3.1 a todos los individuos. Se elige el individuo con el menor valor de la función objetivo, denominado  $I_{global}$ . También, se escoge 2 de los mejores individuos para que sean los padres de las siguientes generaciones mediante la función elitismo.

Obtenido el valor de  $I_{global}$  se ingresa al bucle que cuenta con 30 iteraciones (similar a los casos anteriores). En el bucle primero se ordena los individuos de forma ascendente según su valor obtenido de la función objetivo como se muestra en la Fig. 2.16. Después, se escoge 8 individuos para el cruce de dos puntos (Fig. 2.19). En seguida, los 12 individuos restantes

que tienen los valores altos de la función objetivo son mutados con una probabilidad del 4 % utilizando el método de la ruleta. En este método, cada uno de los individuos ocupa un sector en un círculo como se muestra en la Fig. 3.15, proporcional a su peso asignado mostrado en la Fig. 2.17. Así, generando un número aleatorio  $N / \mathbb{R} \in [0-1]$ , se recorre el círculo hasta conseguir la probabilidad acumulada marcada por el número aleatorio generado. Por último, los valores binarios de los individuos-antenas se codifica nuevamente en valores decimales y luego a valores reales utilizando la Eq. 2.14 para obtener la nueva dimensión del individuo-antena. Los nuevos valores se procesan en el simulador electromagnético para obtener los parámetros de antena.

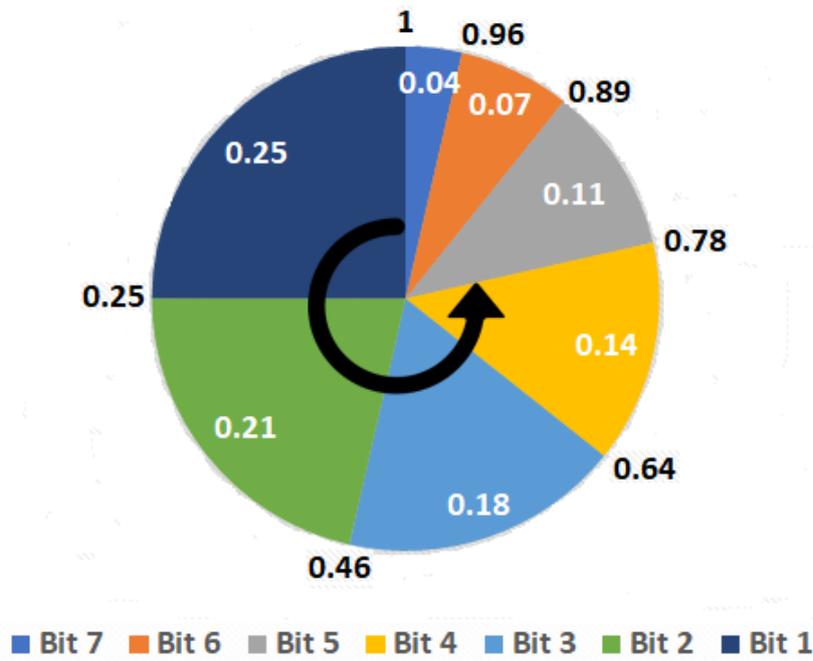


Figura 3.15. Método de la ruleta

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros son analizados de la Tabla 3.2 para obtener  $F(x_i)$ . Con el nuevo valor de la función objetivo se espera que sea menor a  $I_{global}$ , si es así, se acepta como nueva solución global y es el nuevo  $I_{global}$ . También, se guarda una cantidad determinada de individuos por la función elitismo para que sean los nuevos padres de la población. Este proceso se repite cíclicamente hasta que se cumple las iteraciones indicadas y el algoritmo entregue la mejor solución. Dicho proceso se detalla en el pseudo código de la Tabla 3.22.

Tabla 3.22

*Pseudo código del algoritmo Genético*

<b>Pseudo código del algoritmo Genético</b>
Función Objetivo $F(x)$ , $x = x_1, x_2, \dots, x_n$
Inicia la población binaria, $x_i$ ( $i = 100, 101, \dots, n$ )
Codificar los genes en decimal y real [Ecuación 2.14]
Extrae los parámetros de la antena
Analiza los parámetros [tabla 3.2]
Evalúa la función objetivo [ecuación 3.1]
<b>while</b> (Número de iteraciones)
Se ordena crecientemente los valores $F(x_i)$
Escoge los padres
Cruza los individuos
Muta los individuos con una probabilidad
Codifica en decimal y real los cromosomas [Ecuación 2.14]
Se extrae el valor de los parámetros
Se analiza los parámetros [tabla 3.2]
Evalúa la función objetivo [ecuación 3.1]
<b>if</b> ( $F(x_i) < I_{global}^{t-1}$ )
Acepta el nuevo $I_{global}$
Se guarda los mejores individuos por elitismo
<b>end if</b>
<b>end while</b>
Retorna la mejor solución $I_{global}$

### **Análisis de resultados con prioridad BW**

Recordando nuevamente, se desea obtener un gran ancho de banda mayor de 1 GHz, dando poco peso el valor de la dirección del patrón de radiación y de la ganancia. Las dimensiones y valores de los parámetros obtenidos en cada intento se encuentran en la Tabla 6.9 y 6.10. El mejor resultado de los intentos es el  $int_5$  de las tablas mencionadas anteriormente. En dicho intento se tienen las 20 antenas optimizadas, resultado de las 30 iteraciones. En la Tabla 3.25 se detallan los parámetros de las 20 antenas que se obtuvieron. En la penúltima fila (%) de dicha tabla, se muestra un 90% de las antenas que cumplieron la primera y un 70% la segunda condición. En la tercera condición se llegó a 50% en el caso de  $HPBW_{\phi=90}$  con  $\angle G_{\phi=90}^{max_{O^i}}$ , pero en los parámetros restantes se llegó al 90%. El menor valor objetivo de las 20 antenas lo tiene la  $Ant_8$  con  $F(x) = 5,6399$  que se encuentra resaltado de gris. En la última fila se detalla los mejores parámetros obtenidos con su valor objetivo.

Haciendo referencia a los parámetros iniciales de la tabla 3.4 se evidencia un gran aumento de 75% que cumple la primera condición. Un aumento de 35% en la segunda condición.

En los parámetros  $HPBW_{\phi=90}$ ,  $HPBW_{\phi=0}$ ,  $\angle G_{\phi=90}^{max_{O^i}}$ ,  $\angle G_{\phi=0}^{max_{O^i}}$  se obtuvo un aumento de 45 %, 55 %, 45 %, 50 % respectivamente. En el caso del valor objetivo se obtuvo un gran incremento de 75 %.

En la tabla 3.23 el 55 %, un poco más de la mitad de la población, sus valores objetivos son mayores  $F(x) > 10$ . El 45 % de los valores objetivos se concentra en el rango  $\langle 5 - 10 \rangle$ , siendo aceptables por ser menores a 10.

Tabla 3.23

*Intervalos de cumplimiento GA de función objetivo con prioridad BW*

F(x)	%
$\langle 20 - 25 \rangle$	20
$\langle 15 - 20 \rangle$	35
$\langle 10 - 15 \rangle$	0
$\langle 5 - 10 \rangle$	45
$[0 - 5]$	0

En la tabla 3.24, la única dimensión que disminuye es  $W_3$ . Su intervalo se redujo de  $[3.00 - 4.97]$  a  $[3.10 - 4.28]$  pero no ha sido una reducción tan notoria como se observó en los algoritmos anteriores. Las dimensiones restantes de las antenas fueron menores de 4, pero algunas aun siguen en los extremos del caso inicial. Por tanto, la variación de las variables no disminuyeron mucho. La mejor dimensión obtenida que se encuentra en la última fila. Los valores son menores de 4 excepto con las dimensiones  $W_3$  y  $L_2$ .

Tabla 3.24

Dimensiones óptimas de las antenas GA-BW

DIMENSIONES ÓPTIMAS DE LAS ANTENAS PRIORIDAD BW									
	Dimensiones								
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	
<i>Ant</i> <sub>1</sub>	4.9294	4.6078	3.6352	3.4078	3.4862	4.6627	4.1137	4.0352	
<i>Ant</i> <sub>2</sub>	4.0745	3.5333	4.2862	3.5960	4.9294	3.1176	3.8000	4.3803	
<i>Ant</i> <sub>3</sub>	3.8549	3.0784	4.0745	3.1176	3.5254	4.9450	3.3137	3.3921	
<i>Ant</i> <sub>4</sub>	3.8235	3.1019	4.0823	3.2980	3.4000	4.4588	3.2039	3.4627	
<i>Ant</i> <sub>5</sub>	3.9647	3.8549	3.7137	3.7686	4.8666	3.7529	3.8000	4.5294	
<i>Ant</i> <sub>6</sub>	3.8549	3.0784	4.0745	3.1960	4.3882	4.9450	3.3137	3.3921	
<i>Ant</i> <sub>7</sub>	3.5333	3.2352	4.0274	4.0745	4.6392	4.1529	3.2901	3.2588	
<i>Ant</i> <sub>8</sub>	3.5333	3.2352	4.0745	3.1176	3.6039	4.8196	3.2901	3.2588	
<i>Ant</i> <sub>9</sub>	3.5333	3.2352	4.0745	3.1019	3.6039	4.8196	3.2901	3.2588	
<i>Ant</i> <sub>10</sub>	3.9882	3.1725	3.2196	3.7294	3.3843	3.4941	4.2471	3.9725	
<i>Ant</i> <sub>11</sub>	3.7058	4.2000	4.1058	3.4941	3.0705	4.9843	4.3019	3.4784	
<i>Ant</i> <sub>12</sub>	3.0313	4.5450	3.1098	4.6627	4.3803	3.2823	4.8039	3.2196	
<i>Ant</i> <sub>13</sub>	3.5333	3.2352	4.0745	3.1176	3.5254	4.9450	3.3137	3.2588	
<i>Ant</i> <sub>14</sub>	3.6117	3.3764	4.0274	3.9176	3.7921	3.8156	3.0470	5.0000	
<i>Ant</i> <sub>15</sub>	3.8549	3.0784	4.0274	3.0941	3.5254	4.9450	3.3137	3.3921	
<i>Ant</i> <sub>16</sub>	3.5333	3.0784	4.0274	3.2117	3.5254	4.9450	3.2901	3.2588	
<i>Ant</i> <sub>17</sub>	3.6588	3.2431	3.5568	3.6901	3.2509	3.6509	4.1686	3.3529	
<i>Ant</i> <sub>18</sub>	4.0039	3.5098	3.9411	4.7647	4.6627	4.8509	4.4666	4.5686	
<i>Ant</i> <sub>19</sub>	4.4980	3.4392	3.5803	4.2784	3.3607	4.6549	3.0313	3.8000	
<i>Ant</i> <sub>20</sub>	3.8549	3.0784	4.0745	3.1176	3.6039	4.8196	3.3137	3.3921	
Variación	[3.03 - 4.92]	[3.07 - 4.60]	[3.10 - 4.28]	[3.09 - 4.76]	[3.07 - 4.92]	[3.11 - 4.94]	[3.03 - 4.80]	[3.21 - 5.00]	
X*	3.5333	3.2352	4.0745	3.1176	3.6039	4.8196	3.2901	3.2588	

Tabla 3.25

Parámetros óptimos de las antenas GA-BW

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ANTENAS									
	Parámetros							Prioridad BW	
	BW	G	$\delta\bar{G}_{\theta=1}$	HPBW $_{\phi=90}$	HPBW $_{\phi=0}$	$\angle G_{\phi=90}^{max\phi}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\phi}$	$F(x)$	
Ant <sub>1</sub>	192	14.0676	0.1455	50	90	10	10	23.0586	
Ant <sub>2</sub>	141	14.2374	1	50	74	11	0	18.0904	
Ant <sub>3</sub>	192	15.9702	0.2268	10	70	1	0	5.7001	
Ant <sub>4</sub>	96	16.1222	0.1037	11	70	0	0	5.8431	
Ant <sub>5</sub>	303	14.3821	1	50	77	12	1	19.0453	
Ant <sub>6</sub>	150	14.4113	0.9126	50	69	7	0	16.2304	
Ant <sub>7</sub>	0	12.6142	1	50	90	10	69	25	
Ant <sub>8</sub>	306	16.2058	0.1932	10	70	1	0	5.6399	
Ant <sub>9</sub>	168	16.2509	0.1863	10	70	1	0	5.6443	
Ant <sub>10</sub>	153	16.1531	0.1125	10	70	0	0	5.7317	
Ant <sub>11</sub>	87	13.7238	1	50	70	10	0	16.9185	
Ant <sub>12</sub>	75	13.6644	0.1252	50	77	13	0	19.2279	
Ant <sub>13</sub>	327	15.9711	0.2085	10	71	1	0	5.9855	
Ant <sub>14</sub>	45	14.5489	1	50	80	8	0	19.5977	
Ant <sub>15</sub>	174	16.2205	0.1939	10	70	1	0	5.6502	
Ant <sub>16</sub>	318	15.8383	0.1691	11	71	1	0	6.2610	
Ant <sub>17</sub>	0	16.1395	0.1083	9	71	0	0	25	
Ant <sub>18</sub>	621	13.8848	0.3045	50	72	23	0	18.4382	
Ant <sub>19</sub>	108	13.6410	1	50	88	7	3	22.1530	
Ant <sub>20</sub>	348	16.1748	0.2216	10	70	1	0	5.6433	
%	90	100	70	50	90	50	90	90	90
F(best)	153	16.1531	0.1125	9	70	0	0	5.3317	

## Análisis de resultados con prioridad G

Se intenta obtener una buena ganancia con el direccionamiento del patrón de radiación en  $\theta = 0^\circ$ . También, como mínimo que cumpla la primera condición. Las dimensiones y valores de los parámetros obtenidos en cada intento se encuentran en la Tabla 6.11 y 6.12. En este caso se obtuvo el  $int_8$  y  $int_{15}$  con el mejor resultado, ambos con valores iguales. Se escogió el  $int_8$  de las 20 antenas optimizadas, resultado de las 30 iteraciones. En la Tabla 3.12 se detallan los parámetros de las 20 antenas que se obtuvieron. En la penúltima fila (%) de dicha tabla, se muestra un 85 % de las antenas que cumplieron la primera y un 35 % en la segunda condición. En la tercera condición se llegó a 30 % en el caso de  $HPBW_{\phi=90}$  con  $\angle G_{\phi=90}^{maxoi}$  y 70 % en el caso de  $HPBW_{\phi=0}$  con  $\angle G_{\phi=0}^{maxoi}$ . Se obtuvieron dos mejores valores objetivos el  $Ant_6$  con el  $Ant_{11}$  siendo ambos iguales con un valor  $F(x) = 3,7742$  resalta- do de gris. En la última fila se detalla los mejores parámetros obtenidos con su valor objetivo.

Haciendo referencia a los parámetros iniciales de la tabla 3.4 se evidencia un gran aumen- to de 70 % que cumple la primera condición. En la segunda condición no se obtuvo aumento, se mantuvo igual. En los parámetros  $HPBW_{\phi=90}$ ,  $HPBW_{\phi=0}$ ,  $\angle G_{\phi=90}^{maxoi}$ ,  $\angle G_{\phi=0}^{maxoi}$  se obtu- vo un aumento de 25 %, 35 %, 20 %, 30 % respectivamente. En el caso del valor objetivo se obtuvo un gran incremento de 70 %.

En la tabla 3.26 se observa que el 55 % de los valores obtenidos son mayores  $F(x) > 10$ , concentrándose un 40 % en el intervalo  $\langle 10 - 15 \rangle$ . El 20 % de la población se concentra en el intervalo  $[0 - 5]$ , aproximándose al objetivo de  $F(x) = 0$ .

Tabla 3.26

*Intervalos de cumplimiento GA de función objetivo con prioridad G*

F(x)	%
$\langle 20 - 25 \rangle$	15
$\langle 15 - 20 \rangle$	0
$\langle 10 - 15 \rangle$	40
$\langle 5 - 10 \rangle$	25
$[0 - 5]$	20

En la tabla 3.27, en el intervalo de la variable  $W_2$  aumentó el extremo derecho de  $[3.10 - 4.77]$  a  $[3.18 - 4.85]$ . Los intervalos de las dimensiones restantes tuvieron una reducción pequeña. La dimensión óptima se muestra en la ultima fila, siendo sus valores menores de 4 excepto la variable  $W_2$  que su valor es 4.1215.

Tabla 3.27

Dimensiones óptimas de las antenas GA-G

DIMENSIONES ÓPTIMAS DE LAS ANTENAS PRIORIDAD G									
Dimensiones									
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	
<i>Ant</i> <sub>1</sub>	3.9333	3.4000	4.1215	3.5647	4.4666	3.5725	3.9803	4.0745	
<i>Ant</i> <sub>2</sub>	4.5529	3.4000	4.2078	3.5647	4.4823	3.5490	3.3450	3.1882	
<i>Ant</i> <sub>3</sub>	4.4745	3.2588	4.1529	3.5254	3.9411	4.3098	4.0509	4.6705	
<i>Ant</i> <sub>4</sub>	4.0509	4.8509	3.3450	4.1215	3.6117	3.0862	4.7882	3.2666	
<i>Ant</i> <sub>5</sub>	4.1215	4.4431	3.3450	4.9450	3.6117	3.8392	3.5960	3.3607	
<i>Ant</i> <sub>6</sub>	3.6745	4.1215	3.1490	3.1882	3.7137	3.8705	3.1725	3.7607	
<i>Ant</i> <sub>7</sub>	3.9098	4.1215	3.1490	3.1882	3.7137	3.8705	3.1725	3.3450	
<i>Ant</i> <sub>8</sub>	3.2745	3.7215	4.0509	3.8549	3.5725	3.8156	3.5803	4.3725	
<i>Ant</i> <sub>9</sub>	3.6117	3.7843	3.8784	3.5803	4.1529	3.5254	3.8000	4.1843	
<i>Ant</i> <sub>10</sub>	3.5568	3.3450	4.1215	4.8980	4.5607	3.5490	3.0392	3.1490	
<i>Ant</i> <sub>11</sub>	3.6745	4.1215	3.1490	3.1882	3.7137	3.8705	3.1725	3.7607	
<i>Ant</i> <sub>12</sub>	4.2705	4.3411	4.4588	4.1764	3.5803	3.8549	3.2901	3.5960	
<i>Ant</i> <sub>13</sub>	3.6745	4.1215	3.1490	4.4196	3.5882	4.7490	3.1725	3.7607	
<i>Ant</i> <sub>14</sub>	3.6745	4.1215	3.0705	3.1882	3.7137	3.8705	3.1725	3.7607	
<i>Ant</i> <sub>15</sub>	4.7098	3.1882	3.2901	4.4352	4.8588	3.3529	3.4627	3.1647	
<i>Ant</i> <sub>16</sub>	3.0470	4.1843	3.0705	4.4352	3.5882	4.7490	4.3019	4.4745	
<i>Ant</i> <sub>17</sub>	3.6745	4.1215	3.1490	4.4196	3.7137	3.8705	3.1725	3.7607	
<i>Ant</i> <sub>18</sub>	4.2313	3.2117	3.0235	3.9490	3.1960	3.0941	3.0078	3.8078	
<i>Ant</i> <sub>19</sub>	4.2078	3.4470	3.0235	3.9490	3.1960	3.0941	3.8941	4.4666	
<i>Ant</i> <sub>20</sub>	3.3137	3.9019	3.0156	4.1450	4.7019	4.8352	4.1450	5.0000	
Variación	[3.04 - 4.70]	[3.18 - 4.85]	[3.01 - 4.45]	[3.18 - 4.94]	[3.19 - 4.85]	[3.08 - 4.83]	[3.00 - 4.78]	[3.14 - 5.00]	
X *	3.6745	4.1215	3.1490	3.1882	3.7137	3.8705	3.1725	3.7607	

Tabla 3.28

Parámetros óptimos de las antenas GA-G

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ANTENAS									
	Parámetros						Prioridad G		
	BW	G	$\delta\bar{G}_{\theta=1}$	HPBW $_{\phi=90}$	HPBW $_{\phi=0}$	$\angle G_{\phi=90}^{max\phi}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\phi}$	$F(x)$	
Ant <sub>1</sub>	582	14.4206	1	50	68	9	0	8.9873	
Ant <sub>2</sub>	732	14.5355	1	50	66	10	0	8.5935	
Ant <sub>3</sub>	309	15.3503	1	50	67	11	0	8.7167	
Ant <sub>4</sub>	42	14.1632	1	50	82	11	0	12.1736	
Ant <sub>5</sub>	138	14.6883	1	50	76	11	0	10.8135	
Ant <sub>6</sub>	123	16.4903	0.1338	9	68	0	0	3.7442	
Ant <sub>7</sub>	153	16.2194	0.2049	9	68	1	0	3.8865	
Ant <sub>8</sub>	75	15.0187	1	50	90	8	35	12.0098	
Ant <sub>9</sub>	102	15.3466	1	50	90	7	36	11.8598	
Ant <sub>10</sub>	0	12.6860	1	50	90	10	68	25	
Ant <sub>11</sub>	123	16.4903	0.1338	9	68	0	0	3.7442	
Ant <sub>12</sub>	186	15.0257	1	50	90	11	14	13.7948	
Ant <sub>13</sub>	0	14.8278	1	50	80	7	2	25	
Ant <sub>14</sub>	318	16.3462	0.1661	9	68	1	0	3.8034	
Ant <sub>15</sub>	45	13.1257	0.3632	50	73	5	0	10.1202	
Ant <sub>16</sub>	69	14.2508	1	50	70	14	0	9.9836	
Ant <sub>17</sub>	147	14.3872	1	50	90	6	35	13.9861	
Ant <sub>18</sub>	0	13.3723	0.1624	19	71	5	0	25	
Ant <sub>19</sub>	78	13.3514	0.1775	9	75	1	1	6.0446	
Ant <sub>20</sub>	81	14.4686	1	50	90	15	0	14.0055	
%	85	100	35	30	70	30	70	85	
F(best)	123	16.4903	0.1338	9	68	0	0	3.7442	

Recapitulando, la  $Ant_8$  de la prioridad  $BW$  cumple con todas las condiciones establecidas en el algoritmo obteniendo un ancho de banda de  $306\text{ MHz}$ , también, con una  $G = 16,2058\text{ dB}$ . A diferencia de lo que se obtuvo con los otros algoritmos se logro:  $\angle G_{\phi=90}^{maxO^i} = 1^\circ$ .

Con la prioridad  $G$ , se obtuvo dos resultados iguales siendo la  $Ant_6$  y  $Ant_{11}$ . De todas las antenas fueron los únicos que tuvieron un gran valor con  $G = 16,4903\text{ dB}$  y direccionado en  $\angle G_{\phi=90}^{maxO^i} = 0^\circ$  con  $\angle G_{\phi=0}^{maxO^i} = 0^\circ$ . Con dichos resultados, el algoritmo GA cumple el segundo objetivo específico.

### 3.2.6. Análisis comparativo de los 3 algoritmos para el diseño de antenas

#### Comparación de la optimización con prioridad del BW

Como se mencionó en la implementación de los tres algoritmos se realizaron 20 intentos. Con 30 iteraciones para cada intento por algoritmo según la prioridad objetivo. Cada intento que se realizó la función objetivo va disminuyendo a la par que aumenta las iteraciones de la simulación.

En el caso del algoritmo BA, los 20 intentos  $Int_i$  se muestran en la Fig. 3.16. Donde el 40% de los intentos llegan a un valor objetivo  $F_{(x)} \leq 10$  en las 5 primeras iteraciones. Conforme aumenta las iteraciones se llega a un 60% en la iteración 15. Posterior a ello, llega a un 75% que se mantiene hasta la iteración 30. El porcentaje restante de los intentos no llega al objetivo deseado ni cercano, como el  $Int_{20}$  que esta muy alejado con un valor de  $F_{(x)} = 20,12$ . El intento que obtuvo el mejor valor  $F_{(x)}$  es el  $Int_{13}$  de línea negra que tuvo una gran disminución hasta la sexta iteración, de ahí disminuyo poco hasta obtener un valor  $F_{(x)} = 4,6291$ .

Tabla 3.29  
Porcentaje por iteraciones con prioridad BW

Iteraciones	BA (%)	PSO (%)	GA (%)
5	40	50	5
10	60	50	20
15	60	50	45
20	75	55	70
25	75	55	75
30	75	55	75

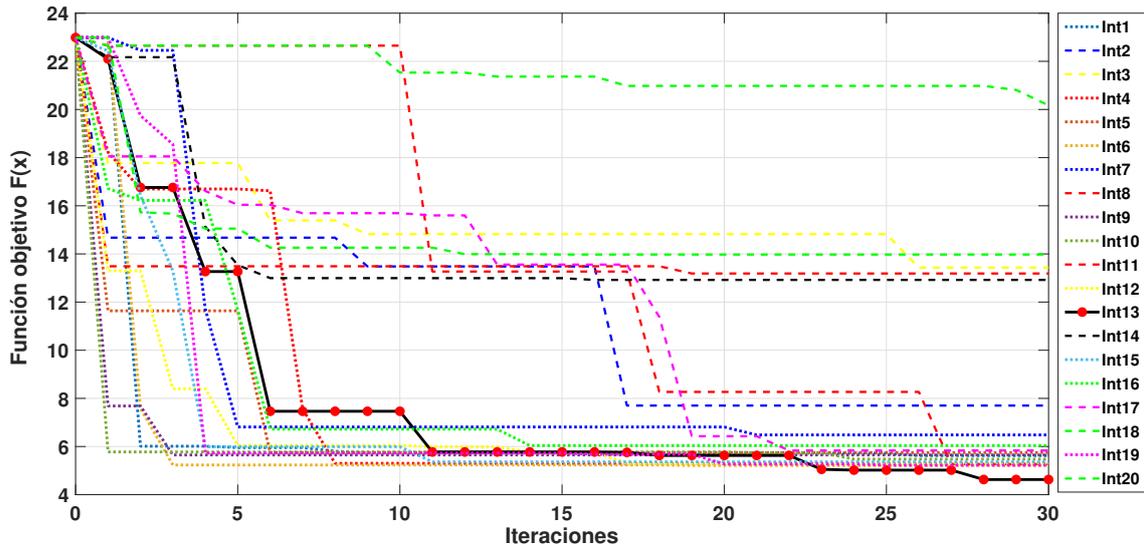


Figura 3.16. Intentos del algoritmo BA con prioridad BW

Fuente: Elaboración propia

Los 20 intentos  $Int_i$  del algoritmo PSO se muestra en la Fig. 3.17. Donde el 50 % de los intentos llegan a un valor aceptable  $F(x) \leq 10$  en las 5 primeras iteraciones hasta la iteración 15. Conforme aumenta las iteraciones se llega a un 55 % manteniéndose constante hasta la iteración 30. El 45 % no logran bajar el valor aceptable de la función objetivo, concentrándose en el rango de valores  $[14,7148 - 17,2712]$ . El intento que obtuvo el mejor valor  $F(x)$  es el  $Int_5$  de línea negra que tuvo una gran disminución en la primera iteración hasta la sexta iteración, que se mantuvo constante hasta la última iteración con un valor  $F(x) = 5,1730$ .

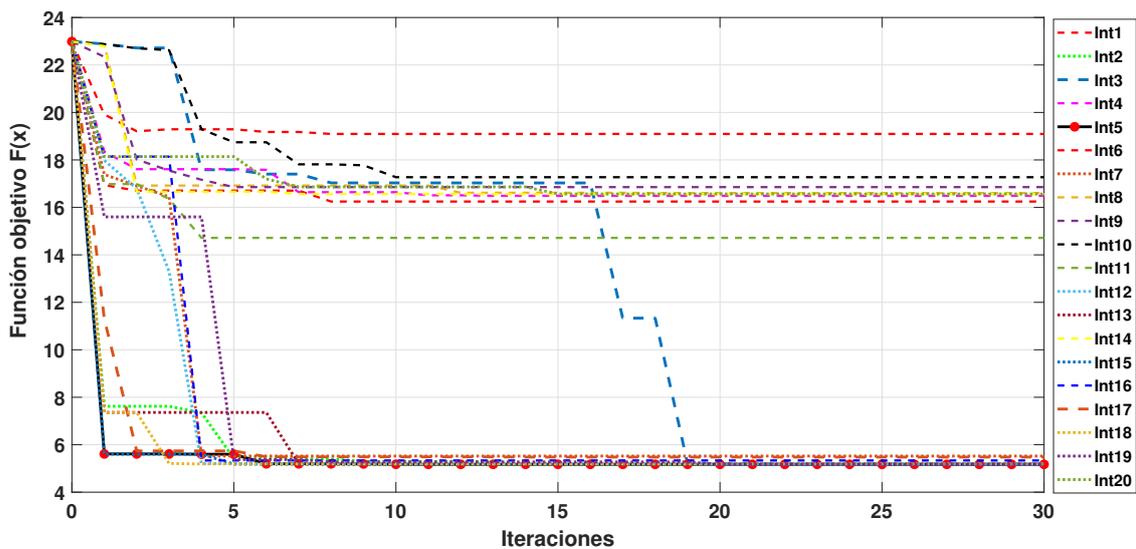


Figura 3.17. Intentos del algoritmo PSO con prioridad BW

Fuente: Elaboración propia

La Fig. 3.18 muestra los 20 intentos  $Int_i$  del algoritmo GA. Donde solo el 5 % de los intentos llegan a un valor aceptable  $F(x) \leq 10$  en las 5 primeras iteraciones. En las 5 iteraciones posteriores se llega a un 20 %. Conforme aumenta 5 iteraciones se duplica el porcentaje hasta 45 %. Cuando concluye las 30 iteraciones, el algoritmo llega a un 75 % de los intentos establecidos. Del porcentaje restante, la mayoría de los intentos se concentra en el intervalo de [12,9212 - 13,8988]. El intento que obtuvo el mejor valor  $F(x)$  es el  $Int_5$  de línea negra que tuvo una gran disminución hasta la quinta iteración, de ahí disminuyó gradualmente hasta obtener un valor  $F(x) = 5,6399$ .

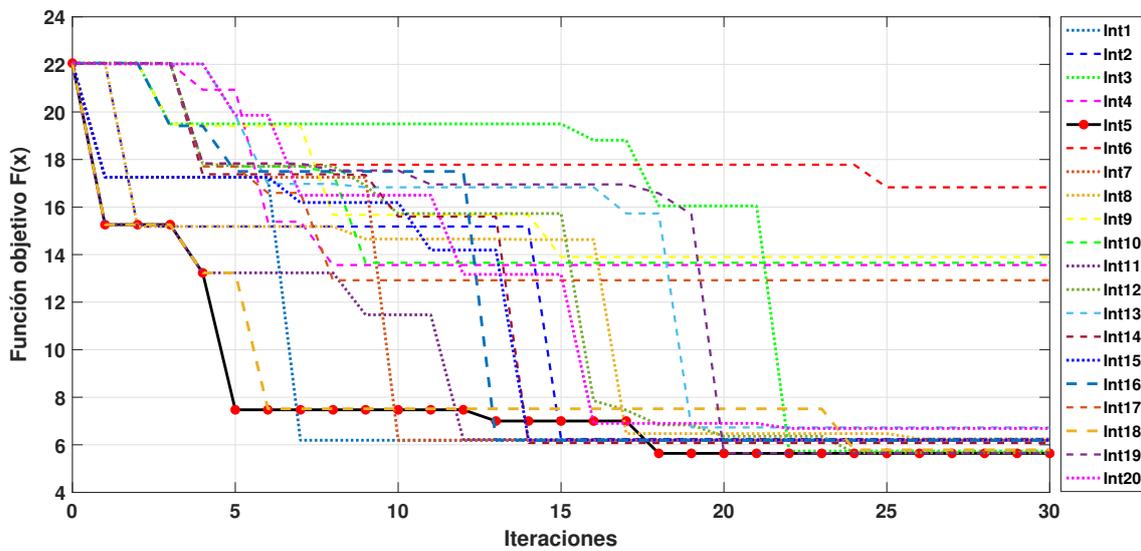


Figura 3.18. Intentos del algoritmo GA con prioridad BW

Fuente: Elaboración propia

Las iteraciones se separaron en segmentos de 5 para un mejor análisis entre los algoritmos. En las 5 primeras iteraciones, la mitad de los intentos del PSO llegó a sobrepasar el valor objetivo aceptable, siguiéndole el BA con 40 % y tan solo 5 % el GA. En las 5 iteraciones posteriores solo se tiene un aumento de 10 % el BA y 15 % el GA. En las 5 iteraciones siguientes solo obtuvo un aumento de 25 % el GA. Hasta la iteración 20 los tres algoritmos llegaron con 75 % el BA, 55 % el PSO y 70 % el GA. En la última iteraciones el PSO no tuvo aumento pero el BA y GA llegaron ambos al 75 %. En resumen, en el caso de la prioridad BW, en el PSO la mitad de los intentos llega cercano al objetivo en las 5 primeras iteraciones. En comparación con el algoritmo BA, mas de la mitad de los intentos sobrepasan al limite aceptable en las primeras iteraciones y va aumentando hasta las últimas iteraciones. En cambio, el GA se demora en llegar al objetivo pero logra pasar el limite aceptable en las últimas

iteraciones igualando al BA y sobrepasando al PSO. Todo lo descrito se encuentra en la Tabla 3.29.

El análisis de los porcentajes del valor objetivo descrito en el párrafo anterior, determina los valores que cruzan el límite aceptable pero no el valor mismo de la función objetivo. En ese caso, se analiza los valores finales de cada intento cuando concluye las 30 iteraciones. En la Tabla 3.30 se segmenta en valores de 5 el intervalo para determinar mejor el resultado. En el caso del BA, un 5 % de los valores de la función objetivo se encuentran en el rango de  $\langle 20 - 25 \rangle$ . En el siguiente rango, el PSO tiene un 40 % y solo un 5 % el algoritmo GA. En el rango  $\langle 5 - 10 \rangle$  la mayoría de los intentos de los 3 algoritmos se concentran en dicho rango, 70 % el BA, 55 % el PSO y 75 % el GA. El único algoritmo que se acercó más al objetivo fue el BA con un 5 %. Con dicho análisis se determina mejor los valores obtenidos por algoritmos y saber cual de ellos se acerca más al objetivo.

Tabla 3.30  
*Porcentaje de intervalo de función objetivo con prioridad BW*

Valor F(x)	BA (%)	PSO (%)	GA (%)
$\langle 20 - 25 \rangle$	5	0	0
$\langle 15 - 20 \rangle$	0	40	5
$\langle 10 - 15 \rangle$	20	5	20
$\langle 5 - 10 \rangle$	70	55	75
$[0 - 5]$	5	0	0

En esta sección se va a proceder a comparar los algoritmos según los parámetros que se eligieron para la evaluación de la función objetivo. Se escogió el mejor valor de cada algoritmo para realizar la comparación.

■ **Parámetro Ancho de Banda**

Recordando, para el ancho de banda se utiliza los valores de  $|S_{11}|_{dB}$  donde se escoge segmentos de regiones siendo 28 GHz el eje o frecuencia central. Con el objetivo de encontrar una simetría de la curva para la obtención del ancho de banda (BW) donde  $S_{11} < -10 dB$ . En la Fig.3.19 el ancho de banda de la región verde es del algoritmo GA con un  $BW = 306 MHz$  que está representada por la curva azul. Dicha curva se encuentra un poco desviada a la derecha por eso solo se acepta el rango de los puntos  $P_1$  y  $P_2$ . En el caso de la curva roja que pertenece al algoritmo BA se obtuvo un  $BW = 312 MHz$  delimitados por la región amarilla de los puntos  $P_3$  y  $P_4$ . El ancho de banda de los algoritmos BA y GA son muy cercanos, con una diferencia de tan solo

6 MHz. Por otro lado, la región celeste de la curva verde perteneciente al algoritmo PSO, cuenta con un buen ancho de banda  $BW = 360 MHz$  delimitados por los puntos  $P_5$  y  $P_6$ . Siendo el algoritmo PSO que encontró el mejor BW con la prioridad BW.

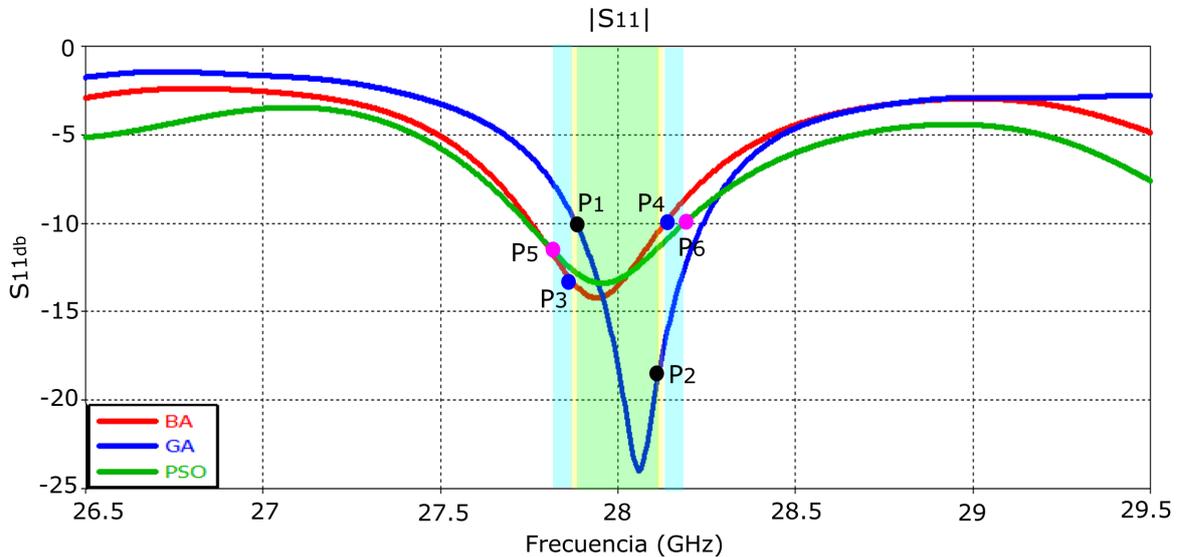


Figura 3.19. Comparación de BW con prioridad BW

Fuente: Elaboración propia

#### ■ Parámetro Ganancia máxima

Recordando, para el parámetro de la ganancia máxima, solo se considera el valor máximo obtenido de la ganancia. En este caso en la Fig.3.20 se muestra el patrón de radiación 3D en el campo lejano Far-field representando la ganancia obtenida y los lóbulos obtenidos para un mejor entendimiento. En la Fig. 3.20.a) se muestra el patrón de radiación del caso inicial con una  $G_{max} = 15,1 dB$  en su lóbulo principal. Además, cuenta con cuatro lóbulos secundarios de un color naranja muy notorios en ambos lados del lóbulo principal causando pérdida de ganancia al lóbulo principal. En la Fig. 3.20.b) se muestra el patrón del algoritmo BA con una  $G_{max} = 16,6 dB$ , con unos lóbulos secundarios verdosos pegados al lóbulo principal. En la Fig. 3.20.c) pertenece al algoritmo PSO que obtuvo una  $G_{max} = 16,8 dB$ , siendo el mejor resultado obtenido de los algoritmos comparados. Sus lóbulos secundarios apenas se muestra en el patrón de radiación, por tal motivo el lóbulo principal concentra casi toda la ganancia de la antena. Por último, en la Fig. 3.20.d) es del algoritmo GA, en comparación con el caso inicial tiene una  $G_{max} = 16,2 dB$  pero su ganancia es menor en comparación los otros dos algoritmos.

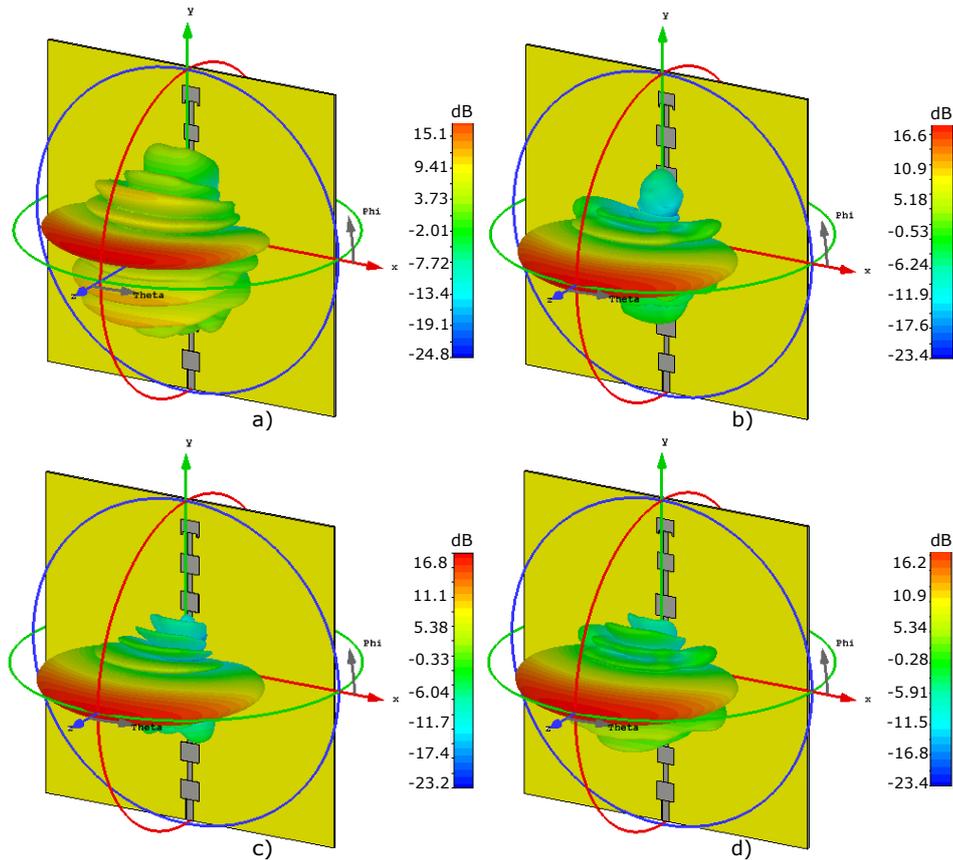


Figura 3.20. Patrón de radiación 3D con prioridad BW-a)Caso Inicial b)BA, c)PSO, d)GA  
Fuente: Elaboración propia

■ **Parámetro  $\delta\bar{G}_{\theta=1}$**

En este parámetro se busca que casi todos los valores de  $\phi$  en  $\theta = 1^\circ$  sea igual o muy cercano a la ganancia máxima obtenida. La representación 2D del patrón de radiación, grafica todos los valores de  $\phi \in [(-180) - 180]$  en la abscisa y en la ordenada los valores de  $\theta$ . Sólo se analizará  $\theta = 1^\circ$ . En la Fig.3.21.a) se muestra el patrón 2D del algoritmo BA. En  $\theta = 1^\circ$  el valor obtenido de  $\delta\bar{G}_{\theta=1}$  0,0693 dB. También, se puede apreciar en la grafica los lóbulos secundarios donde  $\phi \in [60 - 130]$  son horizontales en la punta con  $\theta \in [1 - 50]$ , dando a entender que en ese tramo la ganancia son casi iguales. La Fig.3.21.b) es resultado del algoritmo PSO con una  $\delta\bar{G}_{\theta=1}$  0,0810 dB. En dicho patrón 2D todas las puntas de sus lóbulos secundarios son un poco redondo por tal motivo, todos los valores de las ganancias en  $\theta = 1^\circ$  son parecidas a la ganancia máxima pero no tan cercanas. También se puede observar que sus lóbulos secundarios son semicírculos simétricos, causando que su ganancia se concentre en el lóbulo principal y tengan buena ganancia máxima como se evidencia en la Fig. 3.20.c). El resultado del algoritmo GA

se muestra en la Fig.3.21.c) con una  $\delta\overline{G}_{\theta=1}$  0,1932 dB siendo un valor mas alto que los otros dos algoritmos. Sus lóbulos secundarios tiene una región amarilla en la punta circular causando que el lóbulo principal no tenga toda la ganancia. Por tal motivo, la ganancia en  $\theta = 1^\circ$  no son tan parecidas.

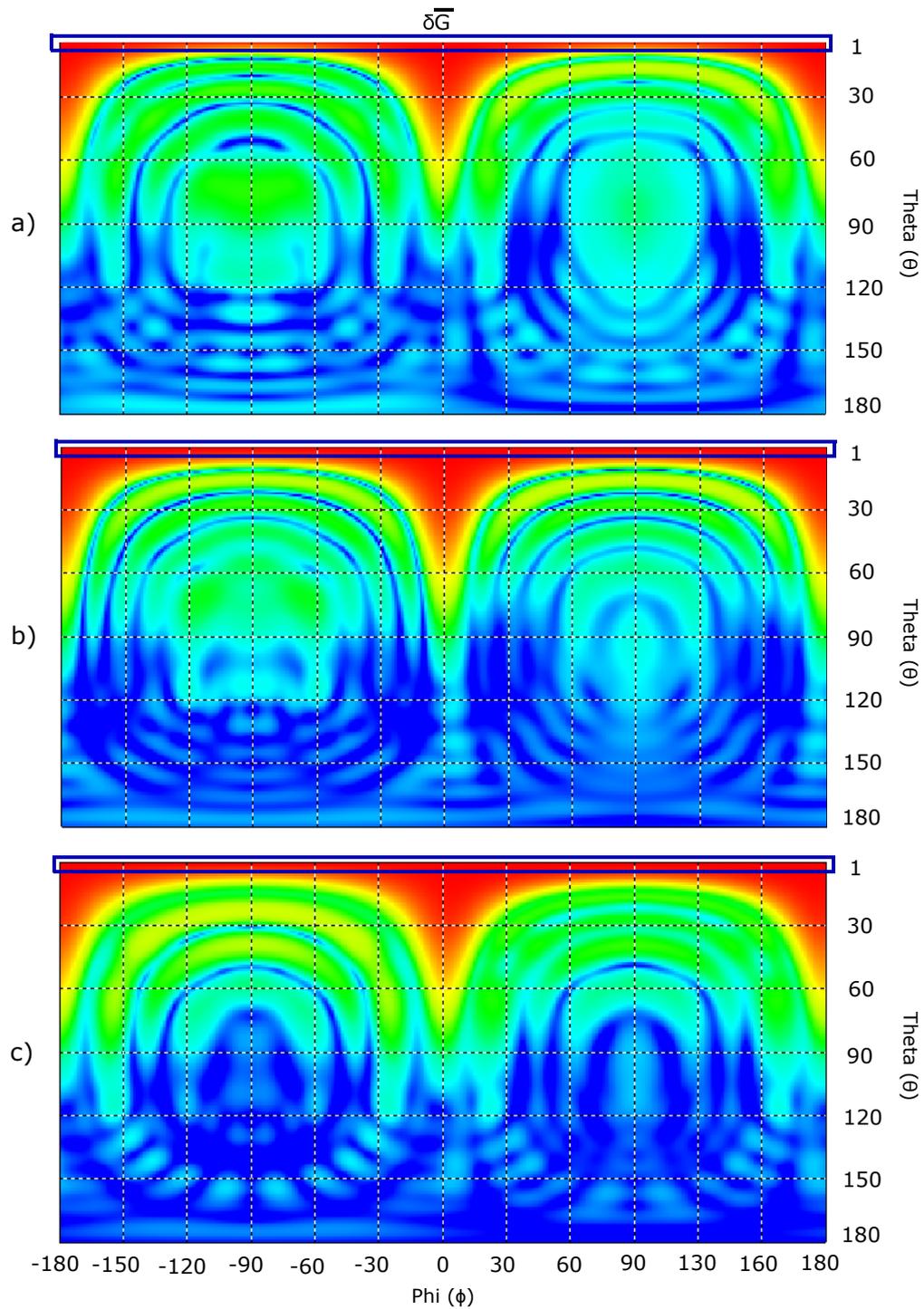


Figura 3.21. Patrón de radiación 2D del parámetro  $\delta\overline{G}_{\theta=1}$  - a)BA, b)PSO, c)GA  
Fuente: Elaboración propia

■ **Parámetros Ancho de Haz y ángulo de la ganancia máxima en Phi = 90°**

Recordando, para obtener el ancho de haz, primero se debe hallar la ganancia máxima, luego restarle 3 dB y ubicar los dos puntos de interceptación de la curva. Con dichos puntos se calcula la diferencia del valor de theta ( $\theta$ ) de cada punto obteniendo el valor del ancho de haz. Dicho eso, en la Fig.3.22.a) se muestra los valores de la ganancia a lo largo de  $\theta$  en el algoritmo BA, donde su  $HPBW_{\phi=90} = 9^\circ$  y el ángulo de la ganancia máxima es  $\angle G_{\phi=90}^{max} = 0^\circ$ . También, se puede apreciar sus tres lóbulos secundarios en cada lado que no son tan simétricos. La Fig.3.22.b) del algoritmo PSO, su ancho de haz esta desplazado  $0,03^\circ$  a la izquierda en comparación del algoritmo BA con  $HPBW_{\phi=90} = 9^\circ$ , es decir, su ancho de haz es y sus lóbulos secundarios son casi simétricos respecto al eje  $0^\circ$ . Por último, su ángulo de la ganancia máxima es  $\angle G_{\phi=90}^{max} = 0^\circ$ . En el caso del algoritmo GA de la Fig.3.22.c) su ancho de haz es mayor que los otros algoritmos con  $HPBW_{\phi=90} = 10^\circ$ , también, sus lóbulos secundarios no son simétricos y están mas dispersos en comparación con los otros algoritmos. Su ángulo de la ganancia máxima está desviado un poco a la derecha con  $\angle G_{\phi=90}^{max} = 1^\circ$ .

■ **Parámetros Ancho de Haz y ángulo de la ganancia máxima en Phi = 0°**

El resultado del algoritmo BA se muestra en la Fig.3.23.a), donde su ancho de haz es  $HPBW_{\phi=0} = 68^\circ$  siendo mucho mayor que  $\phi = 90$  debido a que es una antena serial y el ángulo de la ganancia máxima se encuentra en  $\angle G_{\phi=0}^{max} = 0^\circ$ . Para el caso del algoritmo PSO de la Fig.3.23.b), su ancho de banda es mayor que el ancho de haz del algoritmo BA. Siendo su  $HPBW_{\phi=0} = 70^\circ$ , a pesar de eso, el ángulo de la ganancia máxima sigue ubicado en  $\angle G_{\phi=0}^{max} = 0^\circ$ . Para la Fig.3.23.c) del algoritmo GA, su ancho de haz es  $HPBW_{\phi=0} = 70^\circ$ , siendo igual que el algoritmo PSO pero desviado  $0,03^\circ$  a la izquierda. Su ángulo de la ganancia máxima es  $\angle G_{\phi=0}^{max} = 0^\circ$ . En este parámetro, solo el algoritmo BA obtuvo un ancho de haz  $2^\circ$  mas angosto en comparación de los otros algoritmos.

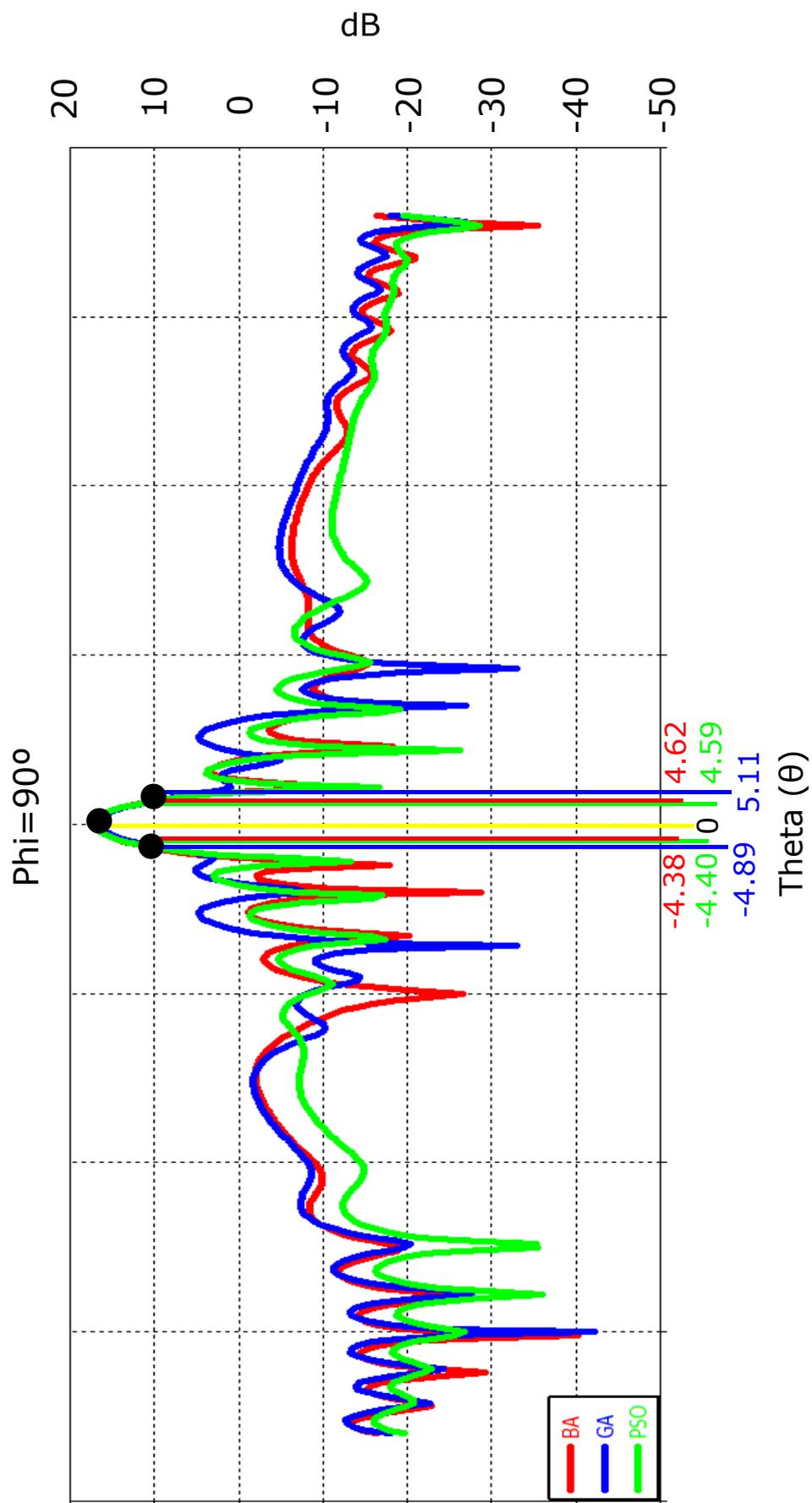


Figura 3.22. Plano cartesiano de la ganancia con  $\Phi=90^\circ$  - a)BA, b)PSO, c)GA  
Fuente: Elaboración propia

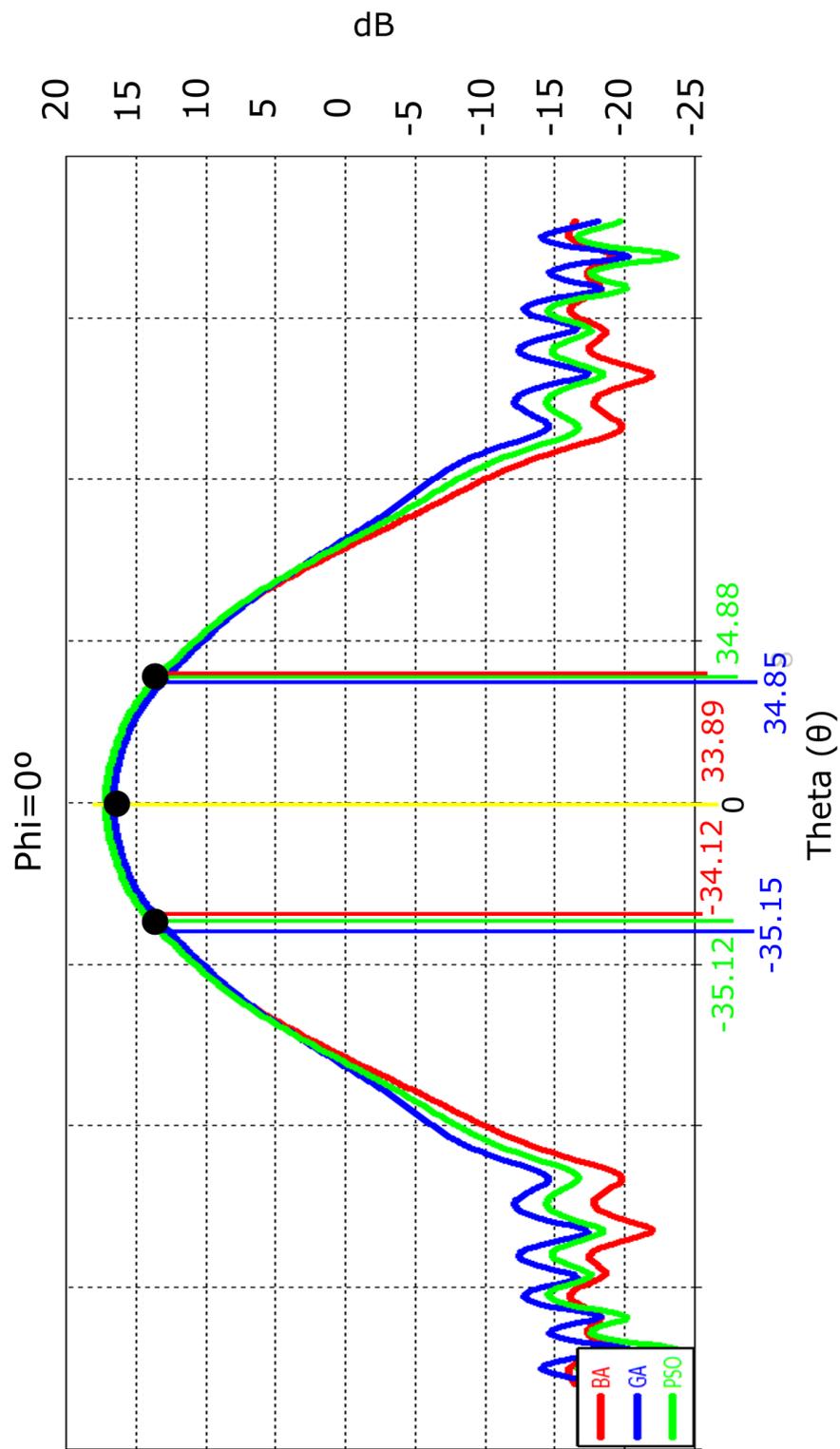


Figura 3.23. Plano cartesiano de la ganancia con  $\Phi=0^\circ$  - a)BA, b)PSO, c)GA  
 Fuente: Elaboración propia

## Comparación de la optimización con prioridad de la G

En el caso de la prioridad de la ganancia (G) se realiza el mismo análisis pero se tiene resultados muy distintos. Para el algoritmo BA los 20 intentos  $Int_i$  se muestra en la Fig. 3.24. Donde el 95 % de los intentos llegan a un valor objetivo  $F(x) \leq 10$  en las 5 primeras iteraciones manteniéndose con dicho porcentaje hasta la última iteración y solo se tiene 5 % no logra pasar el valor aceptable. Por ejemplo: el  $Int_8$  que esta muy cercano al valor aceptable con un valor de  $F(x) = 10,5532$  y a pesar de llegar a dicho valor en solamente la séptima iteración, no pudo disminuir mas. El intento que obtuvo el mejor valor  $F(x)$  es el  $Int_2$  de línea negra que tuvo una disminución gradual hasta la décima iteración, de ahí fue constante con un valor  $F(x) = 3,6407$ .

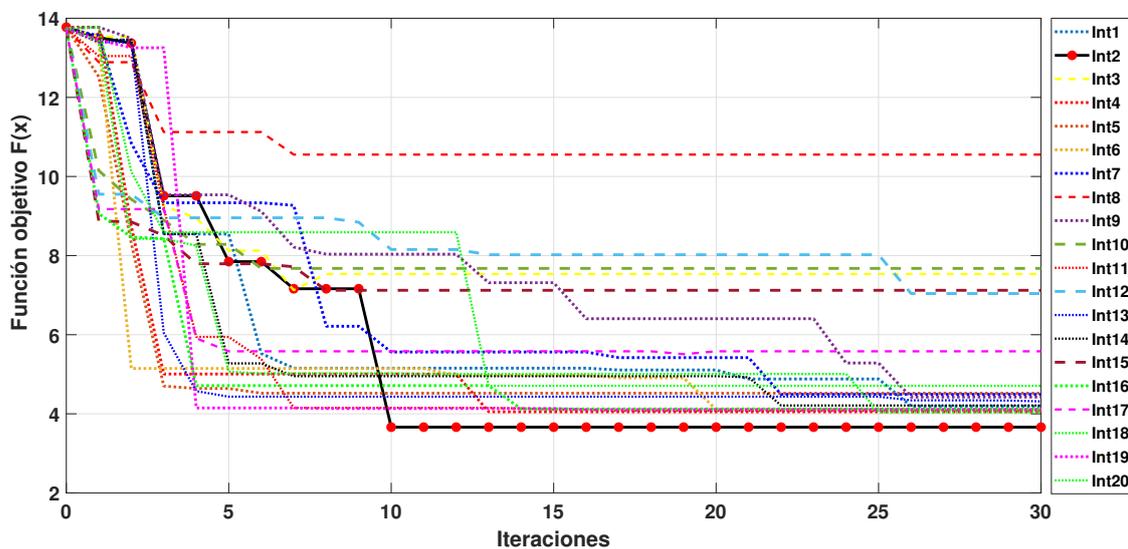


Figura 3.24. Intentos del algoritmo BA con prioridad G

Fuente: Elaboración propia

En el caso del algoritmo PSO, el 90 % de los intentos llegan a un valor aceptable menor a  $F(x) \leq 10$  en las 5 primeras iteraciones. En las siguiente 5 iteraciones llega a la totalidad de los intentos, para ser mas exacto, en la sexta iteración. A pesar de cruzar el valor aceptable, una pequeña cantidad de intentos tienen valores están en el rango de valores  $[8,7940 - 9,3136]$  y otros cercanos al valor cero. El intento que obtuvo el mejor valor  $F(x)$  es el  $Int_3$  de línea negra que tuvo una gran disminución hasta la tercera iteración, de ahí disminuyo mínimamente hasta obtener un valor  $F(x) = 3,9871$ . Todo lo descrito se muestra en la Fig. 3.25.

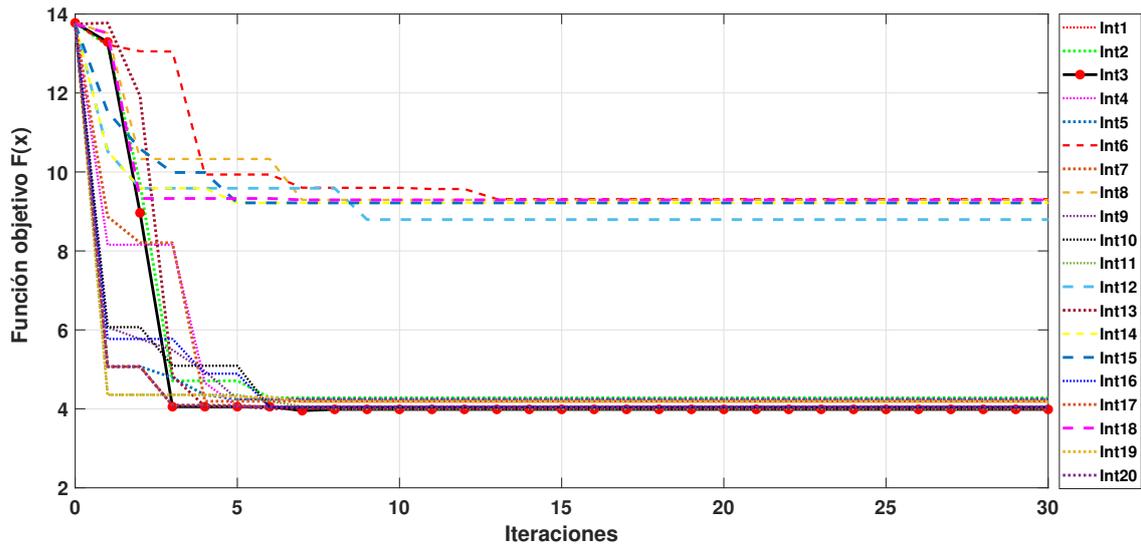


Figura 3.25. Intentos del algoritmo PSO con prioridad G

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 3.26 del algoritmo GA, muestra el 70 % de los intentos llegan a un valor aceptable  $F_{(x)} \leq 10$  en las 5 primeras iteraciones. En las 5 iteraciones posteriores llega a un 85 % manteniéndose constante hasta la iteración 15. Conforme aumenta 5 iteraciones logra llegar al 95 %. En la iteración 25 logra tener la totalidad de los intentos con valores aceptables. Todos los intentos disminuyen su valor objetivo poco a poco llegando a valores aceptable en iteración muy avanzadas. El intento que obtuvo el mejor valor  $F_{(x)}$  es el  $Int_8$  de línea negra que tuvo una disminución lenta hasta la quinceava iteración, de ahí disminuyó significativamente en la iteración 16 manteniéndose constante con un valor  $F_{(x)} = 3,7442$ .

Tabla 3.31

Porcentaje por iteraciones con prioridad G

Iteraciones	BA	PSO	GA
5	95	90	70
10	95	100	85
15	95	100	85
20	95	100	95
25	95	100	100
30	95	100	100

Todo lo mencionado anteriormente de los tres algoritmos se detalla en la Tabla 3.31. Donde en las 5 primeras iteraciones, los tres algoritmos sobrepasa el 70 %. Incluso el algoritmo BA, un 95 % de sus intentos logran cruzar el límite aceptable. En el caso del algoritmo PSO en sus 5 iteraciones posteriores, todos los valores de sus intentos son aceptable. En cambio,

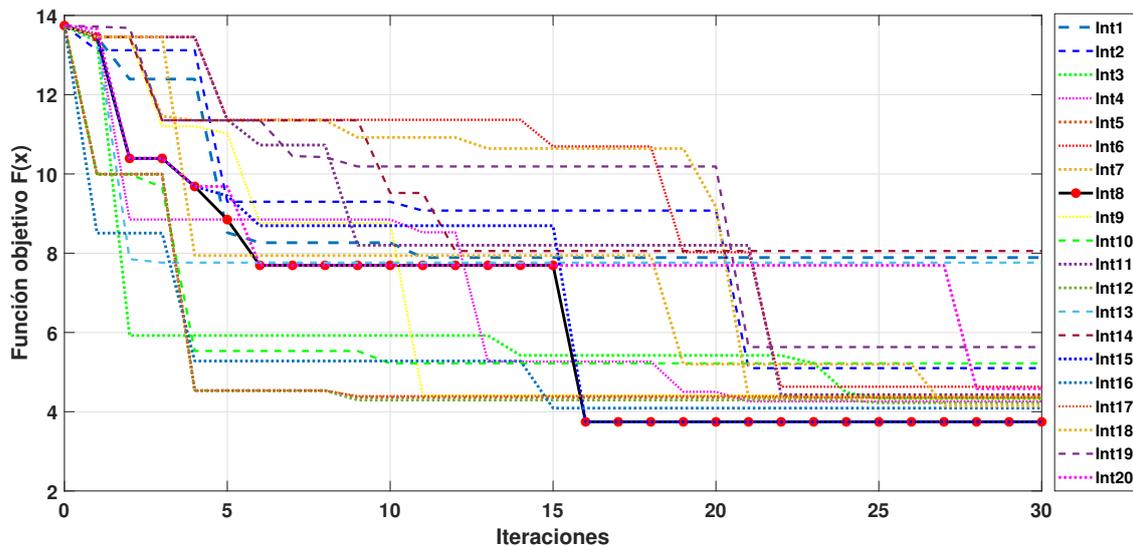


Figura 3.26. Intentos del algoritmo GA con prioridad G

Fuente: Elaboración propia

el GA un buen porcentaje (70 %) de sus intentos cruza el limite aceptable en el inicio pero los intentos restantes se demoran un poco en cruzar el valor del limite aceptable. A final, todos los valores de los intentos del GA son aceptables pero se demora más de 20 iteraciones en lograrlo. En resumen, en el caso de la prioridad G, en el algoritmo BA su totalidad de intentos tiene un valor aceptable pero ya no mejora en iteraciones posteriores. Los intentos del PSO cruzan el valor aceptable en unos intentos mas que el BA. En cambio, el GA tiene un buen inicio pero luego sus intentos se demoran mas en cruzar el valor aceptable en comparación con los otros algoritmos de optimización.

Tabla 3.32

Porcentaje de intervalo de función objetivo con prioridad G

Valor f(x)	BA (%)	PSO (%)	GA (%)
$\langle 20 - 25 \rangle$	0	0	0
$\langle 15 - 20 \rangle$	0	0	0
$\langle 10 - 15 \rangle$	5	0	0
$\langle 5 - 10 \rangle$	20	30	30
$[0 - 5]$	75	70	70

Como se comentó en la sección de la prioridad BW, en la Tabla 3.32 se analiza los valores finales de cada intento cuando concluye las 30 iteraciones. En el caso del BA tiene un 5 % en el rango  $\langle 10 - 15 \rangle$ . Siendo el único en comparación de los otros algoritmos en encontrarse en dicho rango. En el siguiente rango los tres algoritmos tienen menos del 31 % de sus valores de su función objetivo. En el último rango de  $[5 - 10]$ , el BA tiene un 5 % más que los

otros dos algoritmos, siendo el algoritmo que tiene mas intentos cercanos al valor deseado de la función objetivo. Con dichos resultados de los siete parámetros, se estaría cumpliendo el tercer objetivo específico.

Como se comento en el caso de la prioridad BW, se escogerá el mejor valor de cada algoritmo para realizar la comparación de sus parámetros.

■ **Parámetro Ancho de Banda**

En la Fig.3.27 la curva de color azul es el resultado del algoritmo GA con un  $BW = 123 MHz$ , siendo el más pequeño en comparación con los otros algoritmos. Dicha curva se encuentra desplazado a la izquierda, por tal motivo, su ancho de banda se encuentra en la región verde, delimitado por los puntos  $P_1$  y  $P_2$ . En el caso del algoritmo BA que esta representada por la curva roja se obtuvo un  $BW = 315 MHz$  delimitado por la región amarilla de los puntos  $P_3$  y  $P_4$ . Por otro lado, la región celeste de la curva verde perteneciente al algoritmo PSO, cuenta con un buen ancho de banda  $BW = 336 MHz$  delimitado por los puntos  $P_5$  y  $P_6$ . Solo las curvas de los algoritmos BA y PSO se encuentran simétrica respecto al eje central de  $28 GHz$ . Siendo el algoritmo PSO que encontró el mejor BW con la prioridad G.

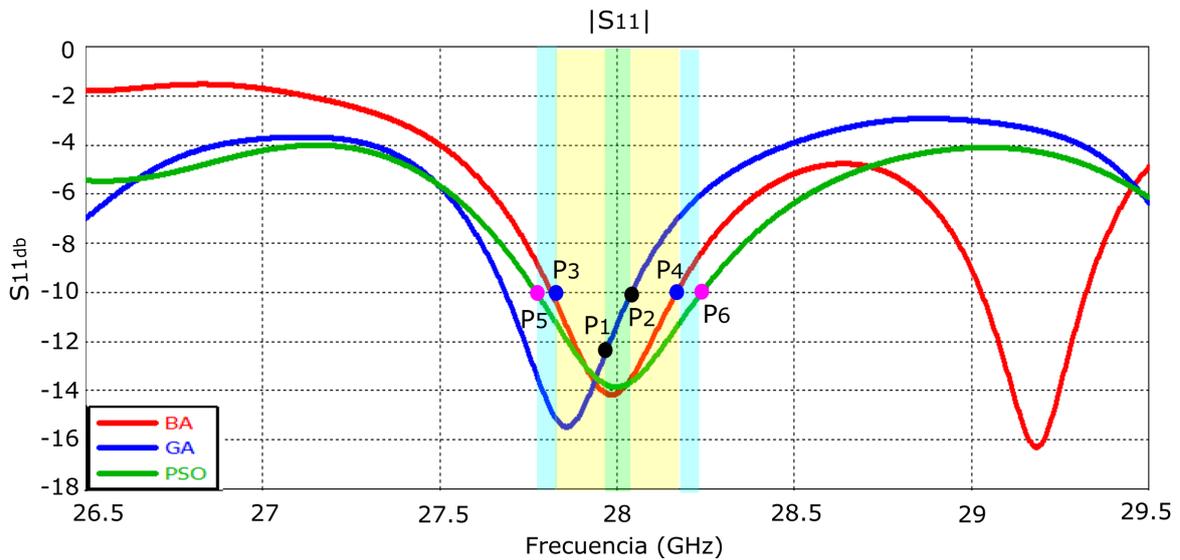


Figura 3.27. Comparación de BW con prioridad G  
Fuente: Elaboración propia

### ■ Parámetro Ganancia máxima

El patrón de radiación en 3D de los tres algoritmos que se estudia en esta tesis y el caso inicial se encuentran graficadas en la Fig.3.28. En la Fig. 3.28.a) se muestra el patrón de radiación del caso inicial con una  $G_{max} = 15,1 \text{ dB}$  en su lóbulo principal. Siendo el mismo patrón inicial que se mencionó en el parámetro de ganancia máxima con prioridad BW. En la Fig. 3.28.b) se muestra el patrón del algoritmo BA con una  $G_{max} = 16,6 \text{ dB}$ . Sus lóbulos secundarios apenas se muestra en el patrón de radiación. En la Fig. 3.28.c) pertenece al algoritmo PSO que obtuvo una  $G_{max} = 16,8 \text{ dB}$ , siendo el mejor resultado obtenido de los algoritmos comparados. Sus lóbulos secundarios apenas se muestra en el patrón de radiación como el algoritmo BA, por tal motivo el lóbulo principal concentra casi toda la ganancia de la antena. Por último, la Fig. 3.28.d) del algoritmo GA, cuenta con una  $G_{max} = 16,5 \text{ dB}$ , siendo el menor en comparación los otros dos algoritmos. Sus lóbulos secundarios son de un color naranja en su punta restándole ganancia al lóbulo principal.

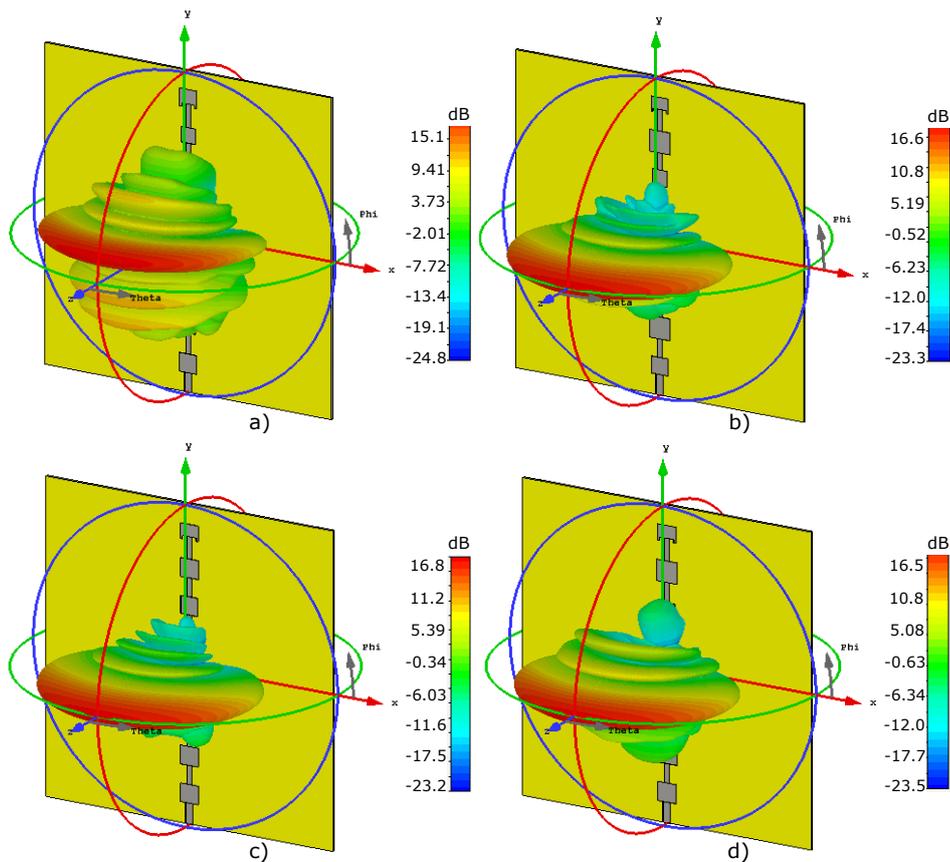


Figura 3.28. Patrón de radiación 3D con prioridad G-a)Caso Inicial b)BA, c)PSO, d)GA  
Fuente: Elaboración propia

▪ Parámetro  $\delta\bar{G}_{\theta=1}$

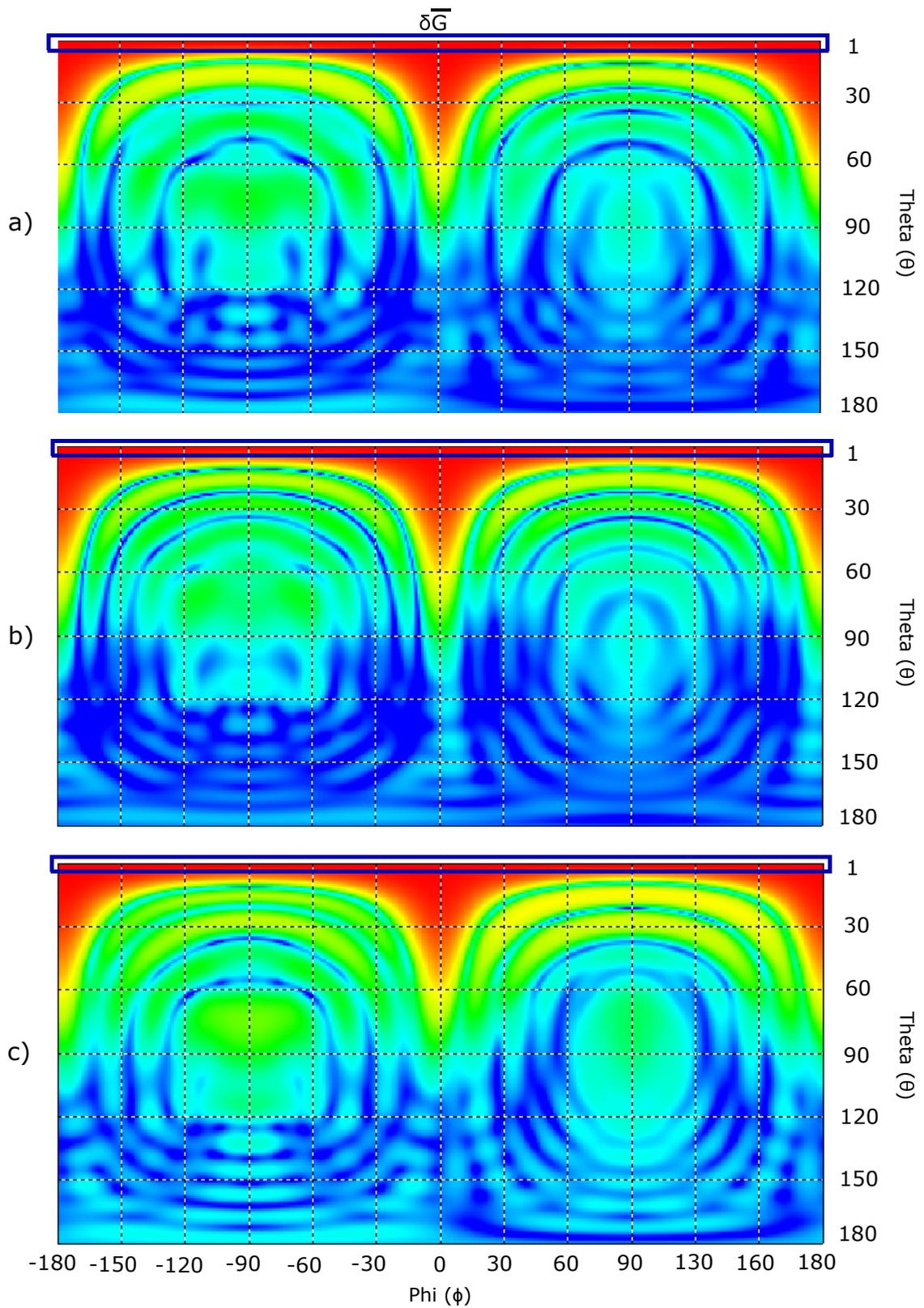


Figura 3.29. Patrón de radiación 2D del parámetro  $\delta\bar{G}_{\theta=1}$  - a)BA, b)PSO, c)GA  
Fuente: Elaboración propia

En la Fig.3.29.a) se muestra el patrón 2D del algoritmo BA. En  $\theta = 1^\circ$  el valor obtenido de  $\overline{\delta G}_{\theta=1}$  0,0752 dB. También, se puede apreciar en la grafica los lóbulos secundarios donde solo cuenta con un arco amarillento cercano al lóbulo principal. Los demás lóbulos son verdosos, indicando que no le quita ganancia al lóbulo principal. La Fig.3.29.b) es resultado del algoritmo PSO con una  $\overline{\delta G}_{\theta=1}$  0,0889 dB. En dicho patrón 2D toda las puntas de sus lóbulos secundarios son circulares, por tal motivo, todos los valores de las ganancias en  $\theta = 1^\circ$  son parecidas a la ganancia máxima pero no tan cercanas. También se puede observar que sus lóbulos secundarios son semicírculos simétricos, provocando que su ganancia se concentre en el lóbulo principal. El resultado del algoritmo GA se muestra en la Fig.3.29.c) con una  $\overline{\delta G}_{\theta=1}$  0,1338 dB siendo un valor más alto que el algoritmo PSO y el algoritmo BA. Sus lóbulos secundarios tiene dos regiones amarillas en la punta circular causando que el lóbulo principal no tenga toda la ganancia. También, en la parte inferior de la figura, se muestra regiones de color celeste indicando que se esta propagando un poco de ganancia perpendicular al lóbulo principal como se evidencia en la Fig. 3.28.d).

- **Parámetros Ancho de Haz y ángulo de la ganancia máxima en Phi = 90°**

El ancho de haz del algoritmo BA se muestra en la Fig.3.30.a) donde su ancho de haz  $HPBW_{\phi=90} = 9^\circ$  se encuentra mas a la derecha en comparación con los otros algoritmos. A pesar del desvío, su ángulo de la ganancia máxima se encuentra en el centro con el valor de  $\angle G_{\phi=90}^{max} = 0^\circ$ . También, se puede apreciar sus tres lóbulo secundarios del lado derecho escalonado. La Fig.3.30.b) del algoritmo PSO, su ancho de haz esta desplazado  $0,03^\circ$  a la izquierda en comparación del algoritmo BA con  $HPBW_{\phi=90} = 9^\circ$ . Sus lóbulos secundarios son escalonado en ambos lados dando simetría al patrón de radiación. Por último, su ángulo de la ganancia máxima es  $\angle G_{\phi=90}^{max} = 0^\circ$ . En el caso del algoritmo GA de la Fig.3.30.c) su ancho de haz es mayor que los otros algoritmos con  $HPBW_{\phi=90} = 9^\circ$  siendo su lóbulo principal el mas simétrico respecto al eje  $\theta = 0^\circ$  en comparación con los otros algoritmos. También, sus lóbulos secundarios no son simétricos y son mas anchos. Su ángulo de la ganancia máxima se encuentra centrado con  $\angle G_{\phi=90}^{max} = 0^\circ$ .

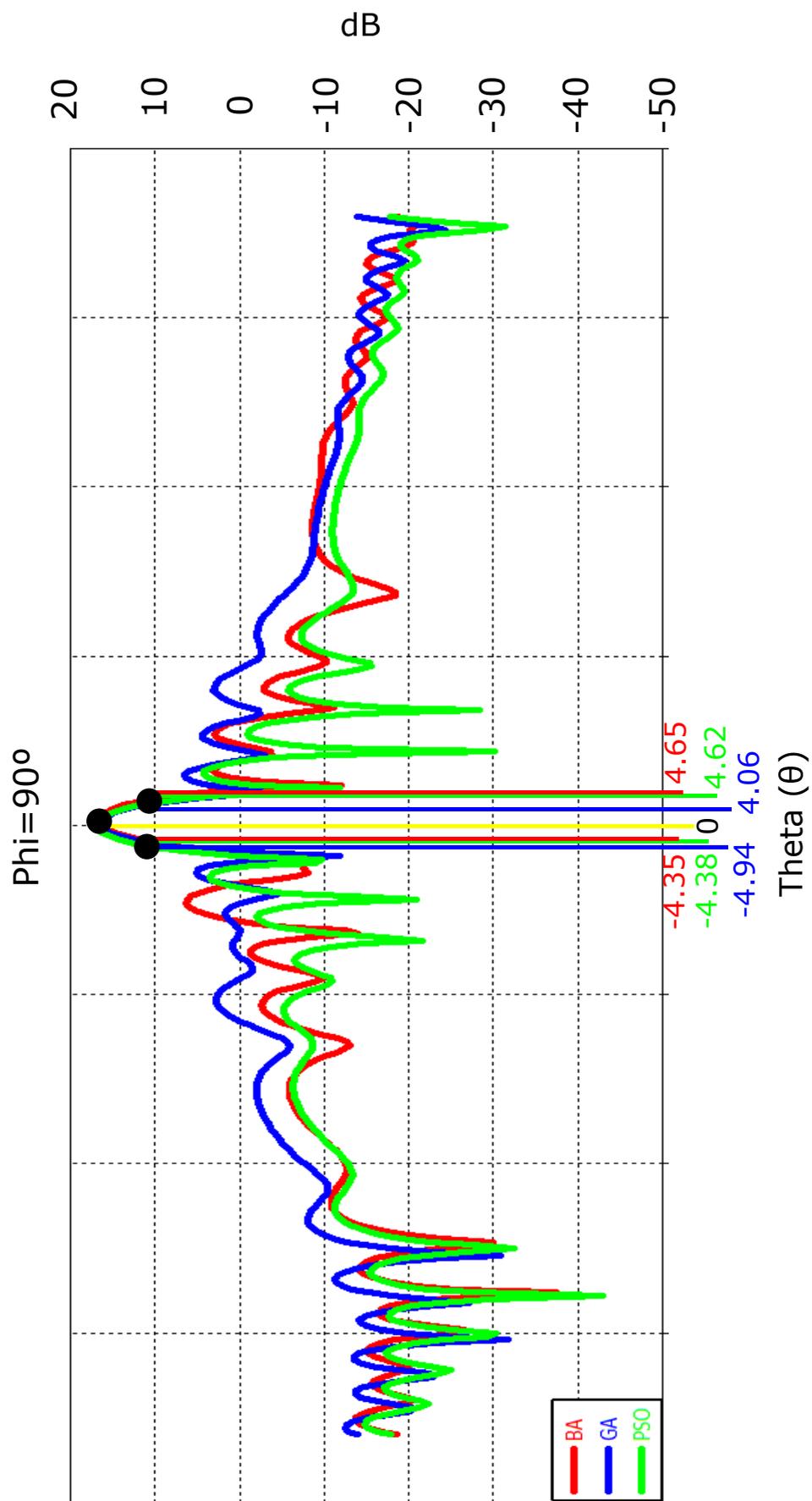


Figura 3.30. Plano cartesiano de la ganancia con  $\Phi=90^\circ$  - a)BA, b)PSO, c)GA  
 Fuente: Elaboración propia

- Parámetros Ancho de Haz y ángulo de la ganancia máxima en  $\Phi = 0^\circ$

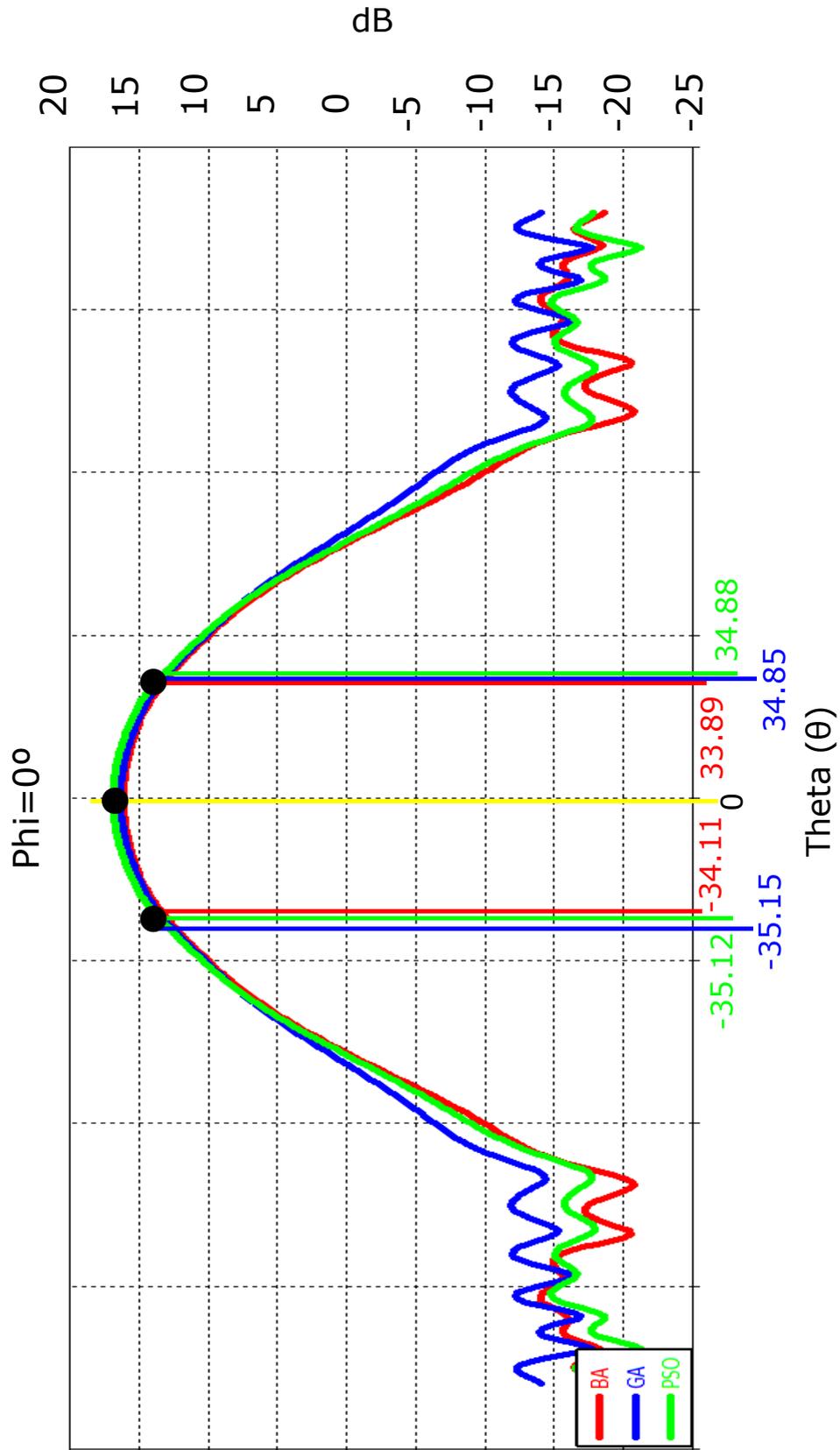


Figura 3.31. Plano cartesiano de la ganancia con  $\Phi = 0^\circ$  - a)BA, b)PSO, c)GA  
Fuente: Elaboración propia

El resultado del algoritmo BA se muestra en la Fig.3.31.a), donde su ancho de haz es  $HPBW_{\phi=0} = 68^\circ$ . Encontrándose  $0,05^\circ$  desplazado a la derecha en comparación con el algoritmo GA. También, su ángulo de ganancia máxima es  $\angle G_{\phi=0}^{max} = 0^\circ$ . Para el caso del algoritmo PSO de la Fig.3.31.b), su ancho de banda es igual al ancho de haz del algoritmo BA. Siendo su  $HPBW_{\phi=0} = 70^\circ$  con su ángulo de ganancia máxima  $\angle G_{\phi=0}^{max} = 0^\circ$ . Para la Fig.3.31.c) del algoritmo GA, su ancho de haz es  $HPBW_{\phi=0} = 68^\circ$ , siendo el mas angosto que el algoritmo PSO si se compara. Como los otros algoritmos su ángulo de ganancia máxima es  $\angle G_{\phi=0}^{max} = 0^\circ$ .

En las dos prioridades analizadas, los tres algoritmos presentan diferentes resultados y en otras ocasiones valores de parámetros cercanos. En el caso de la prioridad BW, el algoritmo PSO encontró el mejor ancho de banda pero la función objetivo obtiene un valor de 7 parámetros y no solo del ancho de banda, por tal motivo, el algoritmo que presentó el menor valor objetivo fue el algoritmo BA con  $F(x) = 4,6291$ . Dicho resultado lo obtuvo en la iteración  $Ite_{Obj} = 28$ , casi por culminar el total de iteraciones establecidas. En cambio, en la prioridad G, los tres algoritmos presentan valores de la función objetivo cercano. Como la prioridad anterior, el algoritmo PSO obtuvo el mejor ancho de banda y ganancia pero en los parámetros restantes, el algoritmo BA tiene mejores resultados. En conjunto con los siete parámetros, el algoritmo BA obtuvo el menor valor objetivo con  $F(x) = 3,6407$  en la iteración  $Ite_{Obj} = 10$ . Le sigue el algoritmo GA con  $F(x) = 3,7442$ . En esta prioridad, los anchos de haces marca gran diferencia en la obtención del menor valor de la función objetivo.

La Tabla 3.33 resume todo los valores de los parámetros obtenidos de cada algoritmo y por prioridad, además, en la columna  $Ite_{Obj}$  indica la iteración que el algoritmo obtuvo su mejor valor objetivo. Con los descrito en párrafos anteriores, se logró cumplir el cuarto objetivo específico de esta tesis.

Tabla 3.33

Resumen de mejores resultados por algoritmo y por prioridad

	<i>BW</i>	<i>G</i>	$\delta\bar{G}_{\theta=1}$	<i>HPBW</i> <sub><math>\phi=90</math></sub>	<i>HPBW</i> <sub><math>\phi=0</math></sub>	$\angle G_{\phi=90}^{max\theta}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\theta}$	<i>F(x)</i>	<i>Ite</i> <sub>Obj</sub>
Prioridad BW	<i>BA</i>	312	16.5760	0.0693	9	68	0	4.6291	28
	<i>PSO</i>	360	16.8353	0.0810	9	70	0	5.1730	11
	<i>GA</i>	306	16.2058	0.1932	10	70	1	5.6399	18
Prioridad G	<i>BA</i>	315	16.6621	0.0752	9	68	0	3.6407	10
	<i>PSO</i>	336	16.8543	0.0889	9	70	0	3.9871	7
	<i>GA</i>	123	16.4903	0.1338	9	68	0	3.7442	16

## CAPITULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- La antena del trabajo "Diseño de antenas de parche multicapas apiladas de banda ancha con alimentación diferencial basado en el algoritmo murciélago"  $A_I$  tiene una mejora de 25.5 % en su ancho de banda siendo menor a los 49.5 % de la presente tesis, eso es debido por el tipo de arreglo que esta construido. También, el ancho de haz es amplio en  $\phi = 90$  y  $\phi = 0$  por emitir un patrón de radiación como una sola antena y su ganancia es menor con 6.4 dBi. La cantidad de iteraciones requerida de  $A_I$  solo fue necesario 20, siendo 10 iteraciones menos que la tesis. EL algoritmo BA de  $A_I$  brindo mejores como la tesis en las dos prioridades trabajadas.
- El trabajo "Síntesis de agrupaciones de antenas por medio de optimización estocástica"  $A_{II}$  esta enfocado en una arreglo de antenas sobresaliendo el algoritmo PSO brindando una ganancia de 17 dBi con su ancho de haz en  $\phi = 0$  con  $31.7^\circ$  siendo menos de la mitad del ancho de haz de la tesis, eso es debido a la mayor cantidad de antenas que contiene. En  $A_{II}$  y *Tesis* están centrado en  $0^\circ$  el lóbulo principal donde se encuentra la ganancia máxima. La cantidad de iteraciones requerida de  $A_{II}$  fue requerido 500 debido a la complejidad de su función objetivo y la cantidad de antenas siendo 16 distribuido en 4 filas.
- Si se utiliza una antena multicapa tendrás menores dimensiones pero poca ganancia y ancho de banda. Si se utiliza un arreglo lineal aumenta el ancho de banda significativamente con la ganancia pero solo se tiene mejora el ancho de haz en  $\phi = 90$ . Por ultimo, si se trabaja un arreglo planar la ganancia aumenta y el ancho de haz disminuye para  $\phi = 90$  y  $\phi = 0$  pero requerirá de muchas iteraciones para lograr el objetivo. Todo lo mencionado se muestra en la Tabla 3.34.

Tabla 3.34

Comparación de la antena parche serial

\*/: Valor no mencionado

	Longitud	BW	G	HPBW <sub>φ=90</sub>	HPBW <sub>φ=0</sub>	$\angle G_{\phi=90}^{maxO^i}$	$\angle G_{\phi=0}^{maxO^i}$	$\delta \bar{G}_{\theta=1}$	T <sub>Ant</sub>	Ite
A <sub>I</sub>	50x50	25.5%	6.4	93	87	0	0	/*	Multicapas	20
A <sub>II</sub>	/*	/*	17	28.7	31.7	0	0	/*	Planar	500
Tesis	61.5x61.5	49.5%	16.6621	9	68	0	0	0.0752	Lineal	30

## CAPITULO V: CONCLUSIONES

A lo largo de la investigación, se lograron con éxito los objetivos planteados para la optimización de la antena serial de 8 parches mediante algoritmos bio-inspirados.

En el marco del primer objetivo específico, se estableció una función objetivo que incorpora siete parámetros de la antena, contemplando prioridades tanto para el ancho de banda como para la ganancia. Esta función demostró su eficacia al guiar los algoritmos (Murciélagos, PSO, GA) hacia soluciones que cumplen con las prioridades de optimización.

La adaptación de los algoritmos se llevó a cabo mediante la inclusión de funciones vinculadas con macros al simulador electromagnético. Esta estrategia permitió un análisis comparativo efectivo de la eficacia de los algoritmos en la optimización de la antena serial de 8 parches.

Al analizar la eficacia de los algoritmos en función de la priorización de los parámetros para mejorar la antena, se observó que, en ambos casos de prioridad, el algoritmo PSO destacó por su rendimiento superior en términos de ancho de banda y ganancia. Sin embargo, el algoritmo BA se reveló como el más apropiado al obtener un valor objetivo menor, demostrando su eficiencia en la optimización de la antena.

En la comparación final de los resultados obtenidos por los tres algoritmos, se concluyó que, a pesar de la rapidez y eficacia del PSO, el BA se posiciona como la elección preferida, especialmente al priorizar la ganancia. Estas conclusiones respaldan de manera integral la efectividad de la metodología implementada en la optimización de la antena serial de 8 parches.

## RECOMENDACIONES

En el proceso de optimización para la antena de parche en serie, se recomienda realizar un análisis detallado de los parámetros involucrados. Esto implica entender cómo ajustar un parámetro puede afectar a otros, lo cual facilitará la toma de decisiones informadas durante la optimización. Asimismo, se sugiere explorar la sensibilidad cruzada entre los parámetros para obtener una comprensión más profunda de la interdependencia de los elementos del diseño.

Además, se recomienda la inclusión de restricciones adicionales en la función objetivo también se presenta como una estrategia valiosa para mejorar la aplicabilidad de las soluciones encontradas, reflejando limitaciones prácticas en los valores de los parámetros.

La investigación de algoritmos específicamente diseñados para la optimización multi-objetivo, como NSGA-II o SPEA2, es recomendada como una alternativa eficiente para mejorar más de un aspecto a la vez. Visualizar el frente de Pareto resultante de esta optimización proporciona una representación gráfica clara de soluciones no dominadas, facilitando la toma de decisiones fundamentada en el diseño de la antena.

Para adaptarse a cambios en las prioridades del diseño, se recomienda diseñar la función objetivo de manera que pueda ajustarse. La introducción de parámetros de ajuste que modifiquen la importancia relativa de los objetivos permite una mayor flexibilidad durante el proceso de optimización. Además, se sugiere explorar cómo los algoritmos se comportan en escenarios dinámicos, adaptándose a cambios constantes en objetivos y restricciones, lo cual es esencial para garantizar una adaptabilidad efectiva a condiciones en constante cambio.

La validación experimental de las soluciones obtenidas a través de la optimización es crucial y se recomienda para asegurar que sean aplicables en situaciones prácticas y verificar la eficacia de la función objetivo multi-objetivo. Por último, se recomienda optimizar la implementación de los algoritmos para manejar eficientemente el alto número de objetivos en juego, garantizando un rendimiento rápido y eficaz incluso con múltiples aspectos a mejorar.

## PRESPECTIVA

En el ámbito de la optimización de antenas de parche en serie, este estudio proporciona una sólida base para futuras investigaciones que podrían ampliar significativamente el alcance y la aplicabilidad de los resultados obtenidos. Una dirección sugerente para la continuación de este trabajo sería la expansión del enfoque actual hacia arreglos de antenas más grandes, como un arreglo de 8x8 elementos. Esto permitiría una evaluación más detallada de las capacidades de optimización en configuraciones más complejas y extensas

Además, la inclusión de funciones objetivo adicionales podría ser clave para enriquecer la investigación. Considerar parámetros más detallados del rendimiento de la antena, como la relación señal-ruido, la eficiencia energética y la capacidad para resistir interferencias, abriría nuevas oportunidades para la mejora del arreglo de antenas y su adaptabilidad a diferentes contextos.

Una dirección emocionante para futuras investigaciones podría ser la implementación de técnicas de beamforming en el arreglo de antenas optimizado. Esta aplicación podría mejorar significativamente la dirección y concentración de la señal, ofreciendo oportunidades valiosas para aplicaciones como comunicaciones avanzadas o sistemas de radar.

Explorar la respuesta del arreglo de antenas a múltiples funciones objetivo sería otro paso interesante. Este enfoque multifunción permitiría una adaptación más específica a diferentes aplicaciones y escenarios, maximizando la versatilidad del sistema.

Considerar la integración de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial o nuevos materiales, podría catapultar aún más el rendimiento del arreglo de antenas hacia el futuro, abriendo nuevas posibilidades y desafíos.

Para respaldar los resultados teóricos, se podría llevar a cabo una validación experimental en entornos del mundo real, proporcionando una perspectiva más completa sobre la aplicabilidad práctica de los hallazgos.

Finalmente, explorar cómo las mejoras en el arreglo de antenas podrían impactar aplicaciones específicas, como la comunicación 5G, el Internet de las cosas (IoT) o la detección remota, ofrecería una comprensión más profunda de las aplicaciones prácticas de esta investigación.

En resumen, estas perspectivas futuras destacan áreas emocionantes y desafiantes para la investigación en optimización de antenas, señalando la relevancia continua de esta tesis en el panorama tecnológico en constante evolución.

## BIBLIOGRAFÍA

- 3GPP. (2021). 3rd generation partnership project: 3gpp ts 38.101–2. *3GPP, V16.4.0*. Descargado de [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38\\_series/38.101-2/](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.101-2/).
- Aboserwal, N. A., Salazar, J. L., Ortiz, J. A., Díaz, J. D., Fulton, C., y Palmer, R. D. (2018). Source current polarization impact on the cross-polarization definition of practical antenna elements: Theory and applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *66*(9), 4391-4406. doi: 10.1109/TAP.2018.2845945
- Altshuler, E. (2002). Electrically small self-resonant wire antennas optimized using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *50*(3), 297-300. doi: 10.1109/8.999619
- Arce Casas, A. (2008). *Síntesis de agrupaciones de antenas por medio de optimización estocástica* (Tesis Doctoral no publicada). Tesis de maestría en ciencias en electrónica y telecomunicaciones, CICESE. 83pp.
- Balanis, C. A. (2008). *Modern antenna handbook*. John Wiley & Sons.
- Balanis, C. A., y Ioannides, P. I. (2007). Introduction to smart antennas. *Synthesis Lectures on Antennas*, *2*(1), 1–175.
- Bansal, A., Sethi, G., y Sharma, S. (2018). Pso optimized nested slot structure rfid tag antenna at 5.8 ghz for metallic applications. En *2018 2nd international conference on micro-electronics and telecommunication engineering (icmete)* (p. 81-84). doi: 10.1109/ICMETE.2018.00029
- Carsenat, D., y Decroze, C. (2012). Uwb antennas beamforming using passive time-reversal device. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *11*, 779-782. doi: 10.1109/LAWP.2012.2207872
- Chen, G., Qian, J., Zhang, Z., y Sun, Z. (2019). Multi-objective optimal power flow based on hybrid firefly-bat algorithm and constraints- prior object-fuzzy sorting strategy. *IEEE Access*, *7*, 139726-139745. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2943480
- Chen, Z.-N., Liu, D., Nakano, H., Qing, X., y Zwick, T. (2016). Handbook of antenna technologies. En *Handbook of antenna technologies* (Vol. 1, pp. XXXI, 3473). United States: Springer Publishing Company. (Publisher Copyright: © Springer Science+Business Media Singapore 2016. All rights reserved.) doi: 10.1007/978-981-4560-44-3

- Deng, H., y Himed, B. (2009). A virtual antenna beamforming (vab) approach for radar systems by using orthogonal coding waveforms. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57(2), 425-435. doi: 10.1109/TAP.2008.2011387
- Dey, N. (2020). *Applications of firefly algorithm and its variants*. Springer.
- Ding, Y.-H., y You, W.-B. (2020). Sensor placement optimization based on an improved inertia and adaptive particle swarm algorithm during an explosion. *IEEE Access*, 8, 207089-207096. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038168
- Dong, C., Xiong, Z., Liu, X., Ye, Y., Yang, Y., y Guo, W. (2019). Dual-search artificial bee colony algorithm for engineering optimization. *IEEE Access*, 7, 24571-24584. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2899743
- Dziwiński, P., y Bartczuk, □. (2020). A new hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm method controlled by fuzzy logic. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28(6), 1140-1154. doi: 10.1109/TFUZZ.2019.2957263
- Eberhart, R., y Shi, Y. (2000a). Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. En *Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation. cec00 (cat. no.00th8512)* (Vol. 1, p. 84-88 vol.1). doi: 10.1109/CEC.2000.870279
- Eberhart, R., y Shi, Y. (2000b). Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. En *Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation. cec00 (cat. no.00th8512)* (Vol. 1, p. 84-88 vol.1). doi: 10.1109/CEC.2000.870279
- Eusuff, M. M., y Lansey, K. E. (2003). Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Water Resources planning and management*, 129(3), 210–225.
- Farasat, M., Thalakituna, D. N., Hu, Z., y Yang, Y. (2021). A review on 5g sub-6 ghz base station antenna design challenges. *Electronics*, 10(16), 2000.
- Feng, Y., Zhang, W., Han, G., Kang, Y., y Wang, J. (2020). A newborn particle swarm optimization algorithm for charging-scheduling algorithm in industrial rechargeable sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 20(18), 11014-11027. doi: 10.1109/JSEN.2020.2994113
- Gao, Y., Wang, J., Gao, S., y Cheng, Y. (2021). An integrated robust design and robust control strategy using the genetic algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*,

- 17(12), 8378-8386. doi: 10.1109/TII.2021.3056417
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning* (1.<sup>a</sup> ed.). Addison-Wesley Professional. Descargado de [libgen.li/file.php?md5=8ac0783ba24b71236b695cbdfab2ca67](https://libgen.li/file.php?md5=8ac0783ba24b71236b695cbdfab2ca67)
- GSMA. (2021). 5g spectrum gsma public policy position. *5G SPECTRUM*. Descargado de <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2022/06/5G-Spectrum-Positions.pdf>
- Gupta, A. (2021). Bat optimization algorithm. *MATLAB Central File Exchange*. Descargado de <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/68981-bat-optimization-algorithm>
- Ieee standard definitions of terms for antennas. (1983). *IEEE Std 145-1983*, 1-31. doi: 10.1109/IEEESTD.1983.82386
- Jin, N., y Rahmat-Samii, Y. (2005). Parallel particle swarm optimization and finite-difference time-domain (psd/fdd) algorithm for multiband and wide-band patch antenna designs. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53(11), 3459-3468. doi: 10.1109/TAP.2005.858842
- Josefsson, L., y Persson, P. (2006). *Conformal array antenna theory and design*. John Wiley & sons.
- Kamran, M., Abd Rahman, T., Yamada, Y., y Sakakibara, K. (2017, 09). 8x8 phased series fed patch antenna array at 28 ghz for 5g mobile base station antennas.. doi: 10.1109/APWC.2017.8062268
- Kaur, S., Srivastava, M., Sharma, N. K., Bhatia, K. S., Yimam, F. A., Kaur, H., y Bajaj, M. (2021). Hybrid local-global optimum search using particle swarm gravitation search algorithm (hlgos-psgsa) for waveguide selection. *IEEE Access*, 9, 127866-127882. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3112069
- Kennedy, J., y Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. En *Proceedings of icnn '95 - international conference on neural networks* (Vol. 4, p. 1942-1948 vol.4). doi: 10.1109/ICNN.1995.488968
- Kerkhoff, A. J., y Ling, H. (2007). Design of a band-notched planar monopole antenna using genetic algorithm optimization. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(3), 604-610. doi: 10.1109/TAP.2007.891563
- Korani, W. (2021). Particle swarm optimization. *MATLAB Central File Exchange*. Descarga-

do de <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20205-particle-swarm-optimization>

- Kumar, A. S. (2017). Rectangular micro strip antenna design using particle swarm optimization, neural networks and genetic algorithms. En *2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICIC)* (p. 1-5). doi: 10.1109/ICIC.2017.8523827
- Kumar, N., y Kumar Sharma, S. (2018). Inertia weight controlled pso for task scheduling in cloud computing. En *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)* (p. 155-160). doi: 10.1109/GUCON.2018.8674994
- Li, F., Ji, W., Tan, S., Xie, Y., Guo, X., Liu, H., y Yao, Y. (2020). Quantum bacterial foraging optimization: From theory to mimo system designs. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1, 1632-1646. doi: 10.1109/OJCOMS.2020.3031449
- Li, J.-Q., Song, M.-X., Wang, L., Duan, P.-Y., Han, Y.-Y., Sang, H.-Y., y Pan, Q.-K. (2020). Hybrid artificial bee colony algorithm for a parallel batching distributed flow-shop problem with deteriorating jobs. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 50(6), 2425-2439. doi: 10.1109/TCYB.2019.2943606
- Liang, H., Liu, Y., Shen, Y., Li, F., y Man, Y. (2018). A hybrid bat algorithm for economic dispatch with random wind power. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(5), 5052-5061. doi: 10.1109/TPWRS.2018.2812711
- Liang, X., Yin, W., Chen, A., Zhang, Z., Zeng, J., Shi, L., ... Zi, J. (2020). Ultrawideband, wide scanning stripline-fed tightly coupled array antenna based on parallel-dipole elements. *Sensors*, 20(18), 5065.
- Lin, M., Wang, Z., y Wang, F. (2019). Hybrid differential evolution and particle swarm optimization algorithm based on random inertia weight. En *2019 34th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)* (p. 411-414). doi: 10.1109/YAC.2019.8787698
- Markus Voelter, U. Z., Michael Kircher. (2003). *Antenna theory design* (Rev Sub ed.). Wiley-IEEE Press. Descargado de <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=10d0d53b5bfb84cfe053235864d72e5f>
- Mercangöz, B. A. (2021). *Applying particle swarm optimization: New solutions and cases for optimized portfolios 306* (1.ª ed.). Springer. Descargado de [libgen.li/file.php?md5=6f86b77fd2262c6562f031707ed3bd38](http://libgen.li/file.php?md5=6f86b77fd2262c6562f031707ed3bd38)

- Miura, R., Tanaka, T., Chiba, I., Horie, A., y Karasawa, Y. (1997). Beamforming experiment with a dbf multibeam antenna in a mobile satellite environment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 45(4), 707-714. doi: 10.1109/8.564097
- Moayedi, H., Bui, D. T., y Thi Ngo, P. T. (2020). Shuffled frog leaping algorithm and wind-driven optimization technique modified with multilayer perceptron. *Applied Sciences*, 10(2), 689.
- Palomino de la Gala, M., y cols. (2016). Examen de las políticas de ciencia, tecnología e innovación del Perú: logros y desafíos de las políticas públicas de cti Perú.
- Pan, Y., y Zhang, J. (2019). Side lobes suppression for linear antenna array by using bat algorithms. En *2019 cross strait quad-regional radio science and wireless technology conference (csqrwc)* (p. 1-2). doi: 10.1109/CSQRWC.2019.8799193
- Pozar, D. M. (2011). *Microwave engineering*. John Wiley & sons.
- Presnell, R. (1974). A limited-scan phased-array antenna for use with a clutter-mapping radar system. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 22(4), 599-603. doi: 10.1109/TAP.1974.1140857
- Pumallica-Paro, M. A., Arizaca-Cusicuna, J. L., y Clemente-Arenas, M. (2019). A multi-objective genetic algorithm for analysis, design and optimization of antipodal vivaldi antennas. En *2019 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)* (p. 316-321). doi: 10.1109/APWC.2019.8870420
- Remcom. (2019). Em simulation of 28 ghz series-fed patch antenna array for 5g. *Remcom Electromagnetic Simulation Software*(1), 1–6. Descargado de <https://es.remcom.com/examples/2018/7/25/em-simulation-of-28-ghz-series-fed-patch-antenna-array-for-5g>
- Rodríguez-Guerrero, M. A., Jaen-Cuellar, A. Y., Carranza-Lopez-Padilla, R. D., Osornio-Rios, R. A., Herrera-Ruiz, G., y Romero-Troncoso, R. d. J. (2018). Hybrid approach based on ga and pso for parameter estimation of a full power quality disturbance parameterized model. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(3), 1016-1028. doi: 10.1109/TII.2017.2743762
- Rodríguez-San Pedro, A., Allendes, J., Carrasco-Lagos, P., y Moreno, R. (2014). *Murciélagos de la región metropolitana de Santiago, Chile*. Seremi del Medio Ambiente Región Metropolitana de Santiago, Universidad Santo Tomás y Programa para la Conservación de los Murciélagos de Chile (PCMCh).
- Rousis, A. O., Konstantelos, I., y Strbac, G. (2020). A planning model for a hybrid ac–dc

- microgrid using a novel ga/ac opf algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(1), 227-237. doi: 10.1109/TPWRS.2019.2924137
- SeckTuoh, J., Medina, J., y Hernandez, N. (2016). Introduccion a los algoritmos geneticos con matlab. *Univerisidad Autonoma del Estado de Hidalgo*. Descargado de [https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P\\_Lectura/icbi/asignatura/introduccion\\_a\\_los\\_algoritmos\\_geneticos\\_con\\_matlab.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Lectura/icbi/asignatura/introduccion_a_los_algoritmos_geneticos_con_matlab.pdf)
- Shao, Z., Qiu, L., y Zhang, Y. P. (2020). Design of wideband differentially fed multilayer stacked patch antennas based on bat algorithm. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(7), 1172-1176. doi: 10.1109/LAWP.2020.2994158
- Silva, J. V. (2013). Optimización del diseño de antenas yagi-uda usando algoritmos genéticos. *Pontificia Universidad Católica del Perú*. Descargado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/4846>
- Stutzman, W. L., y Thiele, G. A. (2012). *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons.
- Sun, G., Liu, Y., Chen, Z., Liang, S., Wang, A., y Zhang, Y. (2018). Radiation beam pattern synthesis of concentric circular antenna arrays using hybrid approach based on cuckoo search. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(9), 4563-4576. doi: 10.1109/TAP.2018.2846771
- Sun, Y., Dong, W., y Chen, Y. (2017). An improved routing algorithm based on ant colony optimization in wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 21(6), 1317-1320. doi: 10.1109/LCOMM.2017.2672959
- Van Luyen, T., y Vu Bang Giang, T. (2017). Interference suppression of ula antennas by phase-only control using bat algorithm. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 3038-3042. doi: 10.1109/LAWP.2017.2759318
- Wang, L., Zhang, X., y Zhang, X. (2019). Antenna array design by artificial bee colony algorithm with similarity induced search method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(6), 1-4. doi: 10.1109/TMAG.2019.2896921
- Wang, Y., y Zhu, Q. (2021). A hybrid genetic algorithm for flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times and job lag times. *IEEE Access*, 9, 104864-104873. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3096007
- Wang, Z., Xie, H., He, D., y Chan, S. (2019). Wireless sensor network deployment optimization based on two flower pollination algorithms. *IEEE Access*, 7, 180590-180608. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2959949

- Weng, W.-C., Yang, F., y Elsherbeni, A. (2007). Electromagnetics and antenna optimization using taguchi's method. *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, 2(1), 1–94.
- Whitley, D. (1994). A genetic algorithm tutorial. *Statistics and computing*, 4(2), 65–85.
- Xu, Z., Zhuang, L., Tian, S., He, M., Yang, S., Song, Y., y Ma, L. (2020). Energy-driven virtual network embedding algorithm based on enhanced bacterial foraging optimization. *IEEE Access*, 8, 76069-76081. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988320
- Yang, X.-S. (2010a). Firefly algorithm, levy flights and global optimization. En *Research and development in intelligent systems xxvi* (pp. 209–218). Springer.
- Yang, X.-S. (2010b). A new metaheuristic bat-inspired algorithm. En *Nature inspired cooperative strategies for optimization (nicso 2010)* (p. 65-74). Springer.
- Yang, X.-S. (2013). *Cuckoo search and firefly algorithm: theory and applications* (Vol. 516). Springer.
- Yang, X.-S. (2017). *Nature-inspired algorithms and applied optimization* (Vol. 744). Springer.
- Yang, X.-S. (2020). *Nature-inspired optimization algorithms*. Academic Press.
- Yang, X.-S., y Deb, S. (2009). Cuckoo search via lévy flights. En *2009 world congress on nature biologically inspired computing (nabic)* (p. 210-214). doi: 10.1109/NABIC.2009.5393690
- Yang, X.-S., y Gandomi, A. H. (2012). Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization. *Engineering computations*.
- Yoshida, S., Suzuki, Y., Ta, T. T., Kameda, S., Suematsu, N., Takagi, T., y Tsubouchi, K. (2013). A 60-ghz band planar dipole array antenna using 3-d sip structure in small wireless terminals for beamforming applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(7), 3502-3510. doi: 10.1109/TAP.2013.2257643

ANEXOS

ANEXO 1: TABLA DE RESULTADOS COMPLETOS

Tabla 6.1

Parámetros óptimos BA Prioridad BW

PARÁMETROS ÓPTIMOS BA										
	Parámetros									
	BW	G	$\delta G_{\theta=1}$	HPBW <sub><math>\phi=90</math></sub>	HPBW <sub><math>\phi=0</math></sub>	$\angle G_{\phi=90}^{max\theta}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\theta}$	Prioridad BW		
	$F(x)$									
<i>Int</i> <sub>1</sub>	312	16.2903	0.2438	10	70	1	0	5.6249		
<i>Int</i> <sub>2</sub>	39	14.4336	0.1914	14	72	2	0	7.7009		
<i>Int</i> <sub>3</sub>	129	13.8074	0.8528	50	59	8	0	13.4303		
<i>Int</i> <sub>4</sub>	132	14.8256	0.1374	9	69	0	0	5.3006		
<i>Int</i> <sub>5</sub>	162	16.4323	0.4003	9	71	2	0	5.7494		
<i>Int</i> <sub>6</sub>	186	16.3845	0.4842	8	70	2	0	5.2107		
<i>Int</i> <sub>7</sub>	21	14.7106	0.0678	10	72	0	0	6.4812		
<i>Int</i> <sub>8</sub>	120	16.2259	0.0691	10	69	0	0	5.2683		
<i>Int</i> <sub>9</sub>	144	15.7407	0.5990	8	71	2	0	5.6494		
<i>Int</i> <sub>10</sub>	105	16.6371	0.6323	8	71	2	0	5.4757		
<i>Int</i> <sub>11</sub>	60	14.2093	0.2544	50	58	10	0	13.1869		
<i>Int</i> <sub>12</sub>	81	16.3447	0.1161	9	70	0	0	5.3008		
<i>Int</i> <sub>13</sub>	312	16.5760	0.0693	9	68	0	0	4.6291		
<i>Int</i> <sub>14</sub>	495	13.1358	0.7152	50	57	8	0	12.9211		
<i>Int</i> <sub>15</sub>	309	16.3290	0.1776	9	70	1	0	5.3642		
<i>Int</i> <sub>16</sub>	177	16.4733	0.4394	9	72	2	0	6.0416		
<i>Int</i> <sub>17</sub>	189	16.6185	0.1254	9	72	0	0	5.8357		
<i>Int</i> <sub>18</sub>	126	13.3824	0.3470	50	79	14	0	20.1703		
<i>Int</i> <sub>19</sub>	111	16.7006	0.0919	9	70	0	0	5.2254		
<i>Int</i> <sub>20</sub>	108	14.0061	0.4792	50	61	8	0	13.9739		
%	100	100	100	75	100	75	100	100		

Tabla 6.2

Dimensiones óptimas BA con prioridad BW

DIMENSIONES FINALES DE ANTENA BA EN CADA INTENTO PRIORIDAD BW									
	Dimensiones								
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	
$Int_1$	3.0000	3.3153	3.8522	3.1158	3.8042	4.2734	3.2596	5.0000	
$Int_2$	3.0000	3.8745	3.0072	3.2418	5.0000	3.6642	4.3688	3.8023	
$Int_3$	3.7229	3.0408	3.2286	4.0981	4.6272	5.0000	3.0000	5.0000	
$Int_4$	3.0704	3.6268	3.0000	3.9677	3.1440	3.1702	4.4791	3.4417	
$Int_5$	3.6845	3.0070	3.2791	3.5186	3.7124	5.0000	3.4630	5.0000	
$Int_6$	3.5132	3.5598	3.1397	3.6832	3.8309	4.5283	3.0334	4.6026	
$Int_7$	3.8472	3.6317	3.7803	3.8075	3.0379	3.3607	3.1378	4.5234	
$Int_8$	3.4610	4.5455	3.1243	3.1898	3.8615	3.2852	3.1254	4.7638	
$Int_9$	3.3202	3.5455	3.0202	3.3814	3.8881	5.0000	3.0000	5.0000	
$Int_{10}$	3.5593	3.5926	3.3143	3.2990	3.7387	4.6248	3.5602	4.5725	
$Int_{11}$	3.6859	3.7833	3.2170	4.1800	4.4532	3.9508	3.3638	4.8605	
$Int_{12}$	3.8948	3.0000	3.6916	3.4241	3.5620	4.3847	3.0000	4.4911	
$Int_{13}$	3.2593	3.8922	4.1343	3.0000	3.5400	3.7637	3.0610	4.0612	
$Int_{14}$	3.1782	3.0000	3.0000	5.0000	5.0000	4.3218	3.0000	4.7467	
$Int_{15}$	3.0000	3.8671	3.4920	3.0000	3.8857	3.8918	3.2960	5.0000	
$Int_{16}$	3.3812	3.2245	3.0995	3.7173	3.9570	4.7845	3.9074	3.0574	
$Int_{17}$	3.3590	3.3431	3.4625	3.6314	4.0172	3.4760	3.9040	3.1571	
$Int_{18}$	3.5012	4.8179	3.7703	3.9815	5.0000	4.0265	3.4778	4.8859	
$Int_{19}$	3.7283	4.3400	3.2132	3.0622	3.46061	3.2881	3.8453	4.3327	
$Int_{20}$	3.2116	3.3145	3.0000	4.2598	4.4792	5.0000	3.2170	4.1677	
Variación	[3.00 - 3.89]	[3.00 - 4.81]	[3.00 - 4.13]	[3.00 - 5.00]	[3.03 - 5.00]	[3.17 - 5.00]	[3.00 - 4.47]	[3.05 - 5.00]	

Tabla 6.3

Parámetros óptimos BA Prioridad Ganancia

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ANTENAS									
	Parámetros						Prioridad G		
	BW	G	$\delta G_{\theta=1}$	HPBW <sub><math>\phi=90</math></sub>	HPBW <sub><math>\phi=0</math></sub>	$\angle G_{\phi=90}^{max\phi}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\phi}$	$F(x)$	
Int <sub>1</sub>	81	16.3447	0.1161	9	70	0	0	4.1923	
Int <sub>2</sub>	315	16.6621	0.0752	9	68	0	0	3.6407	
Int <sub>3</sub>	168	13.6643	0.8726	50	60	7	0	7.5342	
Int <sub>4</sub>	318	16.6261	0.1315	9	70	0	0	4.0516	
Int <sub>5</sub>	162	16.4323	0.4003	9	71	2	0	4.5203	
Int <sub>6</sub>	120	16.2259	0.0691	10	69	0	0	4.1080	
Int <sub>7</sub>	189	16.6185	0.1254	9	72	0	0	4.4919	
Int <sub>8</sub>	138	14.638	0.3422	50	75	10	2	10.5532	
Int <sub>9</sub>	42	16.6487	0.4299	9	71	1	0	4.4237	
Int <sub>10</sub>	120	13.3760	0.3790	50	60	8	0	7.6759	
Int <sub>11</sub>	300	16.5335	0.1071	9	70	0	0	4.0790	
Int <sub>12</sub>	495	13.1358	0.7152	50	57	8	0	7.0403	
Int <sub>13</sub>	165	16.0972	0.2070	9	70	1	0	4.3136	
Int <sub>14</sub>	309	16.3290	0.1776	9	70	1	0	4.2109	
Int <sub>15</sub>	303	14.0308	0.8802	50	53	11	0	7.1224	
Int <sub>16</sub>	84	16.6122	0.1091	9	70	0	0	4.1242	
Int <sub>17</sub>	57	13.8712	0.1637	15	70	2	0	5.5803	
Int <sub>18</sub>	315	16.6659	0.1167	9	70	0	0	4.0419	
Int <sub>19</sub>	108	16.6061	0.2653	8	70	1	0	4.1063	
Int <sub>20</sub>	177	16.4733	0.4394	9	72	2	0	4.7075	
%	100	100	100	75	100	75	100	100	

Tabla 6.4

Dimensiones óptimas BA con prioridad Ganancia

DIMENSIONES FINALES DE ANTENA BA EN CADA INTENTO PRIORIDAD GAIN									
	Dimensiones								
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	
$Int_1$	3.8948	3.0000	3.6916	3.4241	3.5620	4.3847	3.0000	4.4911	
$Int_2$	3.2613	3.8942	4.1563	3.0000	3.6405	3.7637	3.0510	4.0802	
$Int_3$	3.6501	3.0653	3.0000	4.3347	5.0000	5.0000	3.0000	4.6633	
$Int_4$	3.5978	3.3925	3.6030	3.6637	3.8878	3.3745	3.0000	4.0682	
$Int_5$	3.6845	3.0070	3.2791	3.5186	3.7124	5.0000	3.4630	5.0000	
$Int_6$	3.4610	4.5455	3.1243	3.1898	3.8615	3.2852	3.1254	4.7638	
$Int_7$	3.3590	3.3431	3.4625	3.6314	4.0172	3.4760	3.9040	3.1571	
$Int_8$	4.3294	3.1679	3.4067	4.4517	4.2777	4.2910	3.0000	5.0000	
$Int_9$	3.4947	3.0829	3.4739	3.338	3.9368	4.4750	3.4336	4.8003	
$Int_{10}$	3.0000	3.2977	3.4121	3.071	4.4032	5.0000	5.0000	3.2456	
$Int_{11}$	3.7427	3.8012	3.0585	3.4723	3.773	3.7004	3.5711	3.4167	
$Int_{12}$	3.1782	3.0000	3.0000	5.0000	5.0000	4.3218	3.0000	4.7467	
$Int_{13}$	3.3603	3.2962	3.5748	3.4607	4.0536	4.6754	3.1430	3.0000	
$Int_{14}$	3.0000	3.8671	3.4920	3.0000	3.8857	3.8918	3.2960	5.0000	
$Int_{15}$	3.0551	3.9422	3.5962	3.8737	4.5205	5.0000	3.0000	4.4527	
$Int_{16}$	3.7646	3.5722	3.1355	4.1582	3.7422	3.4589	3.1255	3.6851	
$Int_{17}$	3.0000	3.7750	4.1328	3.0000	5.0000	3.8132	3.0254	3.7106	
$Int_{18}$	3.3169	4.2397	3.0700	3.1820	3.5639	3.2840	3.8106	4.9913	
$Int_{19}$	3.4186	4.0000	3.1326	3.0000	3.8181	3.6637	3.8491	4.7842	
$Int_{20}$	3.3812	3.2245	3.0995	3.7173	3.9570	4.7845	3.9074	3.0574	
Variación	[3.00 - 4.32]	[3.00 - 4.54]	[3.00 - 4.13]	[3.00 - 5.00]	[3.54 - 5.00]	[3.28 - 5.00]	[3.00 - 5.00]	[3.00 - 5.00]	

Tabla 6.5

Parámetros óptimos PSO Prioridad BW

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ANTENAS PSO BW										
	Parámetros									Prioridad BW
	BW	G	$\delta G_{\theta=1}$	HPBW $_{\phi=90}$	HPBW $_{\phi=0}$	$\angle G_{\phi=90}^{max\phi^i}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\phi^i}$	$\angle G_{\phi=90}^{max\phi^i}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\phi^i}$	
<i>Int</i> <sub>1</sub>	102	15.6770	1	50	68	14	0	14	0	16.2464
<i>Int</i> <sub>2</sub>	120	16.8606	0.0809	9	70	0	0	0	0	5.1919
<i>Int</i> <sub>3</sub>	144	16.8693	0.1054	9	70	0	0	0	0	5.1890
<i>Int</i> <sub>4</sub>	315	15.7561	1	50	70	10	0	10	0	16.4893
<i>Int</i> <sub>5</sub>	360	16.8353	0.0810	9	70	0	0	0	0	5.1730
<i>Int</i> <sub>6</sub>	306	14.9352	1	50	76	18	0	18	0	19.0944
<i>Int</i> <sub>7</sub>	150	16.6975	0.1031	9	71	0	0	0	0	5.5227
<i>Int</i> <sub>8</sub>	198	15.6478	1	50	70	11	0	11	0	16.6026
<i>Int</i> <sub>9</sub>	84	15.5438	1	50	71	10	0	10	0	16.8548
<i>Int</i> <sub>10</sub>	72	15.3680	1	50	72	11	0	11	0	17.2712
<i>Int</i> <sub>11</sub>	117	15.0478	0.6820	50	64	8	2	8	2	14.7148
<i>Int</i> <sub>12</sub>	150	16.8651	0.0901	9	70	0	0	0	0	5.1858
<i>Int</i> <sub>13</sub>	99	16.8783	0.0901	9	70	0	0	0	0	5.1909
<i>Int</i> <sub>14</sub>	75	15.5251	1	50	70	10	0	10	0	16.5595
<i>Int</i> <sub>15</sub>	348	16.8386	0.0889	9	70	0	0	0	0	5.1739
<i>Int</i> <sub>16</sub>	48	16.5938	0.1599	9	70	1	0	1	0	5.3364
<i>Int</i> <sub>17</sub>	354	16.8168	0.1289	9	71	0	0	0	0	5.4797
<i>Int</i> <sub>18</sub>	99	16.8783	0.0901	9	70	0	0	0	0	5.1909
<i>Int</i> <sub>19</sub>	348	16.8386	0.0889	9	70	0	0	0	0	5.1739
<i>Int</i> <sub>20</sub>	294	15.7866	1	50	70	11	0	11	0	16.5653
%	100	100	60	55	100	55	100	55	100	100

Tabla 6.6

Dimensiones óptimas PSO con prioridad BW

DIMENSIONES FINALES DE ANTENA PSO EN CADA INTENTO PRIORIDAD BW									
	Dimensiones								
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	
$Int_1$	4.2097	4.0871	4.1199	3.9981	3.9741	4.3661	4.0921	4.1475	
$Int_2$	3.5654	3.5613	3.5877	3.5688	3.5696	3.5518	3.5687	3.5761	
$Int_3$	3.5915	3.5920	3.5019	3.6020	3.5550	3.6286	3.6110	3.6069	
$Int_4$	4.0903	3.8542	4.0711	4.1404	4.1018	4.3443	4.0419	4.0466	
$Int_5$	3.5803	3.5476	3.5331	3.5472	3.5811	3.5697	3.6330	3.5328	
$Int_6$	4.2998	4.3711	4.1492	4.0137	4.3018	4.3403	4.1208	4.2189	
$Int_7$	3.9639	3.2093	3.7054	3.6077	3.5126	3.6442	3.5618	3.7721	
$Int_8$	3.9213	3.8794	3.9138	3.8128	3.9582	4.1029	4.0112	4.0462	
$Int_9$	3.8726	3.9299	3.9056	3.9827	3.8082	3.9950	4.0558	3.7953	
$Int_{10}$	3.9076	3.9135	3.9169	3.9262	3.9081	3.9242	3.9334	3.9043	
$Int_{11}$	3.7238	3.6375	3.6375	3.4695	4.2430	4.1545	4.1817	4.3094	
$Int_{12}$	3.6704	3.5350	3.5897	3.5603	3.5849	3.6109	3.6114	3.5327	
$Int_{13}$	3.6564	3.6237	3.5385	3.5463	3.6576	3.4725	3.6402	3.5663	
$Int_{14}$	3.9245	4.0118	3.8244	3.9181	3.9332	3.9580	3.9863	4.0010	
$Int_{15}$	3.6255	3.4982	3.6159	3.4929	3.6188	3.6598	3.5783	3.5416	
$Int_{16}$	3.1055	3.2750	4.3315	3.3325	3.4775	3.4371	3.3891	3.4427	
$Int_{17}$	3.6459	3.4708	3.6173	3.4272	3.7741	3.5238	3.7516	3.5557	
$Int_{18}$	3.6564	3.6237	3.5385	3.5463	3.6576	3.4725	3.6402	3.5663	
$Int_{19}$	3.6255	3.4982	3.6159	3.4929	3.6188	3.6598	3.5783	3.5416	
$Int_{20}$	3.9245	4.0354	3.7704	3.9136	3.9599	4.0133	4.0840	4.3578	
Variación	[3.10 - 4.29]	[3.20 - 4.37]	[3.50 - 4.33]	[3.33 - 4.14]	[3.51 - 4.30]	[3.43 - 4.36]	[3.56 - 4.18]	[3.53 - 4.35]	

Tabla 6.7

Parámetros óptimos PSO Prioridad Ganancia

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ANTENAS PSO GAIN									
	Parámetros							Prioridad G	
	BW	G	$\delta G_{\theta=1}$	HPBW <sub><math>\phi=90</math></sub>	HPBW <sub><math>\phi=0</math></sub>	$\angle G_{\phi=90}^{max\phi}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\phi}$	$F(x)$	
<i>Int</i> <sub>1</sub>	144	16.8466	0.1122	9	70	0	0	4.0478	
<i>Int</i> <sub>2</sub>	150	16.6975	0.1031	9	71	0	0	4.2828	
<i>Int</i> <sub>3</sub>	336	16.8543	0.0889	9	70	0	0	3.9871	
<i>Int</i> <sub>4</sub>	87	16.8606	0.1086	9	70	0	0	4.0612	
<i>Int</i> <sub>5</sub>	162	16.8307	0.1137	9	71	0	0	4.2464	
<i>Int</i> <sub>6</sub>	102	15.6111	1	50	70	10	0	9.3136	
<i>Int</i> <sub>7</sub>	150	16.8651	0.0901	9	70	0	0	4.0402	
<i>Int</i> <sub>8</sub>	294	15.7866	1	50	70	11	0	9.2922	
<i>Int</i> <sub>9</sub>	162	16.8307	0.1137	9	71	0	0	4.2464	
<i>Int</i> <sub>10</sub>	150	16.8651	0.0901	9	70	0	0	4.0402	
<i>Int</i> <sub>11</sub>	312	16.8520	0.1015	9	70	0	0	3.9955	
<i>Int</i> <sub>12</sub>	393	15.7402	1	50	72	10	0	8.7940	
<i>Int</i> <sub>13</sub>	315	16.8069	0.0942	9	70	0	0	4.0055	
<i>Int</i> <sub>14</sub>	102	15.6770	1	50	68	14	0	9.2172	
<i>Int</i> <sub>15</sub>	102	15.6770	1	50	68	14	0	9.2172	
<i>Int</i> <sub>16</sub>	150	16.8651	0.0901	9	70	0	0	4.0402	
<i>Int</i> <sub>17</sub>	354	16.8168	0.1289	9	71	0	0	4.1930	
<i>Int</i> <sub>18</sub>	294	15.7866	1	50	70	11	0	9.2922	
<i>Int</i> <sub>19</sub>	390	16.8031	0.0731	9	71	0	0	4.1829	
<i>Int</i> <sub>20</sub>	99	16.8755	0.0901	9	70	0	0	4.0529	
%	100	100	70	70	100	70	100	100	100

