



Ingeniería

ISSN: 0121-750X

revista\_ing@udistrital.edu.co

Universidad Distrital Francisco José de  
Caldas  
Colombia

Flórez, Mauro; Ospina Torres, Martha Ruth; Galindo Cepeda, William Francisco  
Análisis y diseño de un sistema de antena adaptativa con algoritmos genéticos  
Ingeniería, vol. 10, núm. 1, 2005, pp. 5-15  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=498850160003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Análisis y diseño de un sistema de antena adaptativa con algoritmos genéticos

**Mauro Flórez<sup>1</sup>**

**Martha Ruth Ospina Torres<sup>2</sup>**

**William Francisco Galindo Cepeda<sup>3</sup>**

Existen tres parámetros que alteran el patrón de radiación de un arreglo: la fase ( $\beta$ ), la amplitud ( $\alpha$ ) y la distancia entre los elementos que lo conforman ( $d$ ), los cuales pueden ser utilizados para ajustar la forma del patrón de radiación para radiar con unas características específicas.

## RESUMEN

Este artículo trata acerca de conceptos de arreglos de antenas lineales, diseñados a partir de algoritmos genéticos para obtener patrones de radiación con la modificación de parámetros característicos como la amplitud de corriente y la fase de alimentación y la separación relativa en longitudes de onda entre elementos para radiar en un ángulo específico y reducir el nivel de señal en otra dirección.

**Palabras clave:** Antenas Adaptativas, Algoritmos Genéticos, Arreglos Lineales.

## ABