

TESIS DEFENDIDA POR  
**Juan Carlos González Islas**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales  
*Director del Comité*

---

Dr. Luis Armando Villaseñor González  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Roberto Conte Galván  
*Miembro del Comité*

---

Dr. David Salazar Miranda  
*Miembro del Comité*

---

Dra. María del Carmen Maya Sánchez  
*Coordinadora del programa de  
posgrado en Electrónica y  
Telecomunicaciones.*

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales  
*Director de Estudios de Posgrado*

7 de agosto de 2009

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

---

**GENERACIÓN DE NULOS EN EL DIAGRAMA DE RADIACIÓN PARA LA  
CANCELACIÓN DE INTERFERENTES EMPLEANDO ALGORITMO DE  
ABEJAS**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

JUAN CARLOS GONZÁLEZ ISLAS

Ensenada, Baja California, México. Agosto del 2009.

**RESUMEN** de la tesis de Juan Carlos González Islas, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES con orientación en TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California. Agosto de 2009.

**GENERACIÓN DE NULOS EN EL DIAGRAMA DE RADIACIÓN PARA LA CANCELACIÓN DE INTERFERENTES EMPLEANDO ALGORITMO DE ABEJAS**

Resumen aprobado por:

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales  
Director de Tesis

El uso de una agrupación de antenas en la estación base de un sistema de comunicaciones móviles celulares, aumenta considerablemente la capacidad de atención a usuarios. La evolución y tendencia del estudio de agrupación de antenas centra su atención en sintetizar diagramas de radiación, que permitan el direccionamiento de nulos en direcciones preestablecidas mientras se presta atención a la señal deseada.

Bajo el concepto de cancelación de interferentes y optimización del haz principal, existen diversas técnicas analíticas que permiten alcanzar dichos objetivos, pero no hay alguna que cumpla con la optimización multi-objetivo planteada, por ello se hace necesario el uso de optimización numérica para resolver problemas de naturaleza multimodal, multivariable y multi-objetivo, como lo es el problema de síntesis electromagnética presentado en este trabajo. La síntesis del diagrama de radiación de una agrupación se puede modificar controlando sólo la amplitud de excitación de los elementos de antena, si se considera un número par de elementos con simetría respecto al centro de la agrupación, se reduce a la mitad el tiempo de convergencia y el número de atenuadores usados.

Por lo anterior, en este trabajo se plantea el uso de una novedosa técnica de optimización metaheurística como lo es Algoritmo de Abejas, para la optimización de la síntesis de agrupaciones lineales de antenas, enfocada ésta, principalmente a la generación de nulos en direcciones preestablecidas y en segundo término a la optimización del lóbulo principal. Dicha síntesis se logra controlando sólo la amplitud de la corriente de excitación de cada uno de los elementos de la agrupación de antenas. Posteriormente se realiza un análisis comparativo con los métodos de Chebyshev y Schelkunoff, para demostrar la precisión, flexibilidad y adaptación a la optimización multi-objetivo de Algoritmo de Abejas.

**Palabras Clave:** Comunicaciones Móviles Celulares, Síntesis de Agrupación de Antenas, Cancelación de Interferentes, Algoritmo de Abejas, Cómputo Evolutivo.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **Juan Carlos Gonzalez Islas** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS with orientation in TELECOMMUNICATIONS. Ensenada, Baja California, México, August 2009.

## **STEERING PATTERN NULLING FOR THE CANCELATION OF INTERFERENCES USING BEES ALGORITHM**

The use of antenna arrays at the base station of a cellular mobile communications system increases considerably the capability of attending users. Evolution and trends in the study of antenna arrays focuses in pattern synthesis, which allows null steering in predefined directions while receiving the desired signal.

Under the concept of cancelation of interference and optimization of the main beam, there are several analytical techniques that achieve those objectives, but there isn't one that accomplishes with the proposed multi-objective optimization, therefore it becomes necessary to use numerical optimization in order to solve problems of a multimodal, multivariate and multi-objective sense, such as the problem of electromagnetic synthesis presented in this work. The synthesis of array pattern can be changed controlling only the element's amplitude. To consider even elements symmetrically distributed with respect the array's center reduces by half the time of convergence and the number of attenuators needed.

Hence, this work uses a novel metaheuristic optimization technique as Bees Algorithm, to optimize the synthesis of linear antenna array, it's mainly focused on the nulling steering in predefined directions and on second term, in the optimization of the main lobe. This synthesis is achieved by controlling only the amplitude current of each element of the antenna array. Subsequently, a comparison is made with the methods of Chebyshev and Schelkunoff, demonstrating the accuracy, flexibility and adaptability of the multi-objective optimization Bees Algorithm.

**Keywords:** Cellular mobile communications, Synthesis of Antenna arrays, Interference Cancelation, Bees Algorithm, Evolutionary Computing.

## Dedicatorias

*Muy en especial a la mujer más maravillosa que pude tener como madre. A ti Magos...*

*Al caballero de la enseñanza de vida. A mi padre Benito González...*

*A Luis y Maritza, mis hermanos.*

*A la mujer que vino a cambiar mi vida para siempre, y de quien agradeceré su existencia permanente junto a la mía. A ti Pau...*

*Y a todos aquellos que siempre han confiado en mí al brindarme su amistad sincera. También para todos aquellos que en alguna etapa de mi vida han intentado como objetivo verme fracasar.*

## Agradecimientos

*Agradezco a Dios, por ayudarme a encontrar la paz y entendimiento suficientes para conocerme a plenitud, por darme día a día la tranquilidad necesaria hacia el camino de la felicidad.*

*A mi núcleo familiar, por estar al pendiente de mí en los momentos difíciles, por apoyarme en todo instante, aun en las adversidades y contra su aceptación explícita, por hacerme participe de una familia íntegra y maravillosa.*

*A ti mamá, Te agradezco muy en especial por todo tu apoyo incondicional en todo momento. Porque me levantaste cuando me viste caer, me alentaste cuando me viste desahuciado, porque jamás has dejado de confiar en mí y en mis decisiones, porque fuiste de las personas que confiaron en este proyecto y él cual también te pertenece. Siendo éste el compromiso inicial de lograr muchas cosas más.*

*A mi Pau, Por ser el complemento perfecto de mi existencia, porque llegaste a cambiar mi vida por completo, por tu aliento, por tus consejos y comentarios siempre asertivos y oportunos, por tu paciencia y espera en la lejanía que nos ha mantenido apartados durante esta etapa de nuestras vidas, porque eres la mitad que me faltaba para complementar mi proyecto de vida. Has logrado la parte que te corresponde en este proyecto conjunto, por lo cual comparto los créditos contigo.*

*Al Dr. David Covarrubias, por fomentar el trabajo en equipo, la crítica constructiva, la puntualidad, la responsabilidad, eficiencia, formalidad, entre otros, valores necesarios para conseguir el éxito en la vida profesional. Por su excelente dirección de esta tesis. Y especialmente por su paciencia, entendimiento, amistad, consejos y apoyo en todo momento durante mi estadía en el CICESE.*

*A los doctores. Luis A. Villaseñor, Roberto Conte y David Salazar, por sus valiosas aportaciones, sugerencias y consejos emitidos, al haber participado como comité de esta tesis.*

*Al CICESE, por permitirme culminar esta etapa tan valiosa en mi vida, y por darme los elementos necesarios para formar parte de la plantilla productiva de nuestra sociedad. En especial a todos los profesores y personal que siempre se esforzaron por cumplir con su misión dentro de esta magnífica institución.*

*A mis compañeros de generación, algunos de ellos amigos que conservare para siempre, especialmente a los del grupo que formamos en el año de tesis y a los del grupo de control. Gracias por sus oportunas y asertivas intervenciones dentro y fuera de nuestro ambiente estudiantil.*

*Al CONACYT, por otorgarme la beca que hizo posible mantener y concluir con mis estudios de maestría.*

# CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>Resumen español</b> .....	i
<b>Resumen inglés</b> .....	ii
<b>Dedicatorias</b> .....	iii
<b>Agradecimientos</b> .....	iv
<b>Contenido</b> .....	v
<b>Lista de Figuras</b> .....	vii
<b>Lista de Tablas</b> .....	ix
<b>Capítulo I. Introducción</b> .....	<b>1</b>
I.1 Aplicación de antenas inteligentes a comunicaciones móviles celulares.....	1
I.2 Formulación del problema.....	4
I.3 Objetivo de la tesis.....	7
I.4 Metodología de la investigación.....	7
I.5 Organización de la tesis.....	8
<b>Capítulo II. Conceptos asociados con agrupación de antenas y cómputo evolutivo</b> .....	<b>10</b>
II.1 Introducción.....	10
II.2 Agrupación de antenas.....	10
II.2.1 Agrupación Lineal Uniforme de Antenas y obtención del factor de agrupación.....	11
II.2.2 Síntesis de agrupación de antenas.....	16
II.2.2.1 Método polinomial de Schelkunoff.....	17
II.2.2.2 Método de Chebyshev.....	19
II.3 Optimización global y computo evolutivo.....	21
II.3.1 La inspiración en la biología.....	23
II.3.2 Optimización basada en inteligencia de enjambre.....	24
II.3.3 Algoritmo evolutivo.....	25
II.3.4 Componentes de un algoritmo evolutivo.....	26
II.3.4.1 Representación de los individuos.....	26
II.3.4.2 Función de evaluación.....	27
II.3.4.3 Población.....	28
II.3.4.4 Inicialización de parámetros.....	28
II.3.4.5 Condición de paro.....	29
II.3.5 Optimización Multi-objetivo.....	29
II.3.6 Algoritmos de optimización metaheurística.....	30
II.3.6.1 Algoritmos Genéticos.....	30
II.3.6.2 Optimización con Enjambre de Partículas.....	31
II.4 Conclusiones.....	32

## CONTENIDO (continuación)

<b>Capítulo III. Algoritmo de Abejas aplicado a la síntesis de una Agrupación Lineal Uniforme de Antenas.....</b>	<b>34</b>
III.1 Introducción.....	34
III.2 Algoritmo de Abejas.....	35
III.2.1 Abejas en la naturaleza.....	35
III.2.2 Algoritmo propuesto de Abejas.....	37
III.3 Modelado de Algoritmo de Abejas para su aplicación a la síntesis de una Agrupación Lineal Uniforme de antenas.....	39
III.3.1 Función costo.....	40
III.3.2 Selección inicial de parámetros.....	43
III.4 Conclusiones.....	44
<b>Capítulo IV. Simulaciones y análisis numérico.....</b>	<b>45</b>
IV.1 Introducción.....	45
IV.2 Consideraciones de simulación.....	46
IV.3 Aplicación del método de Chebyshev a la síntesis de una Agrupación Lineal de antenas .....	47
IV.4 Diagrama inicial de restricciones y puesta a punto del Algoritmo de Abejas.....	49
IV.5 Síntesis de nulos.....	52
IV.5.1 Un nulo.....	52
IV.5.2 Múltiples nulos.....	54
IV.5.3 Nulos sectoriales.....	56
IV.6 Comparativa de Algoritmo de Abejas con Schelkunoff.....	58
IV.7 Comparativa de Algoritmo de Abejas con Algoritmos Genéticos y Optimización con Enjambre de Partículas.....	61
IV.8 Análisis del tiempo de convergencia respecto al número de iteraciones.....	64
IV.9 Conclusiones.....	66
<b>Capítulo V. Conclusiones y trabajo futuro.....</b>	<b>67</b>
V.1 Referente a la optimización con Algoritmo de Abejas.....	68
V.2 Referente a la síntesis del diagrama de radiación de una Agrupación Lineal Uniforme de Antenas.....	70
V.3 Referente a las simulaciones y análisis numérico.....	72
V.4 Publicación como resultado del trabajo de investigación.....	74
V.5 Trabajo futuro.....	75
<b>Bibliografía.....</b>	<b>77</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		<b>Página</b>
1	Diagrama de radiación de una estación base convencional y una que emplea antenas inteligentes.....	2
2	Metodología de investigación aplicada en esta tesis.....	8
3	Diagrama de incidencia de un frente de onda en campo lejano en una agrupación lineal uniforme ALU.....	12
4	a) Esquema de búsqueda local. b) Esquema de búsqueda global, donde $p$ es la probabilidad de transición.....	22
5	Clasificación de los métodos más representativos de optimización.....	23
6	Colectivos en la naturaleza que han inspirado la optimización basada en inteligencia de enjambre.....	25
7	“Danza del meneo” de las abejas mieleras.....	36
8	Diagrama de flujo del Algoritmo de Abejas.....	38
9	Pseudocódigo del algoritmo básico de abejas.....	39
10	Esquema de control de sólo amplitud de una Agrupación Lineal Uniforme de antenas de $(2N)$ elementos, a través de Algoritmo de Abejas.....	40
11	Diagrama de radiación obtenido por el método de Chebyshev para una ALU de 12 elementos, con un nivel de lóbulos laterales deseado de 19dB y 24dB.....	48
12	Diagrama de radiación inicial (Chebyshev) de una ALU de 20 elementos de antena con un SLL de 30dB.....	51
13	Diagrama de radiación de una ALU de 20 elementos de antenas con SLL de 30dB y con un nulo ubicado en $\theta_i = 14^\circ$ .....	53

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		<b>Página</b>
14	Diagrama de radiación de una ALU de 20 elementos de antenas con SLL de 30dB y con dos nulos ubicados en $\theta_1 = 14^\circ$ y $\theta_2 = 16^\circ$ .....	54
15	Diagrama de radiación con SLL 30dB, para una ALU de 20 elementos de antena con tres nulos ubicados en $\theta_1 = -50^\circ$ , $\theta_2 = -30^\circ$ y $\theta_3 = 65^\circ$ .....	55
16	Diagrama de radiación con SLL 30dB, para una ALU de 20 elementos de antena con un nulo sectorial de $7^\circ$ centrado en $\theta_i = 53^\circ$ .....	57
17	Diagrama de radiación con SLL 30dB, para una ALU de 20 elementos de antena con dos nulos sectoriales de $5^\circ$ centrados en $\theta_1 = 17^\circ$ y $\theta_2 = 59^\circ$ .....	57
18	Comparativa del diagrama de radiación generado por el método de Schelkunoff y Algoritmo de Abejas, cancelando un interferente en $\theta_i = 20^\circ$ .....	59
19	Comparativa del diagrama de radiación generado por el método de Schelkunoff y Algoritmo de Abejas, cancelando tres interferentes en $\theta_1 = -50^\circ$ , $\theta_2 = -30^\circ$ y $\theta_3 = 65^\circ$ .....	60
20	Comparativa del diagrama de radiación generado por el método de Chebyshev y Algoritmo de Abejas para una ALU de 10 elementos con SLL de 17dB.....	62
21	Comparativa entre AA, Algoritmos Genéticos y PSO en tiempo de cómputo para obtener el diagrama de la figura 20	63
22	Tiempo de convergencia vs número de iteraciones de Algoritmo de Abejas.....	65

## LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Parámetros de configuración inicial para Algoritmo de Abejas.....	44
II	<i>Amplitudes normalizadas de los elementos de antena de la ALU respecto al centro de la misma y tiempos de cómputo empleados para la obtención de los diagramas de radiación mostrados en el capítulo IV, respectivamente.....</i>	64

# Capítulo I

---

## Introducción

---

### I.1 Aplicación de Antenas Inteligentes a Comunicaciones

#### Móviles Celulares

El incremento en la demanda de servicios móviles y la falta de capacidad de los sistemas de comunicaciones móviles celulares actuales, han impulsado el estudio y desarrollo de sistemas de comunicaciones celulares capaces de mejorar las características y la capacidad de dichos sistemas.

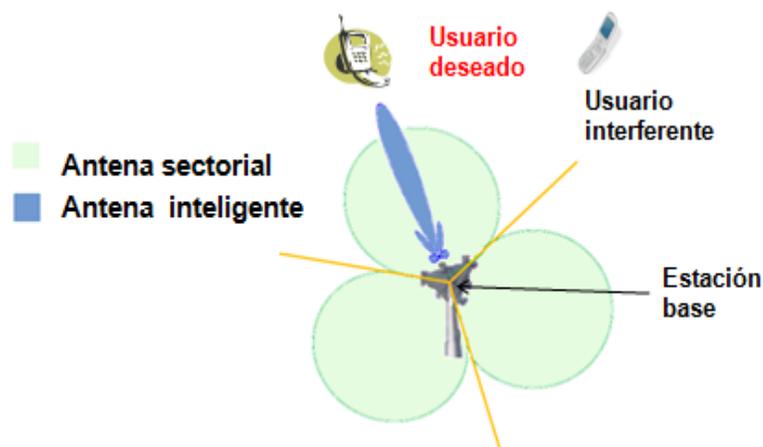
En los años recientes, como una solución a los problemas de ancho de banda de canal limitado, desvanecimiento multirayectoria, interferencia co-canal, nivel de seguridad, entre otros, se ha sugerido la aplicación de antenas inteligentes, empleando una agrupación de antenas<sup>1</sup> en la estación base, en principio. No obstante, una nueva línea de investigación contempla la posibilidad de incorporar antenas inteligentes también a los terminales móviles.

El término *antenas inteligentes* se emplea para referirse a un sistema de agrupación de antenas. El cual se define como un conjunto de elementos radiantes individuales, alimentados mediante una red lineal por una terminal común. En este caso, se utiliza un cierto nivel de procesamiento de las señales

---

<sup>1</sup> En este trabajo el término agrupación de antenas es referido al término en inglés *antenna array*.

que llegan a los elementos de la agrupación de antena, para conformar así un diagrama de radiación directivo hacia un usuario dado y simultáneamente generar nulos para la cancelación de interferentes, como se muestra en la figura 1 [Covarrubias Rosales, 2008].



**Figura 1: Diagrama de radiación de una estación base convencional y una que emplea antenas inteligentes.**

Los sistemas basados en antenas inteligentes se fundamentan en la generación de diagramas de radiación que tengan la capacidad de adaptarse al medio en el cual se transmite [Godara, 2004]. Donde dichos diagramas de la agrupación, están determinados por los diagramas de radiación individuales de cada uno de los elementos, por su orientación y el control planteado de la corriente de excitación, fase, ambas o espaciamiento entre elementos.

De tal manera, si se considera que cada uno de los elementos de la agrupación es un radiador isotrópico, el diagrama de radiación depende únicamente de la geometría de la agrupación y de los cambios en las excitaciones de cada elemento, ya sea en fase y/o amplitud de la onda incidente y/o separaciones entre elementos de la agrupación. Además, si se considera que los

radiadores de la agrupación están orientados en la misma dirección el diagrama de radiación es conocido como el *factor de agrupación*<sup>2</sup> (FA).

Las técnicas empleadas en las antenas inteligentes, y el beneficio de ellas en el incremento de la capacidad de los sistemas de comunicación móviles celulares, se basan en la estimación de la dirección de llegada de la señal deseada y los interferentes más significativos, el modelado del canal radio y *la síntesis de agrupación de antenas*.

Por ello, las antenas inteligentes se presentan como una opción para resolver los problemas presentados en los sistemas actuales de comunicaciones móviles celulares. Estas técnicas también tienen una amplia aplicación en radar, sonar y en varios sistemas de comunicaciones, mediante las cuales es posible minimizar la degradación de la relación señal a ruido debido a la presencia de interferentes [Guney et al., 2007].

Con múltiples antenas en la estación base se obtiene una ganancia en diversidad y el procesamiento de las señales se hace tanto en el dominio espacial como en el dominio temporal, teniendo las siguientes prestaciones [Lehne et al., 1999, Rappaport, 1999]:

- Aumento en la capacidad de conexión de múltiples usuarios simultáneamente
- La ganancia directiva es mayor que la de una antena omnidireccional o sectorial, entonces, transmitiendo con la misma potencia, la señal alcanza una mayor distancia.
- Se puede lograr una menor dispersión angular, logrando considerablemente la disminución de la propagación multitrayectoria.
- La diversidad espacial que proporciona una agrupación de antenas, permite distinguir las señales de usuarios interferentes de la señal del usuario deseado, esto permite que la estación base solo procese la señal de interés.

---

<sup>2</sup> El término Factor de Agrupación usado en este trabajo corresponde al término en inglés *Array Factor*.

La reducción del nivel de interferencia reduce el BER, de sus siglas en inglés Bit Error Rate, lo cual permite aumentar la calidad de la comunicación.

- Al tener un haz dirigible y estrecho, el área iluminada por la señal es pequeña, lo que hace muy difícil que otro usuario intercepte la comunicación, a menos que se encuentre en la misma posición espacial a donde está siendo enviada la señal.

## I.2 Formulación del problema

En el contexto de un sistema móvil celular de antenas inteligentes, aplicado en el receptor de un sistema de comunicaciones móviles celulares, esta tesis estudia la problemática asociada a la **optimización en el diseño de agrupación de antenas**, con el objetivo de mejorar las características de radiación del sistema, que permita tener una mayor reducción de interferencia y con ello mejorar la capacidad del sistema.

La evolución y tendencias de las comunicaciones móviles celulares debido al incremento exponencial de la contaminación del ambiente electromagnético, centran recientemente su atención en el estudio de técnicas de síntesis de agrupación de antenas, que permitan la generación de nulos en el diagrama de radiación en direcciones específicas, mientras se mantiene el lóbulo principal, con un nivel preestablecido de de lóbulos laterales, permitiendo con ello, cancelar señales interferentes al mismo tiempo de prestar el servicio a la señal deseada. Lo anterior ha motivado la realización de este trabajo.

Dentro del Grupo de Comunicaciones Inalámbricas en los últimos ocho años se ha enfrentado el reto de la síntesis de agrupaciones de antenas. Para ello, se han empleado algoritmos basados en técnicas analíticas y en técnicas de cómputo evolutivo. Como alternativa a las teorías clásicas, se han aplicado los **métodos de optimización estocástica** basada en conceptos de la teoría de Darwin, a la síntesis del diagrama de radiación con Algoritmos Genéticos

[Panduro Mendoza, 2004], optimización convexa, que a través de la manipulación matemática se logra expresar un problema de síntesis electromagnética en un problema de optimización convexa [Torrealba Meléndez, 2007], aplicación de polinomios de Legendre a la síntesis de una agrupación de antenas [Sánchez Gómez, 2007]. Por otra parte, existen técnicas metaheurísticas<sup>3</sup>, de las cuales se mencionan evolución diferencial, la cual realiza una manipulación geométrica de soluciones [Rocha Alicano, 2006] y PSO<sup>4</sup> basado en el estudio social de un colectivo, tal como bancos de peces o bandadas de aves [Arce Casas, 2008]. Dichos métodos de optimización estocástica constituyen un campo muy amplio de investigación en la síntesis de agrupaciones.

Los trabajos realizados en el grupo, relacionados a la síntesis de agrupación de antenas, han tenido como objetivo principal la optimización de lóbulo principal en cuanto al máximo nivel de lóbulos laterales y al ancho del lóbulo principal. En este trabajo se plantea emplear un algoritmo que permita obtener además, el posicionamiento de nulos en direcciones preestablecidas asignando un nivel de potencia mínima en dichas direcciones como objetivo principal.

Las técnicas de optimización clásicas usados en la síntesis de agrupación de antenas, es probable que se queden en mínimos locales si la solución inicial no es razonablemente cercana a la solución final. La mayoría de las técnicas de optimización clásicas y aproximaciones analíticas, también sufren de la falta de producción de soluciones flexibles hacia la optimización multi-objetivo planteada en este trabajo, bajo el concepto de cancelación de interferentes y optimización del lóbulo principal, simultáneamente.

Las desventajas de las técnicas clásicas y analíticas y el rápido desarrollo de la tecnología computacional en los años recientes, han alentado a los investigadores a usar algoritmos de optimización evolutiva, basados en

---

<sup>3</sup> La optimización metaheurística integra procedimientos de mejora local y estrategias de cómputo de alto nivel para crear un proceso capaz de escapar de los óptimos locales y realizar una búsqueda robusta en el espacio de soluciones.

<sup>4</sup> Optimización con Enjambre de Partículas, por sus siglas en inglés PSO, Particle Swarm Optimization.

metodologías de inteligencia computacional, las técnicas de optimización evolutiva tal como Algoritmos Genéticos, Optimización con Colonia de Hormigas, Optimización de Enjambre de Partículas, Evolución Diferencial y Selección Clonal son capaces de encontrar mejores y soluciones más flexibles que las técnicas clásicas y aproximaciones analíticas convencionales [Chen et al., 2006, Akdagli et al., 2007]. Estas técnicas son usadas con sus propios beneficios y limitaciones en la síntesis del diagrama de radiación en una agrupación de de antenas [Akdagli et al., 2006].

En este trabajo se plantea diseñar un sistema de agrupación de antenas que conceda características de radiación deseadas. En este caso se requiere sintetizar un diagrama de radiación directivo hacia un usuario dado y, simultáneamente, generar nulos que nos permitan la cancelación de señales interferentes en direcciones preestablecidas, lo cual implica asignar la mínima potencia del diagrama en dichas direcciones, obtener el mínimo ancho de haz del lóbulo principal y conservar el máximo nivel deseado de lóbulos laterales<sup>5</sup>.

Los métodos de generación de nulos están generalmente basados en controlar los pesos complejos (amplitud y la fase, a la vez), sólo la amplitud, la fase, o la posición de los elementos de la agrupación de antenas. La supresión de interferentes con los pesos complejos es la más eficiente, porque tiene más grados de libertad en el espacio de soluciones. Por otra parte, el control de pesos complejos es el más complejo considerando el costo del cambio de fase y atenuadores variables para cada elemento de la agrupación. Además, cuando el número de elementos incrementa, el tiempo computacional para encontrar los valores de las amplitudes de los elementos y fases también se incrementa.

El control sólo de las amplitudes de excitación de los elementos de antena usa un conjunto de atenuadores variables para ajustar las amplitudes de los elementos; si las amplitudes de los elementos poseen simetría par alrededor del centro de la agrupación, el número de atenuadores y el tiempo computacional de procesamiento se reducen a la mitad.

---

<sup>5</sup> Este término se refiere al término en inglés *Side Low Level* (SLL).

El problema de controlar solo la fase y solo la posición en la generación de nulos es inherentemente no lineal, y esto no puede ser resuelto directamente por métodos analíticos con alguna aproximación. Asumiendo que las perturbaciones de la fase o posición son pequeñas, las ecuaciones de cancelación pueden ser linealizadas [Guney et al., 2007].

En este trabajo se plantea el control sólo de las excitaciones de amplitud de los elementos de la agrupación, a través de un método novedoso de optimización metaheurística, bio-inspirado, basado en el comportamiento que las abejas emplean en la naturaleza en su búsqueda de alimento.

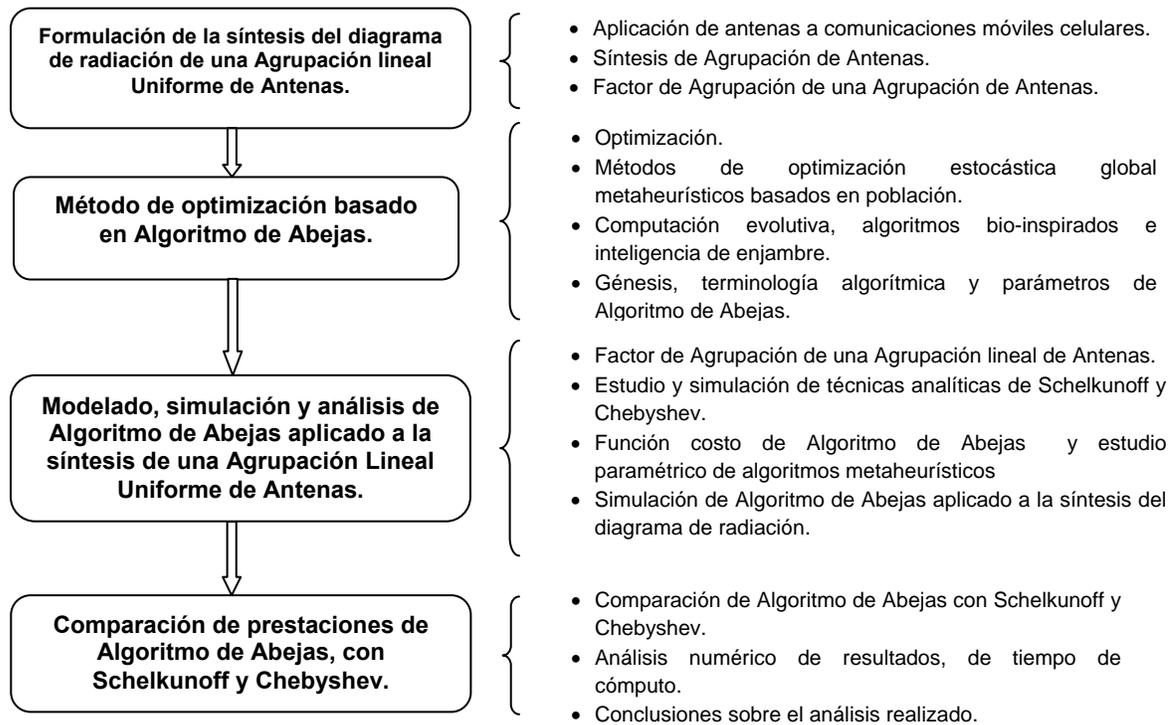
### **I.3 Objetivo de la tesis**

Se plantea el empleo de un método eficiente basado en Algoritmo de Abejas (**AA**) para la optimización de la síntesis de agrupaciones lineales de antenas, enfocada ésta principalmente a la generación de nulos en direcciones preestablecidas y en segundo término la optimización del lóbulo principal. Dicha síntesis se logrará controlando sólo la amplitud de la corriente de excitación de cada uno de los elementos de la agrupación de antenas.

Se plantea comparar prestaciones de cancelación de interferentes y optimización del lóbulo principal, mediante la generación de diagramas de radiación a través de Algoritmo de Abejas, Chebyshev y Schelkunoff, tomando como parámetros de comparación la precisión, flexibilidad y adaptación a la optimización multi-objetivo de AA.

### **I.4 Metodología de la investigación**

La metodología de investigación que se siguió en el desarrollo de este trabajo se esquematiza en la figura 2. En la parte izquierda se presenta la etapa de investigación planteada y realizada, y en la parte derecha se puntualizan actividades de estudio realizadas.



**Figura 2: Metodología de investigación aplicada en esta tesis.**

## **1.5 Organización de la tesis**

En base a la metodología presentada en la figura 2, esta tesis presenta en el capítulo II el estudio de la síntesis de una Agrupación Lineal Uniforme de antenas, lo cual implica, estudiar de manera concreta los fundamentos de una agrupación de antenas, para después, abordar el estado del arte, que contempla técnicas analíticas y de optimización metaheurística, enfatizando en sus alcances y limitaciones, se contempla una modelación matemática de Chebyshev y Schelkunoff, técnicas analíticas aplicadas a la síntesis del diagrama de radiación de agrupaciones lineales.

En este capítulo también se estudia de manera global la optimización, así como algunos métodos de optimización metaheurística basados en población, se estudian ampliamente conceptos inmersos de este trabajo, como lo es el cómputo evolutivo, algoritmos bio-inspirados aplicados a la optimización multi-objetivo, la

función costo, inicialización de parámetros y puesta a punto de los algoritmos metaheurísticos.

En el capítulo III se hace un estudio minucioso de los fundamentos, parámetros y aplicaciones del Algoritmo de Abejas. Dentro del mismo apartado se presenta la aplicación de Algoritmo de Abejas a la síntesis del diagrama de radiación de una Agrupación Lineal Uniforme de antenas, realizando una modelación matemática del sistema. En esta parte se estudia ampliamente la función costo y su influencia en el proceso de optimización.

El capítulo IV muestra los resultados obtenidos de simulaciones realizadas y se hace un análisis numérico del problema de síntesis de agrupación de antenas planteado, comparando las prestaciones del Algoritmo de Abejas con las técnicas analíticas de Chebyshev y Schelkunoff, bajo el concepto de optimización del lóbulo principal y cancelación de interferentes, respectivamente. Para con ello conocer las ventajas y desventajas que presentan las técnicas analíticas frente a las técnicas de optimización metaheurística. En esta sección se enfatiza la importancia de la puesta a punto y el estudio paramétrico del algoritmo, ya que, ello ha supeditado el buen funcionamiento del algoritmo.

Parte importante en esta parte del trabajo, es el análisis del tiempo de cómputo registrado en todos los procesos de simulación, lo cual se aborda en dicho capítulo, al igual que se realiza un análisis comparativo bajo el mismo escenario de simulación de Algoritmo de Abejas, con otras técnicas metaheurísticas, como lo son Algoritmo Genéticos y Optimización por Enjambre de Partículas y se resalta la ventaja que tiene Algoritmo de Abejas frente a los otros dos.

Por último en el capítulo V de esta tesis, se presentan las conclusiones generales, sección a través de la cual se demuestra que se ha cumplido satisfactoriamente con los objetivos planteados en esta tesis. En este apartado también se hace mención del trabajo futuro que puede ser realizarse sobre la misma línea de investigación

## Capítulo II

---

# Conceptos Asociados con Agrupación de Antenas y Cómputo Evolutivo

---

### II.1 Introducción

En este capítulo se describen los fundamentos básicos de una agrupación de antenas. Así como algunas técnicas analíticas de interés en esta tesis aplicadas a la síntesis de agrupación de antenas, lo anterior, bajo el concepto de cancelación de interferentes y optimización del lóbulo principal, como lo son Schelkunoff y Chebyshev, respectivamente. Es necesario generar un panorama concreto sobre estos conceptos, para así discernir la relevancia que este trabajo tiene dentro de la síntesis electromagnética.

Además, se abordan de manera global los fundamentos y conceptos del cómputo evolutivo, bio-inspirado en la inteligencia de grupo que algunos colectivos muestran como modo de supervivencia en la naturaleza.

### II.2 Agrupación de antenas

En muchas aplicaciones de sistemas de comunicaciones inalámbricas, es necesario diseñar antenas con alta directividad<sup>6</sup>, con ganancias muy altas para

---

<sup>6</sup> La directividad de la antena proporciona una medida de la capacidad de concentrar la radiación en una determinada dirección respecto a otras direcciones.

alcanzar mayor distancia en la comunicación. Ésto podría ser logrado solo incrementando las dimensiones físicas de la antena. Otra forma de incrementar las capacidades de la antena, sin aumentar el tamaño de la misma, es formar un ensamble de radiación de antenas con una configuración geométrica y eléctrica adecuada. Esta nueva antena, formada por múltiples elementos idénticos, es referida como una **agrupación de antenas**.

En base a lo anterior, se puede definir una agrupación de antenas como un conjunto de elementos radiantes individuales alimentados desde una terminal común, mediante redes lineales. Cada tipo de agrupación está conformado por un número finito de elementos de antena, los cuales están distribuidos de acuerdo a un cierto patrón geométrico y espaciados entre sí una distancia medida en términos de longitud de onda. Los elementos de la agrupación son considerados como sensores en la perspectiva de recepción y como radiadores en la perspectiva de transmisión [Covarrubias Rosales, 2008].

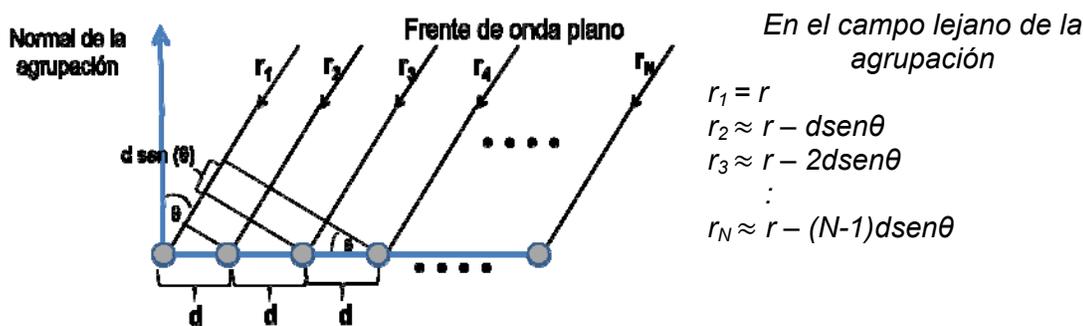
Para proveer diagramas con mayor directividad, es necesario que los campos de radiación de cada elemento interfieran constructivamente en direcciones deseadas y que interfieran destructivamente en el espacio restante. En una agrupación de elementos idénticos, hay cinco tipos de control que pueden ser usados para formar el diagrama total de la antena, estos son [Balanis, 2005]:

- La configuración geométrica de la agrupación
- La distancia relativa entre elementos
- La excitación de amplitud de cada uno de los elementos
- La excitación de fase de cada uno de los elementos
- El diagrama de radiación de cada uno de los elementos

### **II.2.1 Agrupación lineal uniforme de antenas y obtención del factor de agrupación**

Una agrupación lineal uniforme (ALU) se define como una agrupación en la cual los elementos de antena, están dispuestos a lo largo de una línea recta, y

están separados entre sí una distancia  $d$ , donde  $d$  es constante, y existe una distancia  $r$  entre el móvil y la agrupación de antenas, como se muestra en la figura 3.



**Figura 3: Diagrama de incidencia de un frente de onda en campo lejano en una agrupación lineal uniforme ALU.**

El factor de agrupación (**FA**) representa al diagrama de radiación en campo lejano<sup>7</sup> de una agrupación de antenas cuyos elementos son iguales, irradian de forma isotrópica y están orientados en la misma dirección. El diagrama de radiación por su parte, es la transformada de Fourier de una corriente continua y representa la distribución de la potencia radiada en varias posiciones angulares en relación a la antena, todo esto por medio de un diagrama polar

Cuando los diagramas de radiación de cada elemento de la agrupación son iguales y los elementos están orientados en la misma dirección espacial, el diagrama de radiación de la agrupación se puede obtener como el producto del factor de agrupación por el diagrama de radiación del elemento. El campo total radiado por la agrupación se puede obtener, aplicando el principio de superposición derivado de la linealidad de las ecuaciones de Maxwell, como el sumatorio de los campos radiados por cada uno de los elementos [Covarrubias Rosales, 2008].

<sup>7</sup> Conocida también como zona de Fraunhofer y se refiere a que la distribución angular del campo de radiación es independiente a la distancia de la antena,  $r \geq D^2/\lambda$ , donde  $r$  es la distancia del punto de radiación al punto de medición,  $D$  la dimensión máxima de la antena y  $\lambda$  es la longitud de onda.

Si se usan radiadores isotrópicos para derivar el FA, se simplifica con ello el algebra requerida. El campo de un radiador isotrópico localizado en el origen puede ser escrito como:

$$E_{\theta 1} = I_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (1)$$

Donde  $I_0$  es la corriente de excitación del elemento de referencia,  $r$  es el radio del espacio irradiado por una antena isotrópica,  $k$  es el vector de onda y  $|k| = \frac{2\pi}{\lambda}$  es el número de onda, donde  $\lambda$  es la longitud de onda. Si se considera que los elementos de la agrupación están uniformemente espaciados con una distancia  $d$  como se muestra en la figura 3. Y además, las magnitudes de las corrientes son consideradas iguales y la corriente del elemento de antena localizado en el origen es usada como la fase de referencia, se tiene:

$$I_1 = I_0, \quad I_2 = I_0 e^{j\Phi_2}, \quad I_3 = I_0 e^{j\Phi_3}, \dots, \quad I_N = I_0 e^{j\Phi_N} \quad (2)$$

Los campos lejanos individuales de los elementos de antena son [Balanis, 2005]:

$$\begin{aligned} E_{\theta 1} &\approx I_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} = E_0 \\ E_{\theta 2} &\approx I_0 e^{j\Phi_2} \frac{e^{-jk(r-d\text{sen}\theta)}}{4\pi r} = E_0 e^{j(\Phi_2 + k d\text{sen}\theta)} \\ &\vdots \\ E_{\theta N} &\approx I_0 e^{j\Phi_N} \frac{e^{-jk(r-(N-1)d\text{sen}\theta)}}{4\pi r} = E_0 e^{j(\Phi_N + (N-1) k d\text{sen}\theta)} \end{aligned} \quad (3)$$

El campo total en campo lejano de un ALU es encontrado por superposición.

$$\begin{aligned}
E_{\theta} &= E_{\theta_1} + E_{\theta_2} + E_{\theta_3} + \dots + E_{\theta_N} \\
E_{\theta} &= E_0 \left[ 1 + e^{j(\phi_2 + k \, dsen\theta)} + \dots + e^{j(\phi_N + (N-1) \, kdsen\theta)} \right] \\
E_{\theta} &= E_0 [FA] \\
FA &= \left[ 1 + e^{j(\phi_2 + k \, dsen\theta)} + \dots + e^{j(\phi_N + (N-1) \, kdsen\theta)} \right] \tag{4}
\end{aligned}$$

Si en una agrupación lineal uniforme se agrega fase progresiva lineal entre elementos, para considerar la variación de la señal en cada elemento en función de la variación de fase de la señal portadora, se tiene:

$$\phi_1 = 0, \quad \phi_2 = \alpha, \quad \phi_3 = 2\alpha, \dots, \phi_N = (N-1)\alpha$$

Insertando la fase progresiva lineal en (4) tenemos:

$$\begin{aligned}
FA &= \left[ 1 + e^{j(\alpha + k \, dsen\theta)} + e^{j2(\alpha + k \, dsen\theta)} + \dots + e^{j(N-1)(\alpha + k \, dsen\theta)} \right] \\
FA &= \left[ 1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi} \right] \quad \text{donde } \psi = \alpha + kdsen\theta \tag{5}
\end{aligned}$$

Si se considera (5) en términos de una sumatoria, se tiene:

$$FA = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \tag{6}$$

La función  $\psi$  es definida como la función de fase de la agrupación y está en función del espaciamiento entre elementos, del cambio de fase, frecuencia y ángulo de elevación. Además, en (6) se consideran las excitaciones de amplitud de los elementos de la agrupación como unitarias.

Como ya se mencionó, cuando se obtienen las características deseadas del diagrama de radiación, con control sólo de amplitud, el número de atenuadores variables y el tiempo de procesado se reducen a la mitad. Lo cual implica enormes prestaciones en la resolución del problema planteado en este trabajo.

Una agrupación con un número par de elementos isotrópicos ( $2N$ ), que es posicionado a lo largo del eje  $x$ , con  $N$  elementos de antena colocados en cada lado del centro de la agrupación, separados una distancia constante  $d$  y asumiendo que las amplitudes de las excitaciones de los elementos de antena alrededor del origen son no uniformes, tiene como factor de agrupación [Balanis, 2005]:

$$FA_{2N} = a_1 e^{j(\frac{1}{2})kdsen\theta} + a_2 e^{j(\frac{3}{2})kdsen\theta} + \dots + a_N e^{j((2N-1)/2)kdsen\theta} + a_1 e^{-j(\frac{1}{2})kdsen\theta} \\ + a_2 e^{-j(\frac{3}{2})kdsen\theta} + \dots + a_N e^{-j((2N-1)/2)kdsen\theta} \quad (7)$$

Resumiendo, y agrupando los términos de (7) en una sumatoria, se obtiene [Balanis, 2005]:

$$FA_{2N} = 2 \sum_{n=1}^N a_n \cos\left(\frac{2n-1}{2} kdsen\theta\right) \quad (8)$$

Donde  $a_n$  es la amplitud del  $n$ -ésimo elemento,  $\theta$  el ángulo en modo transversal a la agrupación,  $d$  es la distancia entre elementos,  $k$  es el vector de onda. Puesto que en este trabajo no se plantea un control de fase, se considera que la fase progresiva es cero y la función de fase de la agrupación está dada por  $\psi = kdsen\theta$ . Si se considera directamente que la distancia de cada elemento al centro de la agrupación es  $d_n$  el FA puede ser escrito como [Güney et al., 2007]:

$$FA_{2N} = 2 \sum_{n=1}^N a_n \cos(kd_n sen\theta) \quad (9)$$

## II.2.2 Síntesis de agrupación de antenas

En la práctica, es necesario diseñar un sistema utilizando una antena que permita alcanzar características de radiación deseadas. Por ejemplo, un requerimiento muy frecuente es diseñar un sistema cuyo campo de radiación en campo lejano posea nulos en ciertas direcciones, para cancelar interferentes en determinadas posiciones, como lo es el objetivo planteado en esta tesis. Otro requerimiento común son los diagramas que muestran una distribución deseada del ancho del lóbulo principal y el máximo nivel deseado de lóbulos laterales, lóbulos laterales menores, etc. Ésto representa uno de los objetivos secundarios de esta tesis. La tarea, en general, es encontrar no solo la configuración geométrica de las dimensiones de la antena, sino también la configuración de excitaciones de la misma. Lo anterior es referido usualmente como *síntesis*.

La síntesis del diagrama de radiación de una antena usualmente requiere primero de una aproximación del diagrama deseado. Generalmente, la síntesis la podemos clasificar dentro de tres grupos, el primer grupo requiere que el diagrama de radiación posea nulos en direcciones deseadas, el método introducido por Schelkunoff puede ser usado para este propósito y del cual se hablara detalladamente en la siguiente sección. Otra categoría requiere que el diagrama de radiación exhiba una distribución deseada en toda la región de visibilidad, técnicas como la de *configuración de haz* o Woodward-Lawson ayudan a cumplir con este objetivo. Y el tercer grupo introduce técnicas que producen diagramas de radiación con un lóbulo principal estrecho y lóbulos laterales bajos, como lo son Chebyshev, el método binomial, Taylor, entre otros.

En este trabajo solo se describen los métodos de Chebyshev y Schelkunoff, puesto que, son los métodos de interés en esta tesis para establecerse como un diagrama inicial de características deseadas y para comparar prestaciones de cancelación de interferentes con Algoritmo de Abejas, respectivamente.

### II.2.2.1 Método polinomial de Schelkunoff

En esta sección se describe puntualmente el método de Schelkunoff, el cual es un método analítico propicio para la síntesis de agrupaciones cuyos diagramas de radiación poseen nulos en direcciones determinadas, además, para fines de diseño requiere información sobre el número y ubicación de los nulos. Bajo estas consideraciones, en este trabajo se plantea comparar prestaciones de rechazo de interferentes entre Schelkunoff y Algoritmo de Abejas para cumplir gradualmente con el objetivo de la tesis. La modelación analítica de la técnica se describe a continuación:

El FA de una agrupación de  $N$  elementos, equiespaciados, con amplitudes de excitación no uniformes y excitaciones de fase progresiva, está dado por:

$$FA = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(n-1)\psi} \quad \text{donde } \psi = \alpha + kdsen\theta \quad (10)$$

Donde a diferencia de (6)  $a_n$  son las excitaciones no uniformes de **amplitud** de cada elemento de antena.

Representando

$$z = x + jy = e^{j\psi} = e^{j(\alpha + kdsen\theta)} \quad (11)$$

se puede reescribir (10) como:

$$FA = \sum_{n=1}^N a_n z^{n-1} = a_1 + a_2 z + a_3 z^2 + \dots + a_N z^{N-1} \quad (12)$$

La expresión mostrada en (12) representa un polinomio de grado  $(N - 1)$ . Un polinomio de grado  $(N - 1)$  tiene  $(N - 1)$  raíces y puede ser expresado como un producto de  $(N - 1)$  términos lineales. Así, (12) se puede escribir como:

$$FA = a_N(z - z_1)(z - z_2)(z - z_3) \dots (z - z_{N-1}) \quad (13)$$

Donde  $z_1, z_2, z_3, \dots, z_{N-1}$ , son las raíces del polinomio, las cuales podrían ser complejas. La magnitud de (13) puede ser expresada como:

$$|FA| = |a_N| |z - z_1| |z - z_2| |z - z_3| \dots |z - z_{N-1}| \quad (14)$$

La variable compleja  $z$  de (11) puede ser escrita de otra forma como:

$$z = |z|e^{j\psi} = z\angle\psi = 1\angle\psi \quad (15)$$

Es claro que para cualquier valor de  $\alpha, d$  y  $\theta$  la magnitud de  $z$  siempre se encuentra dentro del círculo unitario. Sin embargo su fase depende de los valores  $\alpha, d$  y  $\theta$ . El análisis gráfico de la incidencia de estos tres parámetros es explicado en detalle en [Balanis, 2005]. Después de dicho análisis se concluye que, el espaciamiento mínimo requerido entre los elementos de la agrupación, para cubrir el círculo completo referido a la región de visibilidad, en búsqueda de múltiples valores para  $z$  es de  $\lambda/2$ .

La magnitud del FA tiene una interpretación geométrica. Para un valor dado de  $z$  en la región de visibilidad del círculo unitario, corresponde a un valor de  $\theta$  como es determinado en (11),  $|FA|$  es proporcional al producto de las distancias de  $z$  y  $z_1, z_2, z_3, \dots, z_{N-1}$ , las raíces de FA. Además se obtiene una constante, la fase de FA es igual la suma de las fases entre  $z$  y cada una de las raíces. Si todas las raíces son colocadas dentro de la región de visibilidad del círculo unitario, entonces cada una corresponde a un nulo en  $|FA|$ .

### II.2.2.2 Método de Dolph-Chebyshev

En esta sección se introduce el estudio del método de Chebyshev para la síntesis de agrupaciones. Debido a que, en este trabajo se busca establecer las características deseadas del diagrama de radiación, en términos de máximo nivel deseado de lóbulos laterales y ancho del lóbulo principal, con un diagrama inicial (máscara de restricciones), generado por la síntesis de Chebyshev. A groso modo, este método otorga el ancho mínimo del lóbulo principal dado un nivel máximo deseado de lóbulos laterales. El método fue introducido originalmente por [Dolph, 1946].

El conjunto de excitaciones de los coeficientes de los elementos de antena de la agrupación está relacionado a los polinomios de Chebyshev. Éste es un método que otorga a la salida la configuración de amplitudes que sintetizan el diagrama de radiación deseado en los términos mencionado anteriormente, por lo cual representa una herramienta sencilla y confiable para el diseño inicial. Una limitante importante de Chebyshev es que trabaja en modo transversal y no considera dirigibilidad del haz principal, limitantes que se mantiene en este trabajo.

El FA de una agrupación con un número par o impar de elementos puedes ser encontrado de la siguiente forma, respectivamente [Balanis, 2005].

$$FA_{2N(par)} = \sum_{n=1}^N a_n \cos[(2n - 1)u] \quad (16a)$$

$$FA_{2N+1(impar)} = \sum_{n=1}^{N+1} a_n \cos[2(n - 1)u] \quad (16b)$$

$$\text{donde } u = \frac{\pi d}{\lambda} \text{sen}\theta \quad (16c)$$

La formula recursiva para los polinomios de Chebyshev es:

$$T_m(z) = 2zT_{m-1}(z) - T_{m-2}(z) \quad (17)$$

Ésto puede ser ocupado para encontrar un polinomio de Chebyshev si se conocen los polinomios dos órdenes menores. Cada polinomio puede ser calculado usando:

$$T_m(z) = \cos[m\cos^{-1}(z)] \quad -1 \leq z \leq 1 \quad (18 a)$$

$$T_m(z) = \cos h[m\cosh^{-1}(z)] \quad |z| > 1 \quad (18 b)$$

Ya que el FA de una agrupación es una sumatoria de términos de coseno, cuya forma es la misma que un polinomio de Chebyshev. Los coeficientes desconocidos del FA pueden ser encontrados comparando la serie representada por términos del coseno con el polinomio de Chebyshev apropiado. *El orden del polinomio debe ser uno menos que el número total de elementos de la agrupación*

Si se considera a  $R$  como la relación deseada entre el haz principal y el máximo nivel de lóbulo lateral, siendo este la unidad. El nivel deseado de lóbulos laterales esta dado por  $1/R$ , o:

$$SLL = -20\log R \quad (19)$$

Si se evalúa en el máximo nivel del lóbulo principal, donde  $x = x_0$  y se resuelve para  $x_0$ , se obtiene:

$$x_0 = \cosh\left(\frac{1}{N-1}\cosh^{-1}R\right) \quad (20)$$

De lo anterior, se resume el método de diseño; es decir, para una relación de lóbulo lateral  $R$  dada puede calcularse de (18a) y  $x_0$  de (18b). Por otra parte el

factor de agrupación se calcula de las ecuaciones (16a) o (16b). Para una explicación en detalle del método de Chebyshev consultar [Balanis. 2005].

### II.3 Optimización global y Cómputo evolutivo

Muchos de los problemas de síntesis electromagnética tienden a ser multi-modales, multi-dimensionales, multi-variables. Por otra parte, también tienen el propósito de cumplir con varios objetivos a la vez, convirtiéndose con ello en problemas de optimización multi-objetivo; tal como el problema que se plantea en esta tesis, el cual implica optimizar un diagrama de radiación que sintetice nulos en direcciones preestablecidas, y simultáneamente conserve las características óptimas del lóbulo principal.

Bajo las consideraciones anteriores, la mayoría de las técnicas de optimización clásicas y aproximaciones analíticas, sufren de la falta de producción de soluciones flexibles para el problema de optimización multi-objetivo planteado. Las desventajas de las técnicas clásicas y analíticas y el rápido desarrollo de la tecnología computacional en los años recientes han impulsado el uso algoritmos de optimización evolutiva basados en metodologías de inteligencia computacional [Guney et al., 2007].

La optimización global se usa para referirse a la búsqueda de una solución  $x^*$  de un conjunto de soluciones posibles  $S$ . **Optimización** es un término que tiene diferentes connotaciones. Generalmente se usa para referirse a un proceso de ajuste a un sistema que permite obtener la mejor salida o solución posible. El objetivo que se tiene al resolver un problema de optimización es encontrar una solución óptima con un costo computacional razonable. En base a ello, se puede clasificar a los métodos de optimización en dos grandes grupos [Engelbrench, 2005]:

**1) Métodos de búsqueda local:** Obtienen la mejor solución posible en la vecindad del punto inicial, atribuyendo una fuerte dependencia al punto de

arranque. Gran parte de estos métodos están basados en el cambio de gradiente, lo cual implica diferenciabilidad y continuidad difíciles de encontrar en la práctica. La mayoría de técnicas analíticas utilizan un método determinístico punto a punto como se muestra en la figura 4a.

- 2) **Métodos de búsqueda global:** Son independientes a la naturaleza del espacio de soluciones y son capaces de usar y explorar todo el espacio de búsqueda de manera exhaustiva, encontrando una solución global, como lo ilustra la figura 4b.

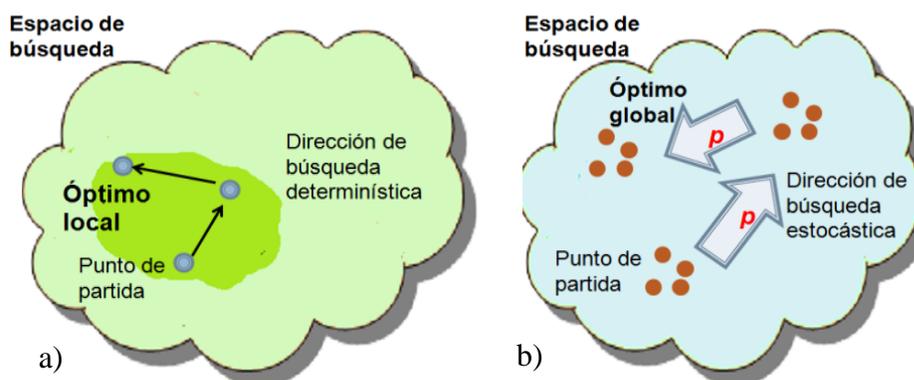


Figura 4: a) Esquema de búsqueda local. b) Esquema de búsqueda global, donde  $p$  es la probabilidad de transición.

Una clasificación mas específica de los métodos de optimización más representativos se muestra de manera concreta en la en la figura 5<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Debido a que algunos de los métodos no tienen una traducción literal al castellano, se optó por dejarlos enunciados en inglés.

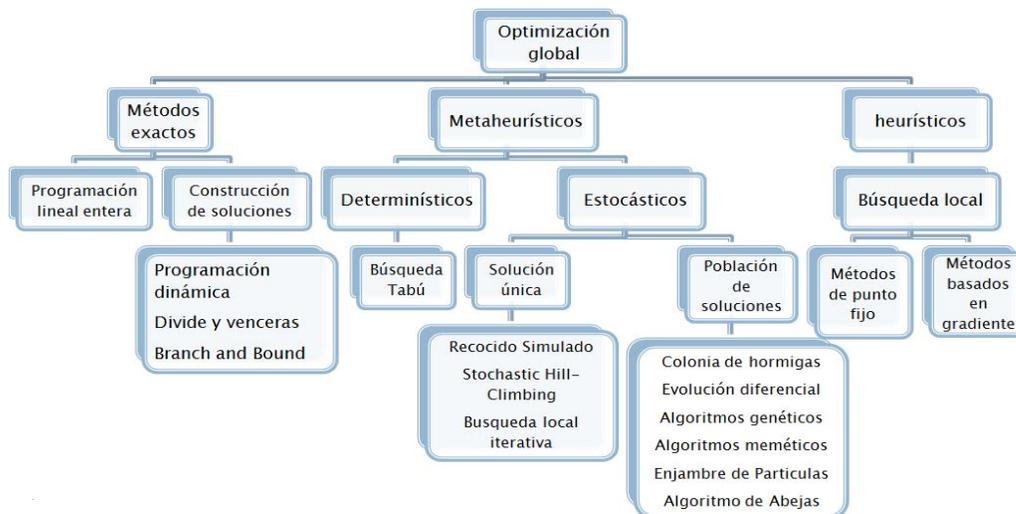


Figura 5: Clasificación de los métodos más representativos de optimización.

### II.3.1 La inspiración de la biología

La biomimética consiste en el uso de los principios biológicos para aplicarlos a diseños de ingeniería y otras aplicaciones, representa el estudio e imitación de métodos, mecanismos y procesos naturales. Las capacidades de la naturaleza son superiores que las capacidades humanas, y adaptando muchas de sus características pueden significativamente mejorar los avances científicos y tecnológicos [Yen et al. ,2007].

A través de la evolución, la naturaleza ha experimentado con varias soluciones para sus retos y ha mejorado las ya existentes. Muchos de las soluciones propuestas a problemas en la biología, química, mecánica, hidráulica, telecomunicaciones, ciencias de los materiales, movilidad, control, sensores y muchos otros campos conocidos en la ciencia y en la ingeniería; han sido sugeridas a partir de la observación de procesos naturales, emulando el “*modus operandi*” de algunas especies animales cuando se enfrentan a problemas de supervivencia [García Nieto, 2007].

### II.3.2 Optimización basada en inteligencia de enjambre

Los algoritmos de optimización basada en inteligencia de enjambre de las siglas en inglés SOA's<sup>9</sup>, están basados en el estudio de comportamientos colectivos presentes en sistemas de la naturaleza, generalmente de carácter descentralizado y auto organizativo, usados para dirigir una búsqueda hacia el óptimo global. Dicho comportamiento social define los movimientos de las variables de decisión en el espacio de búsqueda y las orienta a soluciones óptimas [García Nieto, 2007].

Una diferencia clave entre SOA's y los algoritmos de búsqueda directa, es que los primeros usan una población de soluciones en todas las iteraciones en vez de una solución única. Como una población de soluciones es procesada en cada iteración, la salida de cada iteración es también una población de soluciones. Si un problema de optimización tiene un óptimo único, la población de un SOA puede esperarse converja a esta solución óptima [Pham et al., 2007].

SOA's incluye Optimización con Colonia de Hormigas, bio-inspirado en una colonia de hormigas; Algoritmos Genéticos, basado en la teoría de la evolución natural; Optimización por Enjambre de Partículas, inspirado en la biología de bandadas de aves y bancos de peces, y Algoritmo de Abejas, imitando el comportamiento natural de las abejas en su proceso de búsqueda y recolección de alimento. Dichos algoritmos han sido inspirados en los colectivos de la naturaleza, de los cuales se ha sugerido su nombre, al emular la heurística que el algoritmo plantea. Algunos de los colectivos mencionados se muestran en la figura 6.

---

<sup>9</sup> En esta tesis el término algoritmos de optimización basados en enjambre, se usa para referirse al término en inglés *Swarm-based Optimization Algorithm* (SOA's)



**Figura 6: Colectivos en la naturaleza que han inspirado la optimización basada en inteligencia de enjambre.**

Bajo el punto de vista de la inteligencia de enjambre<sup>10</sup> se argumenta que las interacciones sociales entre todos los individuos, disponen la optimización de patrones complejos de actitud, comportamiento y cogniciones.

### **II.3.3 Algoritmo evolutivo**

En esta tesis se propone el empleo de un algoritmo evolutivo, como lo es el Algoritmo de Abejas, para aplicarse a la síntesis electromagnética, por ello, es de suma importancia generar un panorama concreto de los fundamentos de este algoritmo.

Al inicio de un algoritmo evolutivo se crea aleatoriamente un conjunto de posibles soluciones, para después aplicar la función de calidad como una medida abstracta de aptitud, “cuanto más alta es la calidad, la solución es mejor”. Basado en esta aptitud, algunas de las mejores soluciones son seleccionadas para emigrar a la siguiente generación, sometiéndolas a procesos que utilizan diferentes esquemas, operadores y/o estrategias en función a la heurística del

<sup>10</sup> El término de inteligencia de enjambre en este trabajo, es usado para referirse al término en inglés *Swarm intelligence*.

algoritmo y al problema bajo análisis. Este proceso puede ser iterado hasta que sea encontrada una solución que contenga la suficiente calidad (como solución), o un conjunto de soluciones haya alcanzado un límite preestablecido.

Un entorno dado, está lleno de una población de individuos que se esfuerza por sobrevivir y reproducirse. La aptitud<sup>11</sup> de estos individuos está determinada en relación a que tan exitosos pueden ser al lograr sus objetivos. En el contexto de un proceso estocástico para resolver un problema a prueba y error, se tiene un conjunto de posibles soluciones, su calidad determina la oportunidad que ellas tienen para mantenerse y ser usadas como base para formar mejores soluciones [Eiben et al., 2007].

Alternativamente, la evolución es frecuentemente vista como un proceso de adaptación, desde esta perspectiva la aptitud no es vista como una función objetivo para ser optimizada, pero si como una expresión de los requerimientos del entorno.

Notar que la mayoría de componentes de un proceso evolutivo son de naturaleza estocástica, durante el proceso de selección algunos individuos tienen mayor probabilidad de ser seleccionados que otros.

## **II.3.4 Componentes de un algoritmo evolutivo**

### **II.3.4.1 Representación de los individuos**

El primer paso en el uso de un algoritmo evolutivo es vincularlo con el mundo real, esto es, crear un puente en el contexto real del problema y el espacio de soluciones del problema donde la evolución toma su lugar. La palabra *representación* se usa para referirse a la proyección entre el espacio de soluciones del problema real y al espacio de soluciones del algoritmo evolutivo.

La terminología común de cómputo evolutivo usa muchos sinónimos para nombrar los elementos de estos dos espacios. En el lado del contexto del

---

<sup>11</sup> El término aptitud en este trabajo se refiere al término en inglés *fitness*.

problema original, candidato, fenotipo, solución, individuos, entre otros, son usados para denotar los puntos del espacio de posibles soluciones. En el lado de los algoritmos evolutivos, genotipo, cromosoma, individuos, partícula, abeja, hormiga, entre otros, pueden ser usados para donde la búsqueda evolutiva toma su lugar.

#### **II.3.4.2 Función de evaluación (función fitness)**

Desde la perspectiva de resolución del problema, la función de evaluación representa la tarea a resolver en el contexto evolutivo. Técnicamente, ésta es una función o procedimiento que asigna la medida de calidad de los individuos. La evaluación de dicha función representa, una estimación heurística de la calidad de la solución y los procesos de búsqueda se dirigen por la variación y los operadores de selección. Típicamente, la función de evaluación está compuesta de una medida de calidad entre el espacio de soluciones real y el espacio de solución del algoritmo, es el único nexo entre el método de optimización y el problema bajo análisis. El papel de la función de evaluación es, presentar los requerimientos de adaptación al entorno y formar las bases de selección de la población.

El espacio originado como resultado de evaluar la función de evaluación, contiene los grados de éxito con los cuales el patrón de parámetros optimiza los valores en el espacio de soluciones, es una medida de aptitud o de error. Por este motivo la función de evaluación es trascendental en el rendimiento del método de optimización, hasta el punto que la expresión utilizada para medir la calidad del individuo, condiciona el potencial del algoritmo. Si en esta función no se introduce una configuración adecuada de valores del problema bajo análisis, para valorar la calidad de cada elemento, se atribuirá las carencias del algoritmo a la propia función de evaluación [Kennedy et al., 2002].

### **II.3.4.3 Población**

Los algoritmos evolutivos son algoritmos de búsqueda basados en población, donde cada uno mantiene una población de posibles soluciones. El primer paso en este tipo de algoritmos para resolver un problema de optimización es generar una población inicial. El estándar para generar una población inicial es, asignar un valor aleatorio del dominio disponible para cada uno de los individuos de la población. El objetivo de una selección aleatoria, es asegurar que la población inicial es una representación uniforme del espacio de búsqueda. Si la región de espacio de búsqueda no es cubierta por la población inicial, posiblemente estas opciones puedan ser descuidadas en el proceso de búsqueda.

El tamaño de la población afecta directamente a la carga computacional y la exploración de habilidades. Un gran número de individuos incrementa la diversidad, así se mejora la exploración de habilidades de la población. Sin embargo, esto incrementa considerablemente la complejidad computacional por cada generación. Mientras el tiempo de ejecución por generación se incrementa, esto podría implicar que se necesiten menos generaciones para cumplir con el objetivo [Engelbretcht, 2005].

### **II.3.4.4 Inicialización de parámetros**

La inicialización de parámetros es simple en la mayoría de algoritmos evolutivos, la primera población es el punto de partida de una generación aleatoria de individuos. En principio, problemas heurísticos específicos pueden ser usados para crear una población inicial con una aptitud elevada [Eiben et al., 2007].

La aplicación de cualquier algoritmo evolutivo a un problema, está supeditado al ajuste inicial de parámetros del algoritmo para encontrar aquella configuración que ofrece la mejor relación entre precisión y costo computacional.

La selección de parámetros o esquemas óptimos en algoritmos evolutivos puede hacerse por las siguientes alternativas: recurriendo a alguna de las

configuraciones típicas en la literatura, realizando un estudio paramétrico o una combinación de ambos [Arce Casas, 2008].

### **II.3.4.5 Condición de paro**

Se pueden distinguir dos casos de distinguidas condiciones de paro, si el problema tiene un nivel óptimo de aptitud, probablemente yendo a un nivel conocido de la función objetivo dada, se pueda establecer como una condición de paro. Sin embargo, los algoritmos evolutivos son estocásticos y la mayoría de ellos no tiene una garantía de alcanzar el óptimo, por lo tanto, esta condición podría no ser alcanzada y el algoritmo nunca lograría alcanzar la condición de paro. Esto requiere que esta condición sea ampliada con alguna restricción que sin duda pare al algoritmo. Comúnmente, se usan las siguientes opciones como criterio de paro:

- El tiempo máximo transcurrido de CPU permitido.
- Número total de evaluaciones de la población de un límite dado.
- Para un periodo de tiempo dado (por ejemplo: para un número de generaciones o un número de evaluaciones).
- La diversidad de la población cae dentro un umbral dado.

### **II.3.5 Optimización multi-objetivo**

Muchos problemas de optimización en el mundo real requieren la optimización simultánea de un cierto número de objetivos. Tal es el caso del problema que enfrenta esta tesis, ya que requiere optimizar simultáneamente el lóbulo principal y sintetizar nulos con profundidad adecuada. El cumplir con varios objetivos a la vez no es una tarea fácil, por ello es trascendental el entendimiento de este concepto para su aplicación en el objetivo principal de la tesis.

Es evidente la existencia de compromisos existentes entre las múltiples soluciones encontradas para un problema multi-objetivo. En ese sentido, multi-objetivo es similar a *niching*<sup>12</sup>, donde ambas aproximaciones encuentran múltiples soluciones para un problema de optimización, la diferencia es que los algoritmos multi-objetivo tiene que encontrar un conjunto de soluciones con un balance óptimo para los diferentes objetivos mientras que algoritmos *niching* encuentran soluciones para un solo objetivo [Engelbretcht, 2005].

En este tipo de problemas, la calidad de una solución es determinada por su rendimiento en relación a los diferentes objetivos en conflicto, en la práctica resulta que muchas aplicaciones que tradicionalmente han sido abordados definiendo una sola función objetivo, que tiene inherente un propósito multi-objetivo, pero que ha sido transformada en una función con un solo objetivo para que sea manejable.

### **II.3.6 Algoritmos de optimización metaheurística**

La optimización metaheurística consiste en aplicar estrategias computacionales de alto nivel, para realizar una búsqueda global y así encontrar el óptimo global. Los métodos estocásticos usan elementos aleatorios para transformar una posible solución en una nueva solución. Por otra parte, los métodos determinísticos no usan elementos aleatorios. A continuación se describen dos de los métodos que han sido trabajados en el grupo proponente de esta tesis, para ser aplicados a la síntesis de agrupaciones, dichos métodos han sido utilizados con sus bondades y limitaciones.

#### **II.3.6.1 Algoritmos genéticos**

Este método de optimización fue utilizado por [Panduro Mendoza, 2004] para la síntesis de una agrupación de antenas, con el objetivo de optimizar el

---

<sup>12</sup>Este término se usa para referirse a algoritmos que encuentran múltiples soluciones a simultáneamente.

lóbulo principal, controlando los pesos complejos de los elementos de la agrupación de antenas basado en los principios de selección y evolución natural de Darwin.

En el esquema clásico se hace evolucionar a la población en base a la presión que ejercen los operadores de cruce, selección y mutación. Un individuo o cromosoma determina una posible solución del problema bajo análisis. La población la constituyen un conjunto de individuos con los cuales estará trabajando el algoritmo, el número de individuos por lo general permanece constante aunque van cambiando a causa de los operadores.

De manera general, algoritmos genéticos requiere de una representación de las soluciones potenciales del problema (codificación), de inicializar una población aleatoriamente, de clasificar las soluciones en función de su aptitud a través de la función desempeño, de la configuración de los operadores que modificaran las aptitudes de las soluciones futuras y una inicialización de parámetros adecuada [Goldberg, 1989].

### **II.3.6.2 Optimización con Enjambre de Partículas**

Este método de optimización fue utilizado recientemente por [Arce Casas, 2008], para la síntesis de una agrupación de antenas, con el objetivo de optimizar el lóbulo principal, controlando los pesos complejos de los elementos de una Agrupación Lineal Uniforme de antenas.

Dicho método fue desarrollado por [Kennedy, 2001], inspirado en el comportamiento social que exhiben algunas comunidades de organismos en los sistemas de la naturaleza, tales como bandadas de aves, bancos de peces, enjambres de insectos.

Consiste en un algoritmo iterativo basado en un enjambre, en la que cada partícula, que representa una posible solución dentro del espacio de soluciones multidimensional, se dice que “sobrevuela” junto con el resto de sus congéneres el espacio de decisión en busca de una solución óptima, ajustando su posición de

acuerdo a su propia experiencia y la de sus vecinos. Se basa en la transmisión del suceso de cada individuo al resto del grupo, lo cual permite a los individuos satisfacer de la mejor manera sus requerimientos esenciales, tales como localización de alimento o lugar de cobijo.

Cada individuo del enjambre es referido como partícula o agente, todas las partículas del enjambre actúan acelerando hacia la mejor posición local y global, checando constantemente su posición actual que puede ser representada por lo general en el plano x-y aunque es posible extenderlo a cualquier espacio N-dimensional [Kennedy, 2001].

Por otra parte, esta tesis propone el algoritmo de abejas para ser aplicado a la síntesis electromagnética, mismo que será tratado en detalle en el capítulo III.

## **II.4 Conclusiones**

En este capítulo, se estudiaron los conceptos y fundamentos de una agrupación de antenas. Se hizo énfasis en el modelado y obtención del Factor de Agrupación de una Agrupación Lineal Uniforme, todo ello buscando obtener el diagrama de radiación deseado en la síntesis electromagnética.

Dentro del mismo contexto de agrupación de antenas se describieron técnicas de síntesis de agrupaciones, como lo son Schelkunoff y Chebyshev. Dichos métodos son de especial interés en este trabajo, ya que con Schelkunoff se comparan prestaciones con Algoritmo de Abejas, bajo el concepto de rechazo de interferentes, el cual es el objetivo principal de este trabajo. Por otra parte, con Chebyshev se establecen las características deseadas del diagrama de radiación final, por medio de un diagrama inicial generado a través de dicha técnica.

Otro aspecto importante en este trabajo, era realizar un estudio concreto de cómputo evolutivo, puesto que implica los fundamentos en los cuales se basa el Algoritmo de Abejas. Se estudiaron a groso modo algunos métodos de optimización metaheurístico, haciendo énfasis en aquellos basados en población

en el contexto de inteligencia de enjambre y que han sido aplicados a la síntesis de agrupación de antenas, dentro del grupo proponente de la tesis.

En el siguiente capítulo se profundizará en el estudio de los fundamentos, procedimiento algorítmico y conceptos del Algoritmo de Abejas. Así como, su aplicación a la síntesis electromagnética, en este caso en particular, a la síntesis del diagrama de radiación de una Agrupación Lineal Uniforme de Antenas, cuyo objetivo principal es el rechazo de interferentes.

## Capítulo III

---

# Algoritmo de Abejas Aplicado a la Síntesis de Una Agrupación Lineal Uniforme de Antenas

---

### III.1 Introducción

El cómputo evolutivo ha surgido como una alternativa confiable a las técnicas analíticas para resolver problemas de optimización electromagnética. Algoritmo de Abejas es una novedosa técnica de optimización basada en población sugerida por [Pham et al., 2006], la cual imita el comportamiento de las abejas en el proceso de búsqueda y recolección de alimento.

En este capítulo se describe puntualmente la génesis, procedimiento algorítmico y los parámetros del Algoritmo de Abejas. Así como el estudio de la función de evaluación y la configuración inicial de parámetros. Como piedra angular de este trabajo en esta sección se muestra y se describe la aplicación de esta novedosa técnica de optimización metaheurística a la síntesis del diagrama de radiación de una Agrupación Lineal Uniforme de Antenas. Lo anterior bajo el concepto de cancelación de interferentes principalmente y optimización del lóbulo principal en segundo término, esto con el fin de lograr la optimización multi-objetivo planteada en el objetivo de esta tesis.

## **III.2 Algoritmo de abejas**

El Algoritmo de Abejas (AA) es un algoritmo de optimización basado en población. El algoritmo imita el comportamiento de un enjambre de abejas mieleras durante el proceso de búsqueda y recolección de alimento. Como se mencionó antes, este algoritmo se encuentra dentro del grupo de la optimización basada en la inteligencia de enjambre [Pham et al., 2006].

Los resultados obtenidos por Pham para funciones multimodales, multidimensionales, muestra que el AA tiene una resaltable robustez, produciendo soluciones confiables. El algoritmo converge al máximo o mínimo global sin ser atrapado en un óptimo local.

### **III.2.1 Abejas en la naturaleza**

Un enjambre de abejas puede extenderse a través de largas distancias (más de 10 km) y en múltiples direcciones simultáneamente para explotar un gran número de fuentes de alimento. Una colonia prospera al desarrollar su búsqueda y recolección de alimento en las mejores regiones. Principalmente, los sitios de flores con mayor cantidad de polen y néctar, pueden ser recolectados con menor esfuerzo si son visitados por más abejas, y los sitios menos prometedores deberían ser visitados por menos abejas.

El proceso de búsqueda de alimento de un enjambre inicia enviando a las abejas exploradoras a buscar sitios de flores prometedores. Las abejas exploradoras se mueven aleatoriamente de sitio en sitio. Durante la temporada de cosecha se mantiene la exploración, un cierto porcentaje del enjambre se mantiene como exploradora [Seeley, 1996].

Cuando las abejas regresan a la colmena, aquellas que han encontrado un sitio de flores valorado por encima de un cierto umbral de calidad, depositan su

polen y néctar y se dirigen hacia el área de baile<sup>13</sup>, para después realizar una danza conocida como “danza del meneo”<sup>14</sup>, la cual se ilustra en la figura 7.



**Figura 7: “Danza del meneo” de las abejas mieleras.**

Esta danza misteriosa es esencial para la comunicación del enjambre, contiene tres parámetros importantes de información en relación al sitio de flores: la dirección en la cual puede ser encontrado, la distancia entre la colmena y el sitio, y la calidad. Esta información permite a la colonia enviar a sus abejas de manera precisa. Cada individuo conoce perfectamente acerca del entorno exterior a través de la danza del meneo. Esta danza permite a la colonia evaluar precisamente la calidad relativa de las fuentes de alimento alrededor de la colmena y la energía que necesitan para cosechar dichas fuentes [Camazine et al., 2003].

Después de que la danza termina, las abejas exploradoras regresan al sitio de flores con un número de abejas de la colonia. La colonia realiza un reclutamiento diferencial y determina el número de abejas que acompañan a la abeja exploradora dependiendo de la calidad relativa del sitio. Más abejas son enviadas a los sitios más prometedores y un número pequeño de abejas a los sitios donde se prevé no habrá una cosecha abundante. De esta manera la colonia puede cosechar el alimento de una manera rápida y eficiente. El reclutamiento

<sup>13</sup> Este término se usa para referirse al término en inglés *dance floor*.

<sup>14</sup> En este trabajo este término se usa para referirse al término en inglés *waggle dance*.

diferencial es uno de las más importantes adaptaciones de casi todos los insectos sociales, la habilidad para recolectar comida no podría ser tan exitosa si fuera desarrollada individualmente [Visscher, 2003].

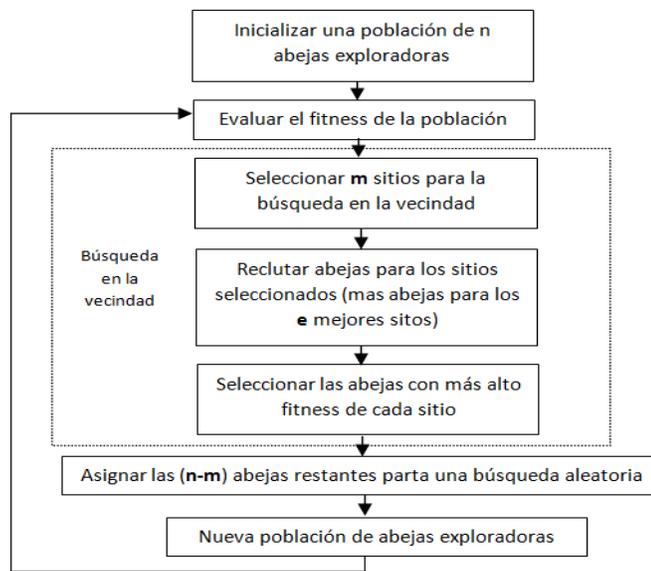
Mientras las abejas recolectan el alimento otorgado por un sitio, también monitorean el nivel de comida. Ésto es necesario para ser comunicado a la colonia durante la siguiente “danza del meneo”. Si el nivel de alimento es alto aun después de la recolección, esto se comunicado a la colmena y la colonia recluta más abejas para la siguiente visita a la fuente.

### III.2.2 Algoritmo propuesto de Abejas

En la versión básica el algoritmo desarrolla un tipo de búsqueda en la vecindad combinada con una búsqueda aleatoria. El AA es controlado por un número de parámetros externos, como son:

- a) Número de abejas exploradoras (**n**).
- b) Número de abejas élite (**e**).
- c) Sitios escogidos en los puntos visitados (**m**).
- d) Número de abejas empleadas para sitios visitados por abejas elite (**nep**).
- e) Número de abejas empleadas para otros sitios seleccionados (**nsp**).
- f) tamaño de los sitios (**ngh**).
- g) Criterio de término.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del Algoritmo básico de Abejas [Pham et al., 2006].



**Figura 8: Diagrama de flujo del Algoritmo de Abejas.**

Como se muestra en la figura 8, el algoritmo de optimización comienza ubicando aleatoriamente las  $n$  abejas exploradoras en el espacio de búsqueda. En el paso 2, se determinan los valores de aptitud de las abejas exploradoras, a través de la evaluación de la función de aptitud. En el paso 3, mientras no se cumpla el criterio de paro se forma una nueva población. Las abejas que tengan el valor más alto de aptitud son seleccionadas como “abejas élite” en el paso 4. En los pasos 5 y 6, el algoritmo realiza un reclutamiento diferencial, para realizar búsquedas alrededor de la vecindad de las abejas élite y de las otras abejas. Las abejas élite representan las soluciones más prometedoras.

En el paso 6, solo la abeja con el valor más alto de aptitud de cada sitio se selecciona para generar la siguiente población. Ésto es necesario para reducir el número de puntos a ser visitados. Con el fin de explorar nuevas posibles soluciones, el resto de las abejas son asignadas aleatoriamente alrededor del espacio de búsqueda en el paso 7. Estos pasos son repetidos hasta que el criterio de término sea satisfecho. En la figura 8 se muestra el pseudocódigo del algoritmo de abejas utilizado en este trabajo [Pham et al., 2006].

- 
1. Inicializar aleatoriamente la población con soluciones aleatorias.
  2. Calcular la aptitud de la población.
  3. Mientras el criterio de paro no sea logrado // formar la nueva población.
  4. Seleccionar sitios para la búsqueda en la vecindad.
  5. Reclutar abejas para los sitios seleccionados (más abejas para los mejores sitios) y evaluar su aptitud.
  6. Seleccionar la abeja con más aptitud de cada sitio.
  7. Asignar el resto de abejas para una búsqueda aleatoria y evaluar su aptitud.
  8. Termina el ciclo.
- 

**Figura 9: Pseudocódigo del algoritmo básico de abejas**

### **III.3 Modelado del Algoritmo de Abejas para su aplicación a la síntesis de una Agrupación Lineal Uniforme de antenas**

Como se mencionó, el objetivo de esta tesis es el empleo del AA para optimizar el diagrama de radiación en una Agrupación Lineal Uniforme que posea uno y múltiples nulos; así como, nulos sectoriales en direcciones preestablecidas, y simultáneamente optimice las características del lóbulo principal en términos de ancho de haz y máximo nivel de lóbulos laterales.

Para cumplir con la optimización multi-objetivo planteada, algorítmicamente, se debe encontrar un conjunto apropiado de amplitudes  $a_n$  de las corrientes de excitación de los elementos de la agrupación, y calcular el FA con la ecuación (9) presentada en el capítulo anterior, y así obtener las características deseadas en el diagrama de radiación. Es necesario enfatizar que en este trabajo se plantea un solo un control de amplitud y no de fase. Además, se considera un número par de elementos de antena distribuidos simétricamente alrededor del centro de la agrupación, tal y como se muestra en la figura 11, usando estas consideraciones con sus ventajas y limitaciones inherentes.

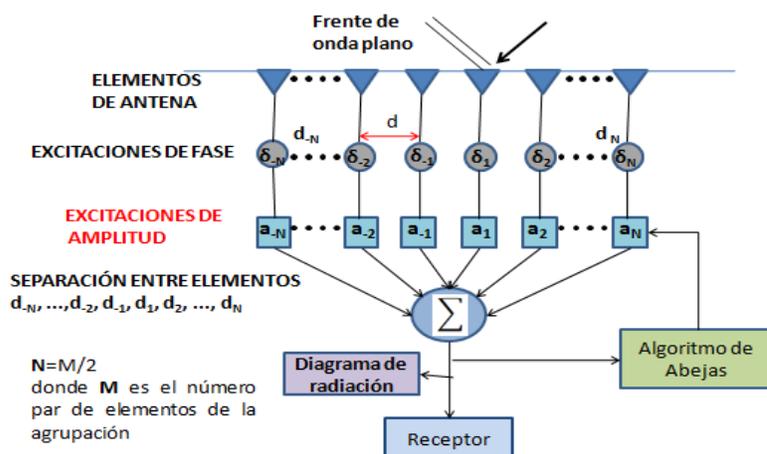


Figura 10: Esquema de control de sólo amplitud de una Agrupación Lineal Uniforme de antenas de  $(2N)$  elementos, a través de Algoritmo de Abejas.

### III.3.1 función costo

La función de evaluación representa el único nexo entre el método de optimización y el problema bajo análisis. Esta expresión es utilizada para medir la calidad del individuo del colectivo y condiciona en último término el potencial del algoritmo. En este trabajo cambiaremos el concepto de función de evaluación por **función costo**.

Un elevado porcentaje de los problemas de optimización electromagnética, en particular el propuesto en esta tesis, tiene múltiples objetivos que normalmente están en conflicto. Lo habitual para resolver este tipo de problemas es trasladar los requisitos a una función de evaluación, la cual se suele expresar como una combinación lineal de ellos.

Para controlar las características deseadas en el diagrama de radiación, se introducen ciertos pesos en la función costo para ponderar la influencia de cada factor en la optimización del FA. Dentro de un problema de optimización multi-objetivo éste se conoce como el método de la suma ponderada, el cual es usado en este trabajo para guiar la solución al óptimo global.

La optimización de los nulos en términos de profundidad de nulo<sup>15</sup> y ubicación se logra obteniendo el mínimo de la siguiente función:

$$f_{costo_{NDL}} = \sum_{\theta=-90^{\circ}}^{90^{\circ}} \beta |FA_o(\theta) - FA_d(\theta)| \quad (21)$$

Donde  $FA_o$  es el Factor de Agrupación obtenido al sustituir el conjunto de amplitudes  $a_n$  sugeridas como solución en la ecuación (9),  $FA_d$  es el diagrama de radiación deseado,  $\theta$  es el ángulo en modo transversal la agrupación y  $\beta$  es el peso introducido que controla la posición y profundidad de los nulos. Evidentemente, existen dos regiones en donde la función costo trabaja, en la posición del interferente ( $\theta_i$ ) y fuera de ella. Por ello, se tiene que:

$$FA_d = \begin{cases} \text{Diagrama inicial} & \text{para } \theta \neq \theta_i \\ \text{NDL deseado} & \text{para } \theta = \theta_i \end{cases}$$

Y

$$\beta = \begin{cases} \beta_1 & \text{para } \theta = \theta_i \\ \beta_2 & \text{para } \theta \neq \theta_i \end{cases}$$

El diagrama inicial es el diagrama de radiación obtenido por el método de Chebyshev, el cual funciona como una máscara que permite minimizar el error entre el FA obtenido y el FA deseado.

El máximo nivel de lóbulos laterales preestablecido se controla solo trabajando con el diagrama de radiación obtenido por AA minimizando la siguiente función:

$$f_{costo_{SLL}} = \sum_{\theta=-90^{\circ}}^{90^{\circ}} \alpha(\theta) \quad (22)$$

Donde  $\alpha$  es el peso que controla directamente SLL<sup>16</sup>, y

<sup>15</sup> Este término es usado para referirse al término en inglés *Null Depth Level* (NDL).

<sup>16</sup> Este término se usa para referirse al término en inglés *Side Lobe level* (SLL)

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{SLL} & \text{para } SLL_o > SLL \text{ preestablecido} \\ \alpha_{SLL0} & \text{para } SLL_o < SLL \text{ preestablecido} \end{cases}$$

Donde  $SLL_o$  es el nivel de lóbulos laterales obtenido por el algoritmo de abejas y el SLL preestablecido está referido al máximo nivel de lóbulos laterales deseado, el cual se maneja como una variable.

Para optimizar el tercer objetivo en relación al mínimo ancho del haz principal, considerando el lóbulo principal a la aparición del primer nulo<sup>17</sup>, se introduce la siguiente función costo y se plantea encontrar el mínimo de la misma.

$$f_{costo_{BWFN}} = \zeta |BWFN_o - BWFN_d| \quad (23)$$

Donde  $\zeta$  es el peso introducido para controlar el mínimo ancho del lóbulo principal,  $BWFN_o$  es el ancho del haz del diagrama obtenido con algoritmo de abejas y  $BWFN_d$  es el ancho del lóbulo del diagrama inicial. A diferencia de las dos primeras funciones costo que son empleadas punto a punto para  $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ , esta última funciona en la suma total del FA, donde es posible cuantificar el ancho del haz del lóbulo principal.

Hasta ahora se ha introducido de forma independiente una función costo para controlar los múltiples objetivos planteados, pero con el método de la suma ponderada es posible expresar todos estos requerimientos como una combinación lineal de las ecuaciones (21), (22) y (23). Finalmente, para optimizar el diagrama de radiación con las características deseadas es necesario encontrar el mínimo de la siguiente función costo

$$f_{costo} = \zeta |BWFN_o - BWFN_d| + \sum_{\theta=-90^\circ}^{90^\circ} [\beta |FA_o(\theta) - FA_d(\theta)| + \alpha(\theta)] \quad (24)$$

---

<sup>17</sup> Este término es usado para referirse al término en inglés *Band Wide First Null* (BWFN)

Para guiar las soluciones potenciales que nos permitan obtener las características deseadas del diagrama de radiación, se deben seleccionar los valores de los pesos, de tal forma que se minimice la función costo.

### **III.3.2 Selección inicial de parámetros**

La aplicación de cualquier algoritmo metaheurístico a un problema, está supeditada al ajuste inicial de parámetros del algoritmo para encontrar aquella configuración, que ofrece la mejor relación entre precisión y costo computacional.

La selección de parámetros o esquemas óptimos en algoritmos metaheurísticos puede hacerse por las siguientes alternativas: recurriendo a alguna de las configuraciones típicas en la literatura, realizando un estudio paramétrico o una combinación de ambos. En este trabajo se hizo una combinación de ambas. Esto permite validar el código fuente y descartar a priori aquellas configuraciones que resultan con un bajo rendimiento [Arce Casas, 2008].

En un principio, la configuración de parámetros se hizo tomando como referencia la configuración mostrada en [Guney et al, 2007] y una inicialización de aproximación sugerida del estudio de otras técnicas de optimización, basadas en población.

La adecuación de los parámetros óptimos, referida a aquella configuración que otorga mejores prestaciones en términos de tiempo de convergencia y optimización del diagrama de radiación deseado, se realizó haciendo un estudio paramétrico a través de múltiples simulaciones para la obtención del *diagrama de radiación inicial*. Se trabajó bajo esta restricción puesto que el diagrama es la máscara de restricciones establecidas para el diagrama de radiación deseado, y por ello, resulta trascendental para el funcionamiento óptimo del algoritmo; en los distintos escenarios de simulación, trabajar bajo los parámetros con los cuales se obtienen mejores prestaciones del diagrama inicial.

En la tabla 1 se muestra los parámetros óptimos del algoritmo para trabajar los escenarios de simulación propuestos.

**Tabla 1. Parámetros de configuración inicial para Algoritmo de Abejas.**

PARAMETRO	VALOR
n	500
e	5
m	10
nep	30
nsp	30
ngh	0.01
Criterio de paro	Num. de iteraciones

### III.4 Conclusiones

En este capítulo se describieron las bases y fundamentos del Algoritmo de Abejas, para lograr precisar el entendimiento de la herramienta de optimización multi-objetivo planteada en el objetivo de esta tesis. Se hizo énfasis en la función costo y la configuración inicial de parámetros, dos partes sumamente importantes en el desarrollo de algoritmos de optimización basados en población.

Por otra parte, se desarrolló el modelado del sistema del Algoritmo de Abejas para su aplicación a la síntesis del diagrama de radiación de una Agrupación Lineal Uniforme de antenas. Lo anterior representa la piedra angular de este trabajo.

Una vez modelado el sistema, en el siguiente capítulo se muestran una serie de simulaciones con el correspondiente análisis numérico, para cumplir cualitativa y cuantitativamente con el objetivo de la tesis.

## Capítulo IV

---

### Simulaciones y Análisis Numérico

---

#### IV.1 introducción

En este capítulo se presentan una serie de simulaciones, a través de las cuales se busca demostrar que el objetivo de la tesis ha sido alcanzado en términos de precisión, flexibilidad y adaptación a la optimización electromagnética multi-objetivo de Algoritmo de Abejas. Lo anterior se logra al sintetizar diagramas de radiación con uno, múltiples y nulos de banda ancha, y que a la vez cumplan los requerimientos de mínimo ancho del haz principal y máximo nivel de lóbulos secundarios. Además, seguido de cada simulación se hace un análisis numérico de los resultados mostrados, y se analiza el tiempo de convergencia que el Algoritmo de Abejas requiere para alcanzar el objetivo bajo análisis.

Otro apartado importante en el objetivo de la tesis es, comparar las prestaciones otorgadas por el Algoritmo de Abejas con el método de Schelkunff y el método de Chebyshev. Lo anterior bajo el concepto de generación de nulos y optimización del lóbulo principal, respectivamente. Para ello se presentan en este capítulo una serie de simulaciones que cumplen con este objetivo en particular.

Por otra parte, se encontró un nicho de oportunidad en cuanto al análisis del tiempo de convergencia de tres técnicas de optimización metaheurística, basadas en población como lo son Algoritmo de Abejas, Optimización con Enjambre de Partículas [Arce Casas, 2008] y Algoritmos Genéticos [Panduro

Mendoza, 2004], aplicadas éstas a la síntesis de una Agrupación Lineal Uniforme. Debido a ello se presenta un análisis comparativo de los tres métodos, para lo cual fue necesario considerar las mismas restricciones de simulación en los tres casos.

Todas las simulaciones realizadas y presentadas en este trabajo, fueron desarrolladas bajo la plataforma de simulación y equipo de cómputo con las siguientes características:

- CPU: AMD Turion (tm) 64 X2 2.00 GHz.
- Memoria (RAM): 3 GB.
- Sistema operativo: Windows Vista
- Plataforma de simulación: MATLAB Ver. 7.6.0.324 (2008a)

## **IV.2 Consideraciones de simulación**

Las consideraciones generales de simulación tomadas en el desarrollo de este trabajo, y utilizadas en todas las estadísticas generadas se muestran a continuación:

- Cada elemento de antena de la agrupación es un radiador isotrópico.
- Las amplitudes de excitación de cada elemento de antena se consideran no uniformes. Este trabajo plantea un control sólo de amplitud de los elementos de antena de la agrupación.
- Se emplea una Agrupación Lineal Uniforme de Antenas en campo lejano, donde arriba un frente de onda plano.
- Se trabaja en banda estrecha, lo cual implica que las señales que llegan a la agrupación difieren elemento a elemento, ésto se debe a las distancias que la señal debe propagarse, dichas diferencias se manifiestan en variaciones de fase de la señal portadora.
- La respuesta total del sistema es la suma fasorial de las contribuciones individuales de los elementos de antena de la agrupación.

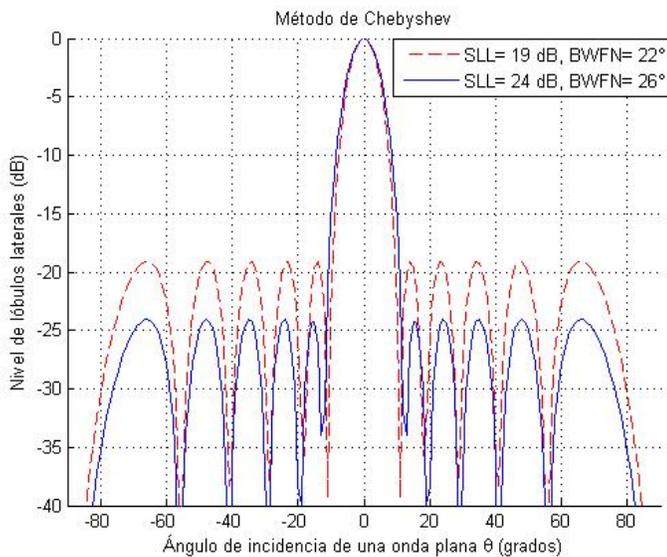
- Se considera un número par de elementos de antena de la agrupación, el cual varía dependiendo el escenario de simulación propuesto.
- El espaciamiento constante entre los elementos de antena en todas las simulaciones realizadas es de  $\lambda/2$ .

### **IV.3 Aplicación del método de Chebyshev a la síntesis de una Agrupación Lineal de Antenas**

Como se mencionó en el capítulo anterior, el método de Chebyshev es una técnica aplicada a la síntesis de agrupación de antenas, cuyo objetivo es obtener una relación óptima entre el ancho del lóbulo principal del diagrama de radiación y el máximo nivel de lóbulos laterales. No se puede mejorar alguno de estos dos parámetros de diseño sin degradar el otro.

El método de Chebyshev proporciona a la salida un conjunto óptimo de amplitudes, el lóbulo principal se encuentra dirigido a  $0^\circ$ , es decir, se encuentra en modo transversal (normal) a la agrupación. En la figura 11 se muestran los resultados obtenidos de la aplicación del método de Chebyshev a la síntesis de una agrupación de antenas, considerando:

- Una agrupación lineal uniforme de 12 elementos de antena (Se usó este número de elementos, ya que se obtiene un diagrama de radiación donde se aprecia adecuadamente el resultado del algoritmo)
- Separación entre elementos de  $\lambda/2$  (Con esta separación se cumple con el teorema de Nyquist).
- SLL deseado de 19 dB y 24 dB, respectivamente (Estos valores se toman con el propósito de cumplir con el objetivo planteado en esta sección).



**Figura 11: Diagrama de radiación obtenido por el método de Chebyshev para una ALU de 12 elementos, con un nivel de lóbulos laterales deseado de 19 dB y 24 dB.**

En la figura 11, así como en todos los gráficos presentados en este capítulo, se muestra una representación cartesiana del diagrama de radiación de una ALU, el cual cumple con un caso particular de restricciones. En el eje horizontal se muestra el ángulo de incidencia de una onda plana dentro del margen de visibilidad de la agrupación de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  y en el eje vertical se tiene el nivel de potencia del diagrama de radiación en dB.

En la figura 11 se muestran dos diagramas de radiación superpuestos, ambos obtenidos por el método de Chebyshev. El objetivo es mostrar cómo este método es capaz de sintetizar diagramas de radiación con niveles de lóbulos laterales preestablecidos, con ello se muestra la flexibilidad y adaptabilidad de dicho parámetro como una variable de diseño.

La línea discontinua muestra el diagrama obtenido para un nivel de lóbulos laterales de -19 dB, para lo cual se obtiene ancho de haz del lóbulo principal de  $22^\circ$ ; y para el caso de la línea continua se tiene un SLL de 24 dB y se obtiene un BWFN de  $26^\circ$ . Es evidente el compromiso que existe entre estos dos parámetros en conflicto, no se pueden maximizar las prestaciones de uno, sin afectar inversamente al otro.