Tabla 6.8

Dimensiones óptimas PSO con prioridad Ganancia

DIMENSIONES FINALES DE ANTENA PSO EN CADA INTENTO PRIORIDAD G									
	Dimensiones								
	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	
Int <sub>1</sub>	3.6438	3.4805	3.7078	3.4434	3.6905	3.5317	3.7317	3.5082	
Int <sub>2</sub>	3.9639	3.2093	3.7054	3.6077	3.5126	3.6442	3.5618	3.7721	
Int <sub>3</sub>	3.5511	3.6214	3.3594	3.6432	3.6557	3.6674	3.5376	3.6264	
Int <sub>4</sub>	3.6373	3.5351	3.6149	3.5558	3.6379	3.4597	3.7446	3.4762	
Int <sub>5</sub>	3.6799	3.5511	3.6495	3.3859	3.6993	3.4008	3.8278	3.5349	
Int <sub>6</sub>	3.9295	3.9280	3.8400	3.9327	3.9019	3.9701	3.9777	3.9443	
Int <sub>7</sub>	3.6704	3.5350	3.5897	3.5603	3.5849	3.6109	3.6114	3.5327	
Int <sub>8</sub>	3.9245	4.0354	3.7704	3.9136	3.9599	4.0133	4.0840	4.3578	
Int <sub>9</sub>	3.6799	3.5511	3.6495	3.3859	3.6993	3.4008	3.8278	3.5349	
Int <sub>10</sub>	3.6704	3.5350	3.5897	3.5603	3.5849	3.6109	3.6114	3.5327	
Int <sub>11</sub>	3.5991	3.5538	3.5767	3.5055	3.5855	3.6331	3.6148	3.5951	
Int <sub>12</sub>	4.0910	3.8513	3.6934	3.9595	3.9659	4.0619	4.0037	4.1559	
Int <sub>13</sub>	3.6504	3.4867	3.5388	3.6109	3.5344	3.6339	3.6837	3.4730	
Int <sub>14</sub>	4.2097	4.0871	4.1199	3.9981	3.9741	4.3661	4.0921	4.1475	
Int <sub>15</sub>	4.2097	4.0871	4.1199	3.9981	3.9741	4.3661	4.0921	4.1475	
Int <sub>16</sub>	3.6704	3.5350	3.5897	3.5603	3.5849	3.6109	3.6114	3.5327	
Int <sub>17</sub>	3.6459	3.4708	3.6173	3.4272	3.7741	3.5238	3.7516	3.5557	
Int <sub>18</sub>	3.9245	4.0354	3.7704	3.9136	3.9599	4.0133	4.0840	4.3578	
Int <sub>19</sub>	3.6214	3.4620	3.5940	3.5682	3.5793	3.6513	3.5868	3.4055	
Int <sub>20</sub>	3.6540	3.6423	3.5094	3.5707	3.5926	3.4635	3.6756	3.5820	
Variación	[3.55 - 4.20]	[3.20 - 4.08]	[3.35 - 4.11]	[3.38 - 3.99]	[3.51 - 3.97]	[3.40 - 4.36]	[3.53 - 4.09]	[3.40 - 4.35]	

Tabla 6.9

Parámetros óptimos GA Prioridad BW

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ANTENAS GA BW										
	Parámetros									Prioridad BW
	BW	G	$\delta G_{\theta=1}$	$HPBW_{\phi=90}$	$HPBW_{\phi=0}$	$\angle G_{\phi=90}^{max_{\phi^i}}$	$\angle G_{\phi=0}^{max_{\phi^i}}$			
<i>Int</i> <sub>1</sub>	153	16.3497	0.0733	9	73	0	0			6.1904
<i>Int</i> <sub>2</sub>	123	14.8795	0.1561	8	73	0	0			6.2416
<i>Int</i> <sub>3</sub>	153	16.5877	0.3495	9	71	1	0			5.7366
<i>Int</i> <sub>4</sub>	93	14.7097	0.6096	50	60	8	1			13.5612
<i>Int</i> <sub>5</sub>	306	16.2058	0.1932	10	70	1	0			5.6399
<i>Int</i> <sub>6</sub>	120	13.8652	0.2498	50	71	6	0			16.8295
<i>Int</i> <sub>7</sub>	153	16.3497	0.0733	9	73	0	0			6.1904
<i>Int</i> <sub>8</sub>	165	16.4603	0.1852	9	73	1	0			6.2527
<i>Int</i> <sub>9</sub>	63	14.2343	1	50	50	11	0			13.8988
<i>Int</i> <sub>10</sub>	96	14.4321	1	50	52	16	0			13.6560
<i>Int</i> <sub>11</sub>	177	16.3866	0.2836	10	72	1	0			6.2212
<i>Int</i> <sub>12</sub>	180	16.3694	0.1957	9	71	1	0			5.6699
<i>Int</i> <sub>13</sub>	96	15.3386	0.1315	10	73	1	0			6.7313
<i>Int</i> <sub>14</sub>	81	15.4482	0.0859	9	72	0	0			6.0785
<i>Int</i> <sub>15</sub>	153	16.3497	0.0733	9	73	0	0			6.1904
<i>Int</i> <sub>16</sub>	798	14.7740	0.1632	8	73	0	0			6.1956
<i>Int</i> <sub>17</sub>	93	14.7097	0.6096	50	60	0	1			12.9212
<i>Int</i> <sub>18</sub>	108	16.8024	0.1501	9	71	1	0			5.7882
<i>Int</i> <sub>19</sub>	78	16.1903	0.0682	9	71	0	0			5.6495
<i>Int</i> <sub>20</sub>	156	14.5512	0.2672	8	74	1	0			6.6895
%	100	100	90	75	100	75	100			100

Tabla 6.10

Dimensiones óptimas GA con prioridad BW

DIMENSIONES FINALES DE ANTENA GA EN CADA INTENTO PRIORIDAD BW									
	Dimensiones								
	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	
Int <sub>1</sub>	3.0863	4.1216	3.4157	3.1647	4.0118	3.0235	4.1686	3.3686	
Int <sub>2</sub>	4.7569	3.1804	3.3608	3.0078	3.6510	3.0863	4.6235	3.7451	
Int <sub>3</sub>	3.7294	3.2353	3.2118	3.6824	3.9490	4.3961	3.6824	3.1412	
Int <sub>4</sub>	3.6039	3.7922	3.5176	3.6118	4.1373	4.9765	3.5490	3.9255	
Int <sub>5</sub>	3.5333	3.2352	4.0745	3.1176	3.6039	4.8196	3.2901	3.2588	
Int <sub>6</sub>	3.0941	3.2353	4.1608	3.2275	4.7882	3.4078	4.0902	4.0588	
Int <sub>7</sub>	3.0863	4.1216	3.4157	3.1647	4.0118	3.0235	4.1686	3.3686	
Int <sub>8</sub>	3.3373	3.4627	3.4549	3.4235	4.0431	3.1804	4.3255	3.0941	
Int <sub>9</sub>	4.8510	4.6314	3.3294	3.9176	3.8157	3.1569	4.1137	4.6314	
Int <sub>10</sub>	3.7137	3.9804	4.2706	4.0902	3.6118	4.4588	4.4039	4.4275	
Int <sub>11</sub>	3.2553	3.5098	3.1804	3.6824	3.4863	4.6627	4.1137	3.1330	
Int <sub>12</sub>	3.8314	3.9647	3.2431	3.0392	3.9569	3.2196	3.6275	4.9137	
Int <sub>13</sub>	3.0862	3.0078	3.6117	3.6745	3.0313	4.6235	3.7921	3.6745	
Int <sub>14</sub>	3.6118	3.1412	4.0039	3.9804	3.1333	3.5569	3.4706	3.6667	
Int <sub>15</sub>	3.0863	4.1216	3.4157	3.1647	4.0118	3.0235	4.1686	3.3686	
Int <sub>16</sub>	3.7216	3.1804	3.3608	3.3529	4.2471	3.5569	3.4314	3.9569	
Int <sub>17</sub>	3.6039	3.7922	3.5176	3.6118	4.1373	4.9765	3.5490	3.9255	
Int <sub>18</sub>	3.3608	3.4235	3.7686	3.2510	3.7608	3.8706	3.5255	4.0118	
Int <sub>19</sub>	4.7960	3.0705	3.9882	3.2588	3.3450	3.8862	3.2039	4.1686	
Int <sub>20</sub>	3.3294	3.6745	3.3059	3.0706	4.3255	3.3608	3.5020	4.4824	
Variación	[3.08 - 4.85]	[3.00 - 4.63]	[3.21 - 4.27]	[3.00 - 4.09]	[3.03 - 4.78]	[3.02 - 4.97]	[3.20 - 4.62]	[3.09 - 4.91]	

Tabla 6.11

Parámetros óptimos GA Prioridad Ganancia

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LAS ANTENAS GA GAIN									
	Parámetros					Prioridad G			
	BW	G	$\delta G_{\theta=1}$	HPBW $_{\phi=90}$	HPBW $_{\phi=0}$	$\angle G_{\phi=90}^{max\theta}$	$\angle G_{\phi=0}^{max\theta}$	$F(x)$	
Int <sub>1</sub>	96	14.4321	1	50	51	16	0	7.8902	
Int <sub>2</sub>	390	16.2915	0.6522	9	74	2	0	5.0997	
Int <sub>3</sub>	1131	16.0624	0.1946	8	72	1	0	4.3318	
Int <sub>4</sub>	393	16.4868	0.0778	9	71	0	0	4.2613	
Int <sub>5</sub>	174	16.2962	0.2688	10	70	1	0	4.3642	
Int <sub>6</sub>	129	16.4639	0.1535	9	72	1	0	4.6300	
Int <sub>7</sub>	69	15.7240	0.0765	9	70	0	0	4.3491	
Int <sub>8</sub>	123	16.4903	0.1338	9	68	0	0	3.7442	
Int <sub>9</sub>	99	16.2564	0.1047	9	71	0	0	4.4084	
Int <sub>10</sub>	96	15.3386	0.1315	10	73	1	0	5.2201	
Int <sub>11</sub>	78	16.1903	0.0682	9	71	0	0	4.4294	
Int <sub>12</sub>	111	16.5360	0.3224	9	70	1	0	4.2258	
Int <sub>13</sub>	285	14.8986	0.5028	50	62	8	0	7.7620	
Int <sub>14</sub>	75	13.8603	0.5214	50	62	9	0	8.0555	
Int <sub>15</sub>	123	16.4903	0.1338	9	68	0	0	3.7442	
Int <sub>16</sub>	81	16.3547	0.1149	8	70	0	0	4.0898	
Int <sub>17</sub>	111	16.3597	0.2403	10	70	1	0	4.3658	
Int <sub>18</sub>	309	16.6464	0.0746	10	70	0	0	4.1464	
Int <sub>19</sub>	132	14.9076	0.8190	8	75	2	0	5.6315	
Int <sub>20</sub>	195	16.1766	0.1502	10	71	1	0	4.5819	
%	100	100	95	85	100	85	100	100	

Tabla 6.12

Dimensiones óptimas GA con prioridad Ganancia

DIMENSIONES FINALES DE ANTENA GA EN CADA INTENTO PRIORIDAD G									
	Dimensiones								
	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	
Int <sub>1</sub>	3.7137	3.9804	4.2706	4.0902	3.6118	4.4588	4.4039	4.4275	
Int <sub>2</sub>	3.1961	3.7686	3.0706	3.4078	3.7137	3.9568	5.0000	3.2196	
Int <sub>3</sub>	3.6509	3.2117	3.6039	3.5176	4.1137	3.2509	3.8078	3.5333	
Int <sub>4</sub>	3.2745	3.1882	3.6431	3.6431	4.0431	4.1137	3.1254	3.3529	
Int <sub>5</sub>	3.2274	3.2431	3.8941	3.1725	3.7843	4.7725	3.0784	4.1843	
Int <sub>6</sub>	3.1568	3.9176	3.0156	3.3843	4.0823	3.2196	3.8313	4.5058	
Int <sub>7</sub>	4.1686	3.1255	3.1882	4.1529	3.2196	3.7764	3.8392	3.0313	
Int <sub>8</sub>	3.6745	4.1215	3.1490	3.1882	3.7137	3.8705	3.1725	3.7607	
Int <sub>9</sub>	3.0156	3.9254	3.1176	3.5490	4.0352	3.8000	3.2039	4.1058	
Int <sub>10</sub>	3.0862	3.0078	3.6117	3.6745	3.0313	4.6235	3.7921	3.6745	
Int <sub>11</sub>	4.7960	3.0705	3.9882	3.2588	3.3450	3.8862	3.2039	4.1686	
Int <sub>12</sub>	3.0784	3.6666	3.5490	3.2901	3.5098	4.8666	3.2745	4.3411	
Int <sub>13</sub>	3.7294	3.5333	4.5843	3.6431	4.0823	3.6431	4.5843	4.9372	
Int <sub>14</sub>	3.1254	4.4745	3.9568	3.8313	4.0823	4.3490	3.0235	3.4078	
Int <sub>15</sub>	3.6745	4.1215	3.1490	3.1882	3.7137	3.8705	3.1725	3.7607	
Int <sub>16</sub>	3.3921	3.8313	3.1411	3.329	4.0588	3.7686	3.4862	3.1803	
Int <sub>17</sub>	3.1725	3.1882	3.7843	3.2117	3.8078	4.8352	3.1176	4.2235	
Int <sub>18</sub>	3.1803	3.6431	3.9725	3.1960	3.7372	3.8470	3.2588	3.6823	
Int <sub>19</sub>	4.1137	3.2039	3.4313	3.6117	4.0980	3.0156	4.4588	3.3215	
Int <sub>20</sub>	3.7921	3.0000	3.5725	3.5098	3.2745	4.7333	3.4784	4.1843	
Variación	[3.01 - 4.79]	[3.00 - 4.47]	[3.01 - 4.58]	[3.17 - 4.15]	[3.03 - 4.11]	[3.01 - 4.86]	[3.02 - 5.00]	[3.03 - 4.50]	

## ANEXO 2: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tabla 6.13  
Matriz de consistencia.

Matriz de consistencia				
PROBLEMAS	OBJETIVOS	JUSTIFICACIÓN	VARIABLES	EL MÉTODO
<p><b>Problema General</b> El diseño de antenas patch en serie es un proceso complejo que involucra múltiples parámetros y variables, lo que dificulta su optimización utilizando métodos convencionales. Por lo tanto, es necesario evaluar el desempeño de diferentes algoritmos de optimización bioinspirados para determinar el más adecuado para la optimización de antenas patch en serie y mejorar su eficiencia y rendimiento.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* ¿Que función objetivo es la más adecuada para optimización del ancho de banda y la ganancia de la antena y que incluya los siete parámetros geométricos de la antena?</li> <li>* ¿Cómo se pueden adaptar los algoritmos bio-inspirados para la optimización de una antena serial de 8 parches?</li> <li>* ¿Cuál es el impacto de la priorización de los parámetros de la función objetivo en los resultados de la optimización de la antena?</li> <li>* ¿Cómo se pueden analizar y comparar los resultados de los tres algoritmos de optimización y determinar cuál es el más apropiado para la optimización de la antena serial de 8 parches en términos de su eficiencia y eficiencia?</li> </ul>	<p><b>Objetivo General</b> Realizar un análisis comparativo de la eficiencia de los tres algoritmos de optimización bio-inspirados para el diseño de antenas patch en serie, adaptándolos para la optimización de una antena serial de 8 parches y determinar el algoritmo más apropiado para su optimización.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Establecer una función objetivo que incluya siete parámetros geométricos de la antena y dos casos en la función de aptitud: uno para el ancho de banda y otro para la ganancia</li> <li>* Implementar y adaptar los algoritmos de optimización bio-inspirados murciélago (BA), optimización del enjambre de partículas (PSO) y algoritmo genético (GA) para la optimización de una antena serial de 8 parches.</li> <li>* Analizar la eficacia de los tres algoritmos de optimización en términos de la priorización en los parámetros para optimizar los parámetros de la antena serial de 8 parches.</li> <li>* Comparar los resultados obtenidos de los algoritmos de optimización y determinar el algoritmo más apropiado para la optimización de la antena serial de 8 parches en términos de su capacidad para cumplir con la función objetivo.</li> </ul>	<p>Actualmente en el Perú vivimos una decadencia tecnológica preocupante. Esto provoca una falta de diversidad en el sector productivo y que se ve altamente vulnerable a posibles crisis económicas. Es de urgencia que se aplique múltiples esfuerzos desde todos los sectores llamados a proponer soluciones, es la academia o el sector universitario. En el caso de nuestra universidad, se puede contribuir en las temáticas relacionadas a nuestras carreras profesionales. Una de estas áreas de actualidad, son las comunicaciones móviles de quinta generación. Al ser la quinta generación de dicha tecnología, se le considera ya en un estado de completa maduración. Es así que, muchas etapas propuestas en los estándares de dichos sistemas ya presentan un nivel de complejidad bastante elevado. Lo que implica la necesidad de utilizar recursos tecnológicos y herramientas muy especializadas, costosa y escasas en nuestro país. Una de las áreas de estos sistemas es el desarrollo de antenas para cumplir con los requisitos de 5G. El desarrollo implica etapas de diseño, fabricación, optimización, validación y test de los prototipos. En la presente tesis nos enfocaremos en la etapa de optimización de los prototipos diseñados. La optimización es un proceso iterativo que implica la utilización de recursos computacionales, que por lo general son limitados en nuestro país.</p>	<p><b>VARIABLES e Indicadores</b> Geometría y parámetros de la antena.</p> <p><b>VARIABLES e Indicadores independientes</b> Parámetros especiales y circuitales de la antena.</p> <p><b>VARIABLES e Indicadores dependientes</b> Algoritmo BA Algoritmo GA Algoritmo PSO</p> <p><b>VARIABLES e Indicadores intervinientes</b> Geometría de antena patch serial.</p>	<p>Es posible distinguir etapas que se realizarán en diferentes paquetes de software comercial. Después de elegir el algoritmo y priorizar los parámetros de antena deseados dentro del módulo de software que se implementara, es necesario utilizar un simulador electromagnético. Dicho software permite el cálculo de las ecuaciones de Maxwell de diseños CAD de antenas. El módulo a implementar se comunica con el simulador electromagnético, dándole la descripción de la antena inicial. Al final de la simulación electromagnética, el software comercial se comunica devuelta con el módulo implementado, entregando los resultados de simulación de la antena para una iteración dada. El módulo a implementar evaluará si los resultados coinciden con los requerimientos deseados. De ser así, se guardan las variables de la antena y los valores de la función objetivo. De no ser el caso, se repite el proceso para una nueva iteración. Se repite el proceso con todos los módulos implementados para cada algoritmo (BA, GA y PSO). Se guardan los resultados de cada algoritmo, para un mismo caso a optimizar. Se realiza la evaluación total y la evaluación de cada parámetro de antena individualmente.</p>

### ANEXO 3: GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Heurístico:** utilizan un enfoque de prueba y error para generar nuevas soluciones sin ninguna estrategia (Yang, 2017).
- **Metaheurística:** son heurísticas de nivel superior con el uso de la memoria. Utiliza el historial de soluciones u otras formas de estrategia de aprendizaje para encontrar mejores soluciones (Yang, 2017).
- **Estocástico:** son generaciones de números aleatorios y procesos aleatorios, por lo tanto, no se pueden encontrar soluciones idénticas; incluso partiendo de los mismos puntos iniciales, las soluciones finales pueden ser lo suficientemente cerca permitiendo que el algoritmo escape de cualquier modo local (Yang, 2017).