El método de Chebyshev es adecuado para sintetizar un diagrama de radiación, cuyo máximo nivel deseado de lóbulos laterales se desea controlar como un parámetro de diseño. Dichas prestaciones se usan en este trabajo para establecer una máscara de restricciones del diagrama de radiación deseado. Lo anterior se describe puntualmente en la siguiente sección.

#### **IV.4 Diagrama inicial de restricciones (Chebyshev) y puesta a punto del algoritmo de abejas.**

El objetivo principal de esta tesis plantea sintetizar un diagrama de radiación que posea nulos con un nivel de profundidad aceptable en direcciones preestablecidas, lo cual permite la cancelación de interferentes en relación a dichas direcciones. Por otra parte, un objetivo secundario es mantener las prestaciones óptimas del lóbulo principal en términos de ancho de haz y máximo nivel de lóbulos laterales, sin considerar dirigibilidad del haz principal. Debido a que la síntesis de Chebyshev otorga las prestaciones para cumplir con el objetivo secundario, en este apartado se plantea preestablecer las restricciones iniciales de diseño en términos de SLL, con un diagrama de radiación inicial obtenido por la síntesis de Chebyshev.

Si se establecen las restricciones de diseño con un diagrama inicial (Chebyshev), el diagrama final obtenido presentará características muy cercanas al diagrama inicial y con una buena manipulación de la función costo, también cumplirá con la cancelación de interferentes. Es decir, la síntesis de Chebyshev sirve como una máscara de restricciones, la cual permite que el algoritmo acote su desempeño a la obtención de un diagrama de radiación cercano al propuesto. Conviene enfatizar que el diagrama de radiación inicial es obtenido al manipular un conjunto óptimo de amplitudes de los elementos de antena; es decir, se tiene un control de sólo amplitud, una de las razones por las cuales es factible proponer un control de este tipo en este trabajo.

Al tener ya una solución óptima del conjunto de amplitudes a un problema de diseño sencillo, una parte importante, y que supedita el desempeño óptimo del algoritmo, es la configuración inicial de parámetros, lo cual se abordó ampliamente en el capítulo III. El obtener el ajuste ideal de cada parámetro es trascendental en la obtención final de resultados, ésto implica *poner a punto al algoritmo*. Para dicho proceso, como se mencionó antes, se considera como escenario de simulación la obtención del diagrama inicial.

Para realizar la puesta a punto del algoritmo se planteó la síntesis del diagrama inicial, el cual cumple con un SLL de 30 dB. Además, se considera una ALU de 20 elementos de antena, ya que, trabajar con este número de elementos, con un espaciamento entre elementos es de  $\lambda/2$  y una frecuencia de 1900 MHz, implica que la dimensión física de la agrupación sea de 1.5 metros aproximadamente, lo cual presenta una situación viable en términos de implementación. En la figura 12 se muestra el diagrama de radiación inicial planteado, el cual se obtuvo con la configuración de parámetros del algoritmos mostrados en la tabla 1 y que es el propuesto en las simulaciones mostradas en las secciones IV.4 y IV.5 de este capítulo.

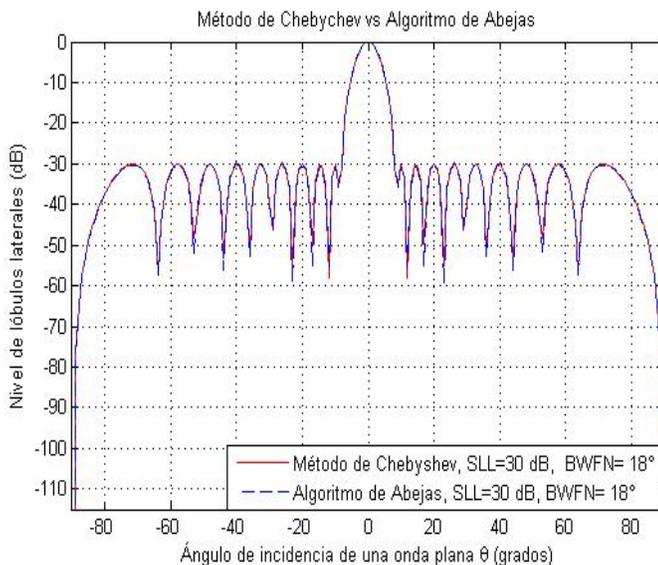
Por otra parte, la puesta a punto del algoritmo también permitió establecer los valores de los pesos de la función costo que controlan cada uno de los objetivos y los cuales se muestran a continuación:

$$FA_d = \begin{cases} \text{Diagrama inicial para } \theta \neq \theta_i \\ \text{NDL en dB para } \theta = \theta_i \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} 50 \text{ para } \theta = \theta_i \\ 1 \text{ para } \theta \neq \theta_i \end{cases}$$

$$\alpha = \begin{cases} 5 \text{ para } SLL_o > -30dB \\ 0 \text{ para } SLL_o < -30dB \end{cases}$$

$$\zeta = 10$$



**Figura 12: Diagrama de radiación inicial (Chebyshev) de una ALU de 20 elementos de antena con un SLL de 30dB.**

El objetivo de generar el diagrama de la figura 12 es cumplir con dos objetivos, el primero es mostrar como a través de la síntesis de Chebyshev se pueden establecer las restricciones planteadas para el diagrama de radiación inicial en términos de SLL. El segundo es mostrar como Algoritmo de Abejas sintetiza un diagrama de radiación final (línea continua) cercano al diagrama de radiación inicial (línea discontinua), lo cual garantiza que las restricciones iniciales son fácilmente alcanzables por AA. Se observa como analítica y metaheurísticamente se obtiene una relación entre SLL y BWFN de 30 dB y 18°, respectivamente.

Un parámetro importante de análisis cuando se trabaja con optimización evolutiva es el costo computacional, el cual se ve reflejado en el tiempo de convergencia del algoritmo para alcanzar los objetivos planteados. Para obtener el diagrama de radiación inicial, el cual es el escenario de simulación más sencillo, se requirió de un tiempo de **10.73** segundos, tiempo generado en 20 iteraciones. Se puede inferir que en la medida que aumenten las restricciones planteadas se requerirá un mayor tiempo de convergencia. Es importante obtener tiempos de convergencia relativamente bajos, para este caso particular un promedio de 10

segundos, ya que el objetivo de la optimización evolutiva es encontrar una solución óptima a un bajo costo computacional.

## IV.5 Síntesis de nulos

Como se mencionó, el objetivo principal de este trabajo es la cancelación de interferentes, lo cual se logra sintetizando nulos en direcciones preestablecidas en el diagrama de radiación. Para demostrar que el objetivo se cumple en dichos términos, a continuación se muestran una serie de simulaciones proponiendo los siguientes 3 casos particulares de síntesis:

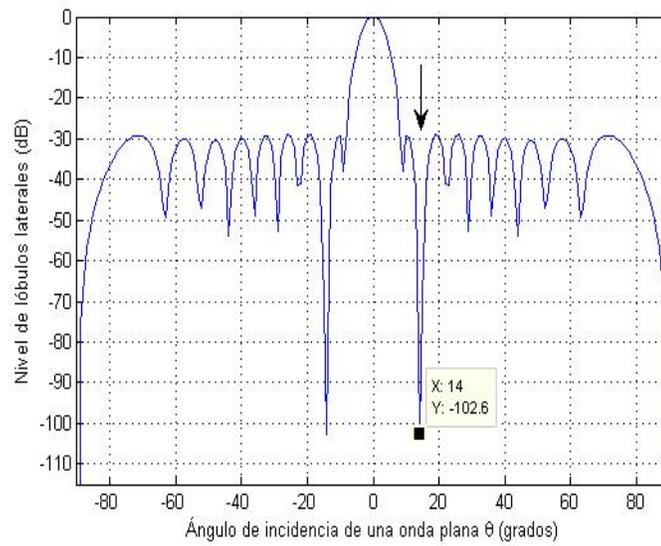
- Un nulo
- Múltiples nulos
- Nulo sectorial<sup>18</sup>  $\Delta(\theta)$

### IV.5.1 Un nulo

Este caso representa el escenario más sencillo en cuanto a la síntesis de nulos, el objetivo es sintetizar un nulo en dirección  $\theta_i$ , referida ésta a la posición del interferente. En este caso en particular para demostrar la precisión de AA se escoge la posición de  $\theta_i$  en el pico del segundo lóbulo lateral, es decir  $\theta_i = 14^\circ$ . En la figura 13 se muestra el diagrama de radiación obtenido a través de Algoritmo de Abejas, generado por el control de sólo amplitud de los elementos de antena y que posee un nulo ubicado en  $14^\circ$ .

---

<sup>18</sup> Este término se usa para referirse al término en inglés Broad Band Null.



**Figura 13: Diagrama de radiación de una ALU de 20 elementos de antenas con SLL de 30dB y con un nulo ubicado en  $\theta_i = 14^\circ$ .**

En la figura 13 se observa el diagrama de radiación obtenido por AA, el cual conserva el nivel de lóbulos laterales en 30 dB y el mínimo del ancho del lóbulo principal de  $18^\circ$  del diagrama inicial, en base a lo planteado. Evidentemente existen ligeras diferencias, esto se debe al compromiso de sintetizar un nulo en la posición asignada. Sin embargo se muestra claramente como el nulo es ubicado precisamente en la posición asignada  $\theta_i = 14^\circ$ .

En la sección III.3.1 se mencionó que el nivel de profundidad del nulo es una variable de diseño que puede ser controlada. En este caso particular se preestableció en la función costo un NDL deseado de -100dB. El diagrama de radiación obtenido cumple con NDL de -102 dB, el cual es muy cercano al deseado. Dicho nivel de potencia obtenida garantiza asignar el mínimo nivel de potencia en la dirección del interferente, con ello se asegura cancelar totalmente la interferencia de dicha fuente.

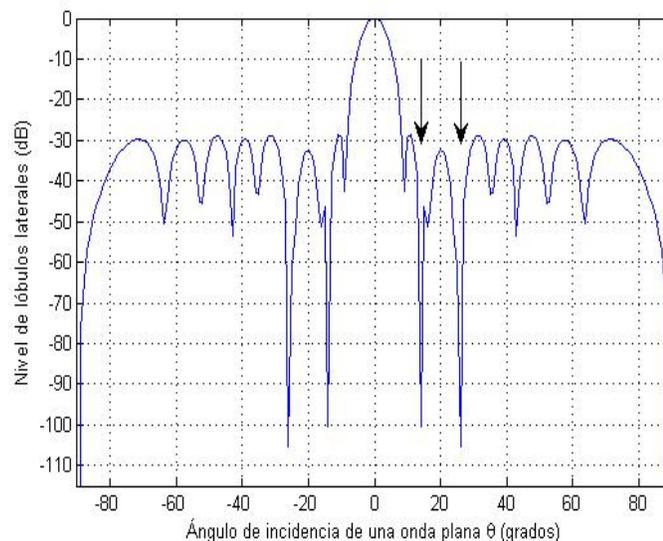
Bajo estas restricciones de simulación se analizaron varios casos en los cuales se varió la posición del interferente, con ello se encontró que el intervalo espacial de síntesis de nulos se encuentra en  $9^\circ < \theta_i < 70^\circ$  y  $-70^\circ < \theta_i < -9^\circ$ , donde  $\theta_i$  es la posición del interferente. Si se considera que el margen de

visibilidad de una ALU es de  $-60^\circ$  a  $60^\circ$ , las prestaciones otorgadas por AA bajo esas consideraciones son bastante aceptables, y además extrapolables a escenarios de simulación que consideren múltiples nulos o nulos sectoriales.

Para obtener el diagrama de radiación mostrado en la figura 13 se requirió un tiempo de cómputo de 94.45 segundos, el cual fue calculado en un promedio de 190 iteraciones. Este resultado confirma la inferencia de la sección anterior, que a medida que aumenta la complejidad de los requerimientos aumenta el costo computacional y con ello se requiere mayor tiempo de convergencia.

### IV.5.2 Múltiples nulos

Para demostrar la flexibilidad del Algoritmo de Abejas, en esta sección se muestra la cancelación de múltiples interferentes. Para lograr lo anterior es necesario sintetizar diagramas de radiación con múltiples nulos y que además cumplan con una relación óptima entre el ancho de haz y el nivel de lóbulos laterales. En la figura 14 se muestra el diagrama de radiación obtenido por AA, para la cancelación de dos interferente ubicados en  $\theta_1 = 14^\circ$  y  $\theta_2 = 16^\circ$ .

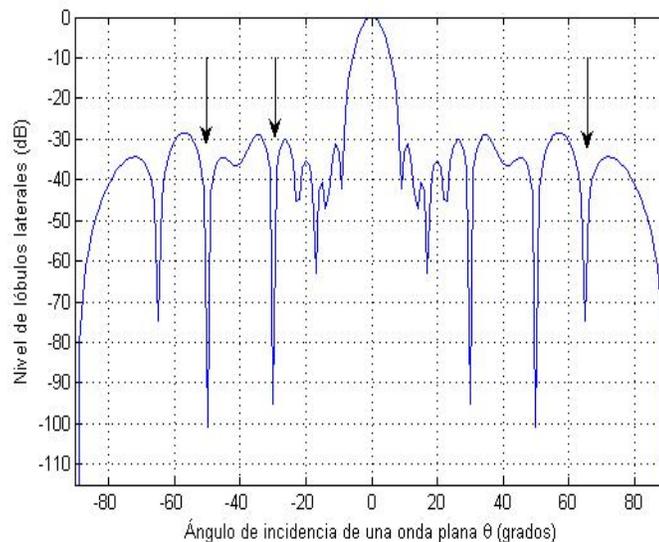


**Figura 14: Diagrama de radiación de una ALU de 20 elementos de antenas con SLL de 30dB y con dos nulos ubicados en  $\theta_1 = 14^\circ$  y  $\theta_2 = 16^\circ$ .**

Se muestra con la figura 14 la flexibilidad y precisión de AA para sintetizar dos nulos simultáneamente y además obtener un nivel de aislamiento de lóbulos laterales de 30 dB. El ancho de haz obtenido es de  $18^\circ$ , éste es un resultado bastante adecuado para el problema planteado, obtener un ancho de haz estrecho implica minimizar el efecto de desvanecimiento por multitrayectoria, tener un haz más directivo que por consecuencia reduzca el nivel de potencia necesario para cubrir mayores distancias. Por ello la importancia de obtener un ancho de haz principal lo más estrecho posible.

Es evidente la simetría del diagrama de radiación en referencia al centro de la agrupación de todos los diagramas presentados en este capítulo. Esto se debe a que en la forma de calcular el FA de la agrupación en la ecuación (8), se utiliza esta propiedad de simetría. Con ello se logra reducir a la mitad el tiempo de procesamiento, y el número de atenuadores variables usados para el control de solo amplitud de los elementos de antena de la agrupación. Lo anterior es otra de las razones por lo cual se eligió un control de sólo amplitud en este trabajo.

Dentro del mismo escenario de síntesis de múltiples nulos, en la figura 15 se muestra el diagrama de radiación obtenido al cancelar tres interferentes ubicados en  $\theta_1 = -50^\circ$ ,  $\theta_2 = -30^\circ$  y  $\theta_3 = 65^\circ$



**Figura 15: Diagrama de radiación con SLL 30dB, para una ALU de 20 elementos de antena con tres nulos ubicados en  $\theta_1 = -50^\circ$ ,  $\theta_2 = -30^\circ$  y  $\theta_3 = 65^\circ$ .**

En ambos diagramas de síntesis de múltiples nulos se planteó un NDL deseado de -100 dB. Se obtuvieron profundidades de entre -100 dB y -105 para dos nulos, y de -75 dB y -100 dB para 3 nulos. Evidentemente existe una diferencia con el NDL obtenido, ésto es debido al compromiso existente entre la ubicación y el número de interferentes con los otros objetivos en conflicto, como los son el ancho de haz y el nivel de lóbulos laterales. Sin embargo las prestaciones otorgadas del algoritmo en términos del nivel de profundidad de los nulos son bastante aceptables

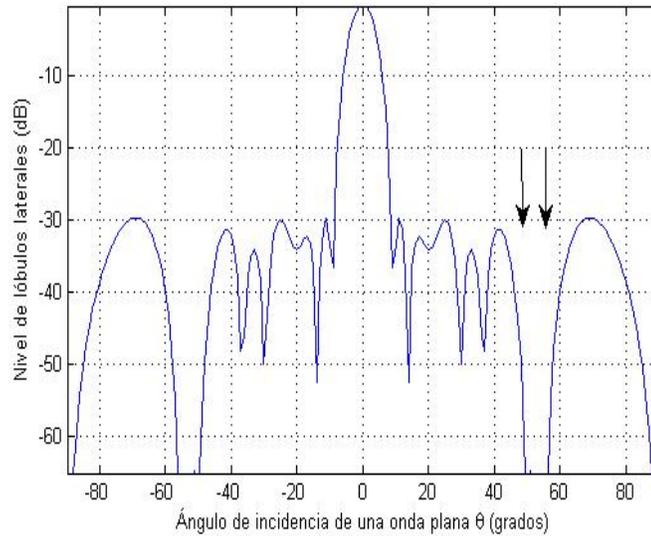
En teoría el número de interferentes que se pueden cancelar es de  $N - 1$ , donde  $N$  es la mitad del número de elementos de antena de la agrupación. Los estudios realizados en este contexto, demostraron que a medida que se aumenta el número de interferentes, existe una mayor diferencia en las características del diagrama de radiación respecto al diagrama inicial. Lo anterior se debe al compromiso existente entre los objetivos en conflicto de la optimización multi-objetivo.

El tiempo de cómputo registrado al sintetizar los diagramas con múltiples nulos, comprueba nuevamente la inferencia hecha en la sección anterior respecto al incremento del costo computacional en la medida del aumento de restricciones planteadas. Para sintetizar el diagrama de la figura 14 se requirió de un tiempo de 118.62 segundos y el diagrama de la figura 15 se obtuvo en un tiempo de 142.14 segundos. Otro parámetro importante a analizar es el número de iteraciones requeridas, ya que este es el criterio de paro usado en este trabajo, para el primer caso se requirieron 240 iteraciones y para el segundo caso un total de 290 iteraciones.

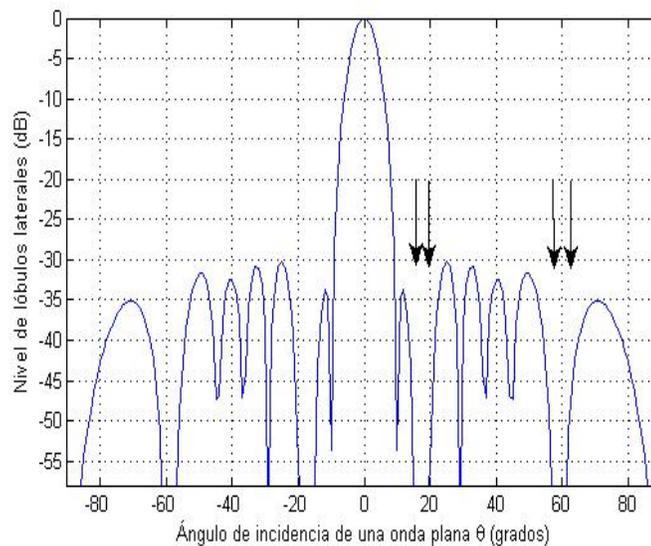
### **IV.5.3 Nulos sectoriales**

Se sabe que la dirección de arribo de la señal interferente puede variar ligeramente con el tiempo, puede no ser conocida exactamente, además, pueden existir varias fuentes interferentes concentradas en una sección angular. Por ello

se hace necesario sintetizar diagramas de radiación con nulos sectoriales con un nulo de banda ancha con un determinado  $\Delta(\theta)$ . En las figuras 16 y 17 se muestran los diagramas de radiación obtenidos, para la síntesis de nulos sectoriales.



**Figura 16: Diagrama de radiación con SLL 30 dB, para una ALU de 20 elementos de antena con un nulo sectorial de 7° centrado en  $\theta_i = 53^\circ$ .**



**Figura 17: Diagrama de radiación con SLL 30dB, para una ALU de 20 elementos de antena con dos nulos sectoriales de 5° centrados en  $\theta_1 = 17^\circ$  y  $\theta_2 = 59^\circ$ .**

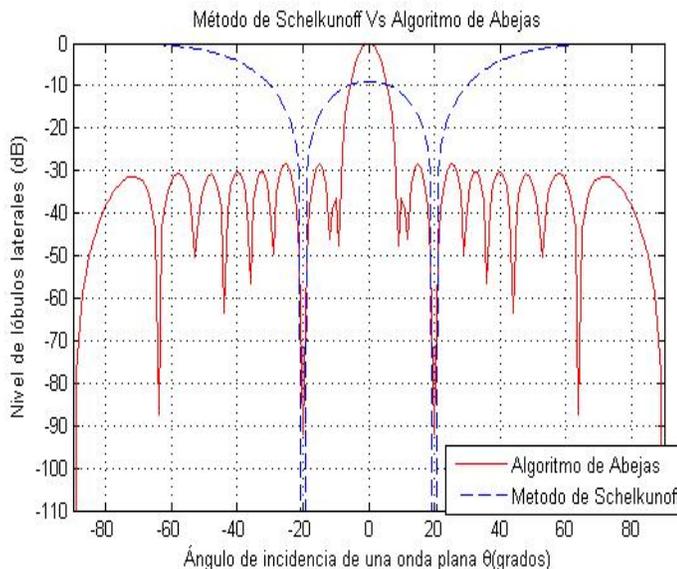
Los diagramas de las figuras 16 y 17 fueron obtenidos por Algoritmo de Abejas, los cuales presentan características muy cercanas al diagrama inicial en

términos del máximo nivel de lóbulos laterales de 30 dB y ancho de haz de  $18^\circ$ . Además cumplen con la síntesis de nulos de un ancho de banda  $\Delta(\theta)$  con un nivel de profundidad cercano al preestablecido. Para el primer caso se obtiene un diagrama de radiación con un nulo sectorial de  $7^\circ$  centrado en  $53^\circ$  con un NDL de -65 dB, el cual cumple con los requerimientos planteados. En el segundo caso se obtuvo un diagrama de radiación con dos nulos de banda ancha con un  $\Delta(\theta)$  de  $5^\circ$  y un NDL de -60 dB,

Se pudiese inferir que en cuanto al tiempo de cómputo, el cumplir con las restricciones planteadas al sintetizar nulos sectoriales demandaría un mayor tiempo de convergencia. Pero basado en los resultados obtenidos se demuestra lo contrario. Para sintetizar el diagrama de la figura 17, se requirió un promedio de 100 iteraciones con un tiempo de 49.21 segundos. Por su parte el diagrama de la figura 18 se obtuvo en 71.72 segundos en 150 iteraciones.

#### **IV.6 Comparativa de Algoritmo de Abejas con Schelkunoff**

En esta sección se introduce un análisis comparativo bajo el concepto de cancelación de interferentes, entre una técnica de optimización analítica como lo es Schelkunoff y una técnica de optimización metaheurística como Algoritmo de Abejas. Lo anterior ayuda a cumplir con una parte importante del objetivo de esta tesis. En la figura 18 se muestran los diagramas de radiación obtenidos por la técnica de Skelkunoff y Algoritmo de Abejas para la cancelación de un interferente ubicado en  $\theta_i = 20^\circ$ .



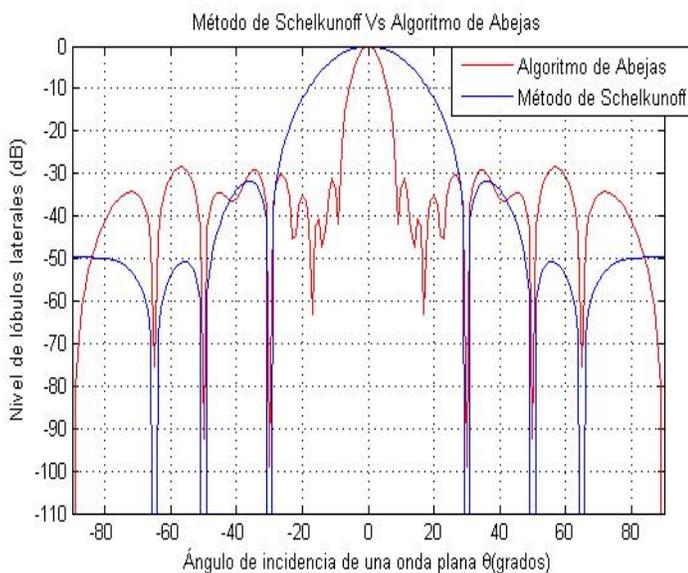
**Figura 18: Comparativa del diagrama de radiación generado por el método de Schelkunoff y Algoritmo de Abejas, cancelando un interferente en  $\theta_i = 20^\circ$ .**

En la figura 18 se muestra el diagrama de radiación obtenido por el método de Schelkunoff (línea discontinua) y el Algoritmo de Abejas (línea continua), ambos generados con el objetivo de cancelar un interferente en  $\theta_1 = 20^\circ$ . Se puede observar que ambos métodos sintetizan con precisión un nulo en el diagrama de radiación en la dirección preestablecida, además se asigna un nivel de profundidad bastante adecuado, en ambos casos menor a -90 dB. Por su parte el diagrama obtenido a través de AA cumple con un SLL de 30 dB y un ancho de haz principal de  $18^\circ$ .

Si se considera sólo la cancelación de interferentes sin tomar en cuenta la optimización del lóbulo principal, el método de Schelkunoff otorga las mismas prestaciones que el Algoritmo de Abejas. Pero aunado a la cancelación de interferentes, el objetivo de la tesis plantea en segundo término optimizar el haz principal en términos de ancho y máximo nivel de lóbulos laterales. Bajo las consideraciones anteriores es evidente que AA otorga las prestaciones adecuadas para cumplir la optimización multi-objetivo planteada. Por su parte, el método de Schelkunoff no es una opción para ser considerado viable al escenario de restricciones formulado, ya que desde su génesis este método no considera la

conservación de un lóbulo principal y mucho menos las características intrínsecas en él.

Una de las razones porque Schelkunoff no mantiene consideraciones del lóbulo principal es porque el número de elementos de antena se calcula en base al número de interferentes, esto origina un diagrama de radiación que inclina su objetivo a generar nulos en la dirección preestablecida sin tener un control apropiado sobre el lóbulo principal. Todas las consideraciones anteriores pueden ser trasladadas a escenarios con múltiples nulos o nulos sectoriales. En la figura 19 se muestra la comparativa entre Schelkunoff y AA cuando el escenario propuesto es la cancelación de tres interferentes.



**Figura 19: Comparativa del diagrama de radiación generado por el método de Schelkunoff y Algoritmo de Abejas, cancelando tres interferentes en  $\theta_1 = -50^\circ$ ,  $\theta_2 = -30^\circ$  y  $\theta_3 = 65^\circ$**

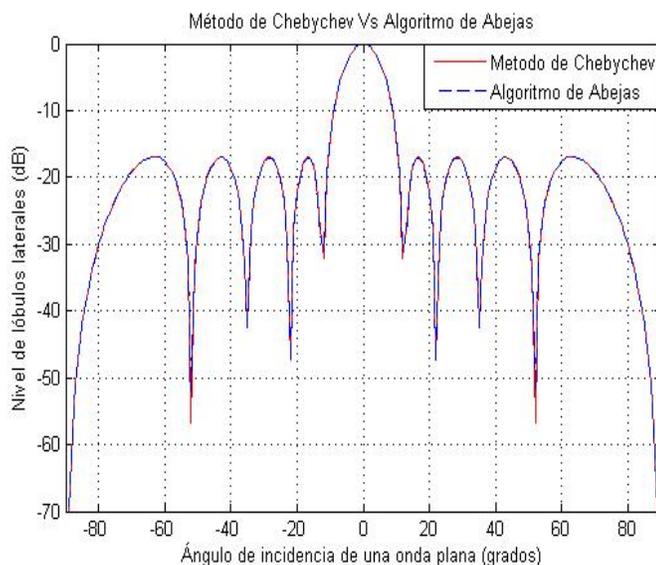
En el caso particular de la figura 19, se generó un diagrama a través de AA (línea continua) con 3 nulos en las posiciones de los interferentes  $\theta_1 = -50^\circ$ ,  $\theta_2 = -30^\circ$  y  $\theta_3 = 65^\circ$  con un NDL entre -70 dB y -100 dB; con un SLL de 30 dB y un BWFN de  $18^\circ$ . Con la línea discontinua se muestra el diagrama obtenido a través del método de Schelkunoff, es notorio que igual se cumple con la generación de nulos en las direcciones preestablecidas, pero de ninguna manera se obtienen prestaciones del diagrama en términos de optimización del haz principal.

Aunque el método de Schelkunoff es un método propicio para cancelar interferentes sin considerar el control del lóbulo principal, no es posible que este método pueda ser utilizado en una aplicación real, ya que en ella se requiere optimizar atender a un usuario y cancelar interferentes, ambos objetivos con buenas prestaciones. Otro punto importante es que no es posible comparar una técnica analítica y una técnica evolutiva en cuanto al tiempo de convergencia, es evidente que esta última requiere mayor tiempo de convergencia.

#### **IV.7 Comparativa de Algoritmo de Abejas con AG y PSO**

En esta sección se introduce una comparativa en términos del tiempo de convergencia de AA con Algoritmos Genéticos y Optimización con Enjambre de Partículas. Para realizar dicha comparativa fue necesario que los tres métodos de optimización restringieran su desempeño al mismo escenario de simulación.

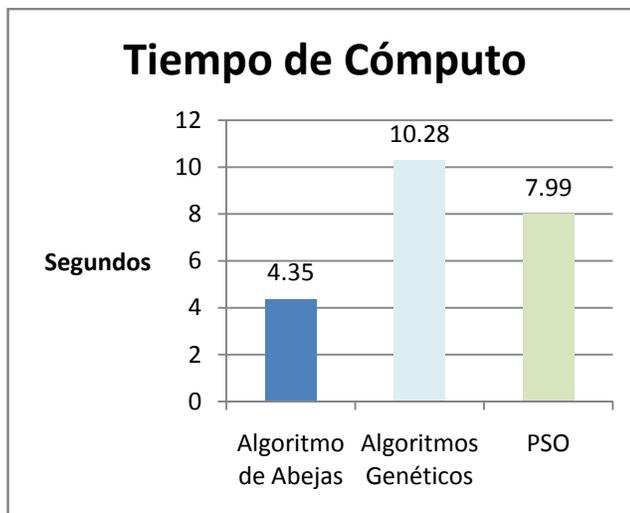
En parte de los resultados reportados por [Arce Casas, 2008] y [Panduro Mendoza, 2004] se propuso la síntesis de Chebyshev como diagrama final, para una ALU de 10 elementos, con una separación de  $\lambda/2$  y con un nivel deseado de lóbulos laterales de 17 dB. Se utilizó este número de elementos para optimizar el tiempo convergencia de los algoritmos. En la figura 20 se muestra la comparativa de los diagramas obtenidos mediante AA y el método de Chebyshev bajo las restricciones mencionadas.



**Figura 20: Comparativa del diagrama de radiación generado por el método de Chebyshev y algoritmo de Abejas para una ALU de 10 elementos con SLL de 17dB.**

El objeto de esta sección no es mostrar la capacidad de AA a la optimización multi-objetivo planteada. Sin embargo en la figura 20 se muestra el diagrama obtenido por AA (línea discontinua) y la línea continua es el diagrama obtenido por el método de Chebyshev, en ambos caso se obtiene un BWFN de 24° y un SLL de 17 dB conforme a lo planteado.

El punto importante de análisis en esta sección es el tiempo de cómputo requerido para sintetizar el diagrama de radiación presentado. El tiempo de convergencia registrado fue de 4.35 segundos, con diagramas de radiación similares y bajo las mismas restricciones en el escenario de simulación [Arce Casas, 2008] que trabajó con Optimización con Enjambre de Partículas reportó 7.99 segundos y [Panduro Mendoza, 2009] que lo hizo con Algoritmos Genéticos reportó 10.28 segundos. Evidentemente existe una mejora de más del 80% en ambos casos, lo anterior se puede apreciar de mejor manera en la figura 21.



**Figura 21: Comparativa entre AA, Algoritmos Genéticos y PSO en tiempo de cómputo para obtener el diagrama de la figura 20.**

En la figura 21 se observa claramente la mejora sustancial que se obtuvo con AA frente a Algoritmos Genéticos y PSO. Un parámetro importante en este tipo de algoritmos de optimización es el tiempo de cómputo, ya que AA redujo significativamente el tiempo requerido para obtener un diagrama de radiación con las mismas restricciones.

Esta sección no se encuentra dentro del objetivo de la tesis, pero debido al potencial grado de oportunidad se consideró apropiado hacer esta aportación al estado del arte, la cual puede ser extrapolada a escenarios más complejos. Lo anterior se debe en gran parte a la sencillez en el proceso algorítmico de AA. Sin embargo hay que resaltar el hecho de que los resultados numéricos obtenidos en la escala de tiempo están supeditados fuertemente al procesador con que se realizó la simulación, y a la plataforma de simulación.

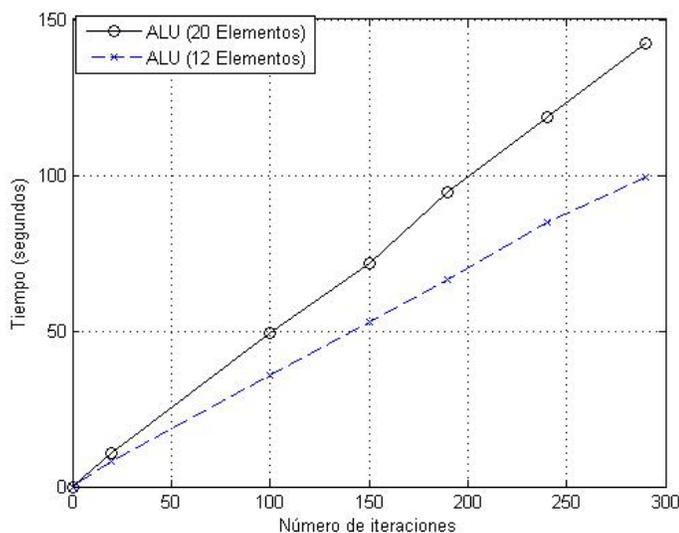
En la tabla 2 se muestra en forma de resumen, los valores normalizados de las amplitudes de los elementos de antena requeridas para sintetizar los diagramas de radiación mostrados en los diferentes escenarios de simulación, así como los tiempos de cómputo requeridos en cada uno de los resultados presentados.

**Tabla II. Amplitudes normalizadas de los elementos de antena de la ALU respecto al centro de la misma y tiempos de cómputo empleados para la obtención de los diagramas de radiación mostrados en el capítulo IV, respectivamente.**

ELEMENTO	FIG. 12	FIG. 13	FIG. 14	FIGS. 15 Y 19	FIG. 16	FIG. 17	FIG. 18	FIG 21
± 1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
± 2	0.9687	0.9892	1.0370	1.0079	0.9033	0.9737	0.9527	0.9327
± 3	0.9100	0.9526	0.9979	0.9309	0.8089	0.8482	0.9581	0.8130
± 4	0.8327	0.8861	0.8839	0.7693	0.7752	0.8047	0.8091	0.6483
± 5	0.7294	0.7797	0.7461	0.7976	0.6381	0.6746	0.6678	0.8880
± 6	0.6167	0.6511	0.6387	0.6101	0.6380	0.5806	0.6614	
± 7	0.5000	0.4801	0.5391	0.4020	0.4090	0.4159	0.6749	
± 8	0.3811	0.3487	0.3708	0.3605	0.2814	0.2273	0.0710	
± 9	0.2819	0.2471	0.1926	0.2280	0.1835	0.1747	0.0931	
± 10	0.3196	0.3196	0.2787	0.2044	0.1450	0.1687	-0.0164	
<b>Tiempo de cómputo (seg)</b>	10.73	94.45	118.62	142.14	49.21	71.72	94.32	4.35

## IV.8 Análisis del tiempo de convergencia respecto al número de iteraciones

Finalmente en la figura 22 se muestra la curva generada al graficar el tiempo de convergencia versus número de iteraciones, requeridos para obtener los resultados obtenidos en la simulaciones mostradas en este capítulo.



**Figura 22: Tiempo de convergencia vs número de iteraciones de Algoritmo de Abejas.**

En la figura 22 la línea continua muestra el tiempo de cómputo requerido por Algoritmo de Abejas para obtener los diagramas de radiación presentados en este capítulo en término el número de iteraciones, esto para una agrupación de 20 elementos. Por otra parte la línea discontinua muestra la curva del tiempo de convergencia requerido para completar el mismo número de iteraciones que para el caso anterior, pero ello para una agrupación de 12 elementos de antena. Para el primer caso completar 100 iteraciones requiere un tiempo de 49.21 segundos, lo cual se obtiene en 35.56 segundos en el segundo caso. Mientras que para completar 290 iteraciones, para 20 elementos de antena se requiere de 142.14 segundos y para 12 elementos un total de 99.48 segundos.

Por lo mostrado en la figura 22 se puede concluir que el incremento del tiempo de convergencia crece linealmente en referencia al número de iteraciones. Por otra parte, es evidente que a mayor número de elementos de antena se incrementa el tiempo de procesamiento requerido y aumenta la pendiente de dicho crecimiento.

## IV.9 Conclusiones

En este capítulo se mostraron una serie de simulaciones, seguidas de un análisis numérico riguroso de la información que éstas proporcionan. Lo anterior con el objeto de demostrar que el objetivo de la tesis en términos de simulación y análisis de las mismas ha sido alcanzado.

En primer término se mostraron los resultados obtenidos por la síntesis de Chebyshev aplicada a la síntesis de una Agrupación Lineal de Antenas, para después analizar las prestaciones que otorga esta técnica como tal.

Se realizó el estudio y la puesta a punto del algoritmo en término de los parámetros iniciales y los pesos de control en la función costo. Para con ello garantizar un funcionamiento adecuado en los diversos escenarios de simulación. Esta sección fue planteada para la obtención del diagrama de radiación inicial, del cual se estudió ampliamente el método de Chebyshev junto con las implicaciones y trascendencia que éste tiene.

Se presentaron las simulaciones correspondientes a la síntesis de nulos en diferentes escenarios de simulación y se hizo un análisis profundo de las prestaciones otorgadas de Algoritmo de Abejas en términos de optimización multi-objetivo.

Se realizó un análisis comparativo en términos de cancelación de interferentes entre Algoritmo de Abejas y el método de Schelkunoff, y se analizaron las prestaciones otorgadas por ambos métodos. Por otra parte, se realizó un análisis comparativo entre técnicas de optimización metaheurística como Algoritmo de Abejas, Algoritmos Genéticos y Optimización con Enjambre de Partículas. Lo anterior, bajo el análisis del tiempo de convergencia requerido para la síntesis de una Agrupación Lineal Uniforme de Antenas.

En el siguiente capítulo se realizarán las conclusiones generales de la tesis, gran parte de las cuales serán extraídas de la información presentada en este capítulo, por lo cual resulta trascendental la adecuación con que sean mostrados los resultados.

## Capítulo V

---

### Conclusiones y Trabajo futuro

---

Este capítulo tiene como objetivo mostrar las conclusiones y aportaciones generadas en el desarrollo de esta tesis, que permiten determinar que el objetivo de la tesis ha sido cumplido en su totalidad. Dicho objetivo se refiere al empleo de un método eficiente basado en Algoritmo de Abejas para la optimización de la síntesis de agrupaciones lineales de antenas, enfocada ésta, principalmente a la generación de nulos en direcciones preestablecidas y en segundo término a la optimización del lóbulo principal. Dicha síntesis se logra al controlar sólo la amplitud de la corriente de excitación de cada uno de los elementos de la agrupación de antenas. Además, se comparan prestaciones de cancelación de interferentes y optimización del lóbulo principal con métodos analíticos como Chebyshev y Schelkunoff.

Las siguientes secciones muestran las conclusiones generadas por un análisis puntual del trabajo de investigación realizado. También se presenta una serie de propuestas concretas para la realización de trabajos futuros, siguiendo la misma línea de investigación de este trabajo.

## V.1 Referente a la Optimización con Algoritmo de Abejas

En este trabajo se ha mencionado la importancia que hoy en día tiene la optimización numérica basada en cómputo evolutivo, como una alternativa eficiente a las técnicas de optimización analítica, más aun cuando se enfrentan problemas de naturaleza multimodal, multidimensional, multivariable y multi-objetivo. Esta naturaleza se presenta en muchos de los problemas actuales en la ingeniería, particularmente los de síntesis electromagnética y en concreto el planteado en esta tesis.

Se precisó a lo largo de este trabajo que el Algoritmo de Abejas es una alternativa eficiente para la optimización de la síntesis de agrupaciones lineales de antenas, y que otorga buenas prestaciones en términos de cancelación de interferentes y atención al usuario deseado simultáneamente. Lo anterior es un objetivo primordial en los sistemas de comunicaciones móviles celulares actuales, de ahí la importancia y relevancia del desarrollo de esta tesis.

Previo al modelado del sistema y a la simulación de la síntesis del diagrama de radiación de una Agrupación Lineal Uniforme de Antenas a través de Algoritmo de Abejas, se realizó un amplio estudio de la teoría de optimización metaheurística y computo evolutivo, con el objetivo de comprender, precisar y aplicar los conceptos relacionados al problema que se enfrenta en esta tesis. A continuación se presentan los puntos más relevantes sobre la optimización basada en Algoritmo de Abejas.

- Algoritmo de Abejas es un método eficiente de optimización global, realiza una combinación de búsqueda aleatoria y búsqueda en la vecindad (búsqueda local), lo cual implica que el algoritmo realiza una búsqueda exhaustiva en todo el espacio de soluciones, hasta encontrar el óptimo global. Dicho espacio de soluciones puede ser de naturaleza multimodal, multidimensional y con una buena adaptación del método se puede realizar eficientemente optimización multi-objetivo.

- La inicialización de parámetros supedita el funcionamiento óptimo del algoritmo. Para este trabajo en particular, se encontró que incrementar el número de (*abejas exploradoras*) posibles soluciones no necesariamente aumenta la capacidad y eficiencia del algoritmo para encontrar el óptimo global. Sin embargo, manipular adecuadamente el número de elementos (*abejas élite, abejas alrededor de los mejores sitios y abejas alrededor de las abejas élite*) que desarrollan la búsqueda local, mejora en buena medida el desempeño del algoritmo, en términos de tiempo de convergencia principalmente.
- El número de parámetros a sintonizar del algoritmo no es reducido, por lo cual se recomienda realizar un estudio paramétrico exhaustivo, para encontrar la configuración ideal de parámetros que otorgue la mejor relación entre precisión y costo computacional en el problema bajo análisis.
- En la búsqueda en la vecindad (búsqueda local) del algoritmo básico no se menciona explícitamente la aplicación de elitismo al conjunto de mejores soluciones, sin embargo en este trabajo se aplicó elitismo en esa parte para garantizar la emigración de las mejores soluciones a la siguiente generación.
- Las ventajas de la optimización basada en Algoritmo de Abejas están referidas a: la sencillez de su implementación algorítmica, la flexibilidad y capacidad del algoritmo para desarrollar una optimización global basada en población y la rapidez del tiempo de convergencia.

## **V.2 Referente a la síntesis del diagrama de radiación de una Agrupación Lineal Uniforme de antenas**

Para cumplir el objetivo propuesto en la tesis, se realizó el modelado de 3 métodos de optimización, aplicados estos a la síntesis del diagrama de radiación de una Agrupación Lineal de Antenas. Lo anterior, con el objetivo principal de sintetizar nulos en el diagrama de radiación, para la cancelación de interferentes en direcciones preestablecidas y en segundo término optimizar las características del lóbulo principal para mantener el servicio a la señal deseada; lo cual, se puede lograr con el método de Schelkunoff y el método de Chebyshev, respectivamente. Por otra parte, se realizó una optimización multi-objetivo en términos de síntesis de nulos y optimización del haz principal a través del modelado de Algoritmo de Abejas aplicado a la síntesis de una Agrupación Lineal Uniforme de antenas.

A continuación se muestran puntualmente las conclusiones obtenidas de este apartado de la tesis:

- Se determinó que bajo las consideraciones específicas del modelado del sistema, mencionadas en el capítulo IV, el estudio del diagrama de radiación de una Agrupación Lineal de Antenas se reduce al estudio de su Factor de Agrupación.
- Para el problema bajo análisis, el uso de las propiedades que presenta una agrupación con un número de elementos par y con simetría alrededor del centro de la agrupación, reduce a la mitad el tiempo de convergencia y el número de atenuadores requeridos para realizar un control de sólo amplitud. Aunque es evidente la presencia de un compromiso existente por usar dicha propiedad y éste se manifiesta en el efecto espejo que presenta el diagrama de radiación obtenido.

- Bajo las restricciones iniciales de diseño en términos del nivel de lóbulos laterales, se determinó que las prestaciones otorgadas por el diagrama de radiación obtenido por la síntesis de Chebyshev son suficientes para ser considerado como una máscara de restricciones.
- El problema planteado busca encontrar un conjunto de soluciones, en este caso un conjunto de amplitudes de excitación de los elementos de una ALU de antenas, lo cual se logra eficientemente a través de un método de optimización basado en población como lo es Algoritmo de Abejas. Con ello se logra realizar un control de sólo amplitud del diagrama de radiación, lo cual reduce significativamente el tiempo de convergencia y la complejidad de la búsqueda. Sin embargo, es posible realizar otro tipo de control del diagrama de radiación, basado en la optimización por medio de un Algoritmo de Abejas.
- En lo que se refiere a la geometría de la agrupación, se determinó la viabilidad de trabajar con una Agrupación Lineal Uniforme de Antenas, en términos de sencillez en el modelado del sistema y en el análisis. Sin embargo, la optimización basada en Algoritmo de Abejas podría ser considerada para trabajar con una geometría más compleja.
- El trabajar con una agrupación de 20 elementos como la que se planteó en la mayoría de escenarios de simulación de este trabajo, y considerar un espaciamiento de  $\lambda/2$  entre elementos y una frecuencia de 1900 MHz, implica que físicamente la agrupación sea de 1.5 metros aproximadamente, lo cual es viable de implementar en una estación base de comunicaciones móviles celulares.
- Para la optimización basada en Algoritmo de Abejas, si un conjunto de abejas o soluciones potenciales al problema bajo análisis se proyecta adecuadamente del espacio de soluciones del algoritmo al espacio de

soluciones del problema (**abeja - conjunto de amplitudes de excitación de los elementos de la agrupación**); y se hace evolucionar por la presión de los mecanismos de selección, se puede guiar oportunamente el conjunto de soluciones hacia el óptimo global.

- Respecto a la función costo, se determinó la importancia de manipular adecuadamente dicha función en base a los requerimientos del problema bajo análisis, ya que ello supedita el funcionamiento óptimo del algoritmo y el alcance de los objetivos planteados.

### **V.3 Referente a las simulaciones y análisis numérico**

Una vez realizado el modelado de los 3 métodos de síntesis de agrupación de antenas planteados en la tesis, en el capítulo IV se muestran una serie de estadísticas obtenidas de la simulación de dichos métodos, aplicados éstos a la síntesis del diagrama de radiación de una Agrupación Lineal Uniforme de antenas, bajo el concepto de rechazo de interferentes y optimización de lóbulo principal, respectivamente.

Luego de un análisis puntual en cada simulación se concluye lo siguiente:

- Con la aplicación del método de Chebyshev a la síntesis de una agrupación lineal, se determinó el compromiso que existe entre la optimización del nivel de lóbulos laterales versus el ancho de lóbulo principal, no es posible mejorar alguno de los dos parámetros sin degradar el otro.
- El método de Chebyshev maneja un haz principal en modo transversal a la agrupación, debido a ello no es posible considerar dirigibilidad del haz principal. Debido a que Algoritmo de Abejas restringe su funcionamiento a través de una máscara inicial (Chebyshev), dicha limitante también se

traslada a la optimización basada en Algoritmo de Abejas y no es posible considerar dirigibilidad del haz principal. Para poder considerar dirigibilidad del haz es posible trabajar con pesos complejos, y esto es propuesto como un trabajo futuro.

- La síntesis del diagrama inicial a través de Algoritmo de Abejas, lo que representa el caso más sencillo, permitió encontrar la configuración paramétrica adecuada del algoritmo para el problema bajo análisis. Dicha configuración de parámetros es usada en todas las simulaciones presentadas en este trabajo.
- La obtención de diagrama inicial a través de Algoritmo de Abejas, también permitió validar el funcionamiento óptimo de dicho algoritmo metaheurístico en términos de una aproximación matemática inicial como lo es el método de Chebyshev.
- Con el proceso de simulación realizado, se determinó la importancia de asignar los valores adecuados de los pesos que controlan cada objetivo dentro de la función costo. La función de evaluación supedita en su totalidad la optimización multi-objetivo planteada, por ello resulta trascendental realizar un estudio exhaustivo del comportamiento e inferencia de la función costo en el proceso de optimización. Cada problema en particular considera diferentes objetivos, debido a eso se tiene que adecuar una función de evaluación dependiendo el problema bajo análisis.
- Con los resultados de simulación presentados, la flexibilidad del algoritmo se determinó en términos de la síntesis de uno, múltiples y nulos sectoriales. La precisión se determinó por la ubicación de los nulos y el nivel de los mismos en cuanto a profundidad obtenida. Por último, referente a la adaptación multi-objetivo de Algoritmo de Abejas, se optimizó

simultáneamente en los diagramas de radiación obtenidos la ubicación y profundidad de nulos, el ancho de lóbulo principal y el nivel máximo nivel de lóbulos laterales, con el compromiso inherente visible entre los múltiples objetivos planteados.

- Los diagramas de radiación presentados se obtuvieron en un tiempo promedio entre 1 y 3 minutos, lo que resulta satisfactorio para el problema bajo análisis. Sin embargo, se determinó que el tiempo registrado es inherente a la plataforma de simulación y al procesador utilizado. Evidentemente es posible mejorar sustancialmente los tiempos de convergencia con el uso de una plataforma y un procesador más eficientes.
- El análisis comparativo en términos de tiempo de cómputo entre Algoritmo de Abejas, Algoritmos Genéticos y Optimización con Enjambre de Partículas, considerando las mismas restricciones, determinó la mejora sustancial en cuanto al tiempo de convergencia del primero frente a los otros dos. Algoritmo de Abejas mejoró hasta en un 130% y 80% a Genéticos y Enjambre de Partículas, respectivamente.

En base a las conclusiones presentadas y al análisis realizado, se puede concluir que el objetivo de la tesis se ha cumplido satisfactoriamente en un 100%. Además, parte del trabajo presentado no estaba considerado en el objetivo inicial, lo anterior fue realizado con el propósito de llevar más allá el objetivo de la tesis. En este contexto se realizó una comparativa entre tres métodos de optimización basados en población, bajo las mismas restricciones de simulación y se realizó un análisis de la inferencia de número de iteraciones en el tiempo de convergencia.

#### **V.4 Publicación como resultado del trabajo de investigación**

Como resultado del trabajo de investigación realizado en esta tesis, se realizó la siguiente publicación:

- González Islas Juan C. Covarrubias Rosales David H. “SINTESIS DE UNA AGRUPACIÓN LINEAL UNIFORME PARA LA CANCELACIÓN DE INTERFERENTES MEDIANTE UNA NOVEDOSA TECNICA METAHEURÍSTICA”, publicado en las memorias de IV congreso “Ciudades Inteligentes” (CMICE, 2009), Abril 22-24 del 2009, México D.F.

## V.5 Trabajo Futuro

Como resultado del trabajo de investigación realizado en esta tesis y con la experiencia adquirida en el tema, se hacen las siguientes propuestas para la realización de trabajos futuros sobre la misma línea de investigación:

- Optimización del diagrama de radiación de una agrupación de antenas a través de Algoritmo de Abejas, considerando una geometría con mayor complejidad a la usada en este trabajo, pudiendo ser una geometría planar, circular o conformada.
- Realizar la optimización del diagrama de radiación de una Agrupación Lineal Uniforme de antenas a través de otra técnica de optimización metaheurística como lo es Optimización con Colonia de Hormigas o Algoritmos Meméticos. Lo anterior con el objetivo de cancelación de interferentes y optimización de lóbulo principal, simultáneamente; y realizar una comparativa de prestaciones de las diferentes técnicas de optimización metaheurística.
- Trabajar con otro tipo de control del diagrama de radiación de la agrupación diferente al control sólo de amplitud de los elementos de antena. Algoritmo de Abejas puede ser empleado para controlar los pesos complejos de los elementos de antena y considerar con ello dirigibilidad del haz principal.

- Trabajar los mismos escenarios de simulación planteados bajo el esquema de otra plataforma de simulación con mayor eficiencia que la utilizada en este trabajo y realizar un estudio puntual de las prestaciones obtenidas en cuanto al tiempo de convergencia.

## Bibliografía

- Arce Casas A. 2008. Síntesis de agrupaciones de antenas por medio de optimización estocástica. Tesis de maestría en ciencias en electrónica y telecomunicaciones, CICESE. 83pp.
- Balanis C. A. 2005. Antenna theory. John Wiley & Sons. Tercera edición, 1045pp.
- Bar-Cohen Yoseph, 2006, Biomemetics using nature to inspire human innovation. Institute of Physics Publishing, 1:1-12.
- Bonabeau E., Dorigo M. y Theraulaz G. 1999. Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems. Oxford University Press, New York. Primera edición, 307pp.
- Camazine S., Deneouburg J., Franks N., Sneyd J., Theraula G. y Bonabeau E. 2003. Self-organization in Biological systems. Princeton University. Primera edición, 538pp.
- Chen, T. B., Dong Y. L., Jiao Y. C. y Zhang F., 2006, Synthesis of circular antenna array using crossed particle swarm optimization algorithm. J. Electromagnetic Waves and Applications, 20:1785–1795.
- Coello C. A., Van Veldhuizen D. A. y Lamont G. B. 2002. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. Kluwer Academic Publishers, New York. Primera edición, 610pp.
- Covarrubias Rosales. 2008. Antenas inteligentes para comunicaciones móviles celulares. Notas del curso de antenas inteligentes del posgrado en electrónica y telecomunicaciones, CICESE. No publicado.
- Dolph C. L., 1946, A current Distribution for Broadside Arrays Which Optimizes the relationship between Beamwidth and Side-Lobe Level. Proc. IRE and Waves and Electrons, 34: 335-348.
- Eiben A. E. y Smith J. E. 2007. Introduction to evolutionary computing. Springer. Primera edición, 293pp.

- Engelbrecht Andries. 2005. *Fundamentals of Computational Swarm Intelligence*. Wiley. Primera edición, 599pp.
- García Nieto. 2007. *Algoritmos basados en inteligencia colectiva para resolución de problemas de Bioinformática y Telecomunicaciones*. Tesis de máster, Universidad de Málaga, 41pp.
- Goldberg D.E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley, New York. Primera edición, 432 pp.
- Guney K. y Onay M., 2007, Amplitude-only Pattern Nulling Of Linear Antenna Arrays With The Use Of Bees Algorithm. *Progress In Electromagnetics Research*, 70: 21–36.
- Kennedy James y Eberthart Rusell. 2001. *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann. Primera edición, 512 pp.
- Lehne H. Pettersen M., 1999, An overview of Smart Antenna Technology for Mobile Communications Systems. *IEEE Comm. Surveys*, 2(4): 2-12.
- Panduro Mendoza M. 2004. *Optimización en el diseño de arreglos de antenas utilizando el método de algoritmos genéticos*. Tesis de doctorado en electrónica y telecomunicaciones, CICESE. 100 pp.
- Panduro Mendoza M, Brizuela Rodríguez C. y Covarrubias Rosales D., 2008, Design of Electronically Steerable Linear Arrays with Evolutionary Algorithms, en *Applied Soft Computing Journal*. Springer-Verlag, 8(1):46-54.
- Panduro Mendoza M., Andrade Reátiga A., Covarrubias Rosales D., Méndez Pérez R., Dominguez Cruz y Romero Galván, 2007, Evaluation of the interference rejection capability of a uniform circular array. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 30(5): 775-780.
- Panduro Mendoza M., Brizuela Rodriguez C., Covarrubias Rosales D. y López Miranda C., 2006, A Trade-off Curve Computation for Linear Antenna Arrays using an Evolutionary Multi-Objective Approach. *Soft Computing Journal*. Springer-Verlag, 10(2): 125-131.

- Panduro Mendoza M., Covarrubias Rosales D. y Brizuela Rodriguez C., 2005, A Multi-Objective Approach in the Linear Antenna Arrays Design. *AEÜ International Journal of Electronics and Communications*. Elsevier, 59 (4): 205-212.
- Pham, D.T., Otri S., Ghanbarzadeh A. y Koc E., 2006, Application of the bees algorithm to the training of learning vector quantization networks for control chart pattern recognition. *Information and Communication Technologies*, 1: 1624–1629.
- Pham, D. T., Ghanbarzadeh A., Koc E., Otri S., Rahim S. y Zaidi M., 2006, The bees algorithm — a novel tool for complex optimisation problems. *Proc. 2nd Int Virtual Conf. on Intelligent Production Machines and Systems (IPROMS 2006)*, Oxford, Elsevier.
- Puente Montejano C. 2005. Reconstrucción tridimensional a partir de dos imágenes basada en el proceso de búsqueda de las abejas. Tesis de maestría en ciencias de la computación, CICESE. 202pp.
- Rappaport T.S. y Liberti J. 1999. *Wireless Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*. Prentice Hall, New Jersey. Primera edición, 372pp.
- Rocha Alicano C. 2006. Síntesis del diagrama de radiación de agrupamiento de antena mediante técnicas de cómputo evolutivo. Tesis de maestría en ciencias en electrónica y telecomunicaciones, CICESE. 102pp.
- Rocha Alicano C., Covarrubias Rosales D., Brizuela Rodriguez C. y Panduro Mendoza M., 2007, Differential evolution algorithm applied to sidelobe level reduction on a planar array. *AEU International Journal of Electronic and Communications*, 61(5): 286-290.
- Sánchez Gómez J. 2007 Síntesis vía técnicas analíticas de agrupamiento de antenas, con espacio no uniforme en geometrías lineal y planar. Tesis de maestría en ciencias en electrónica y telecomunicaciones, CICESE. 102pp.

- Sánchez Gómez J., Covarrubias Rosales D. y Panduro Mendoza M., 2009, A synthesis of unequally spaced antenna arrays using Legendre functions. *Progress in Electromagnetics Research*, 7: 57-69.
- Seeley T. 1996. *The Wisdom of the Hive: The Social Physiology of honey Bee Colonies*. Massachusetts Harvard University Press. Cambridge. Primera edición, 295pp.
- Torrealba Meléndez R. 2007. *Síntesis del diagrama de radiación en agrupamientos de antenas vía optimización convexa*. Tesis de maestría en ciencias en electrónica y telecomunicaciones, CICESE. 107pp.
- Torrealba Melendez R., Covarrubias Rosales D. y Panduro Mendoza M., 2008, Analysis of Robustness for Convex Optimization Applied to Array Antenna Pattern Synthesis. *Journal of Computer Science*. Science Publications, 4(12): 1036-1041.
- Yen Jeannette y Weissburg Marc, 2007, Perspectives on biologically inspired design: introduction to the collected contributions. Institute of Physics Publishing, 2:1-4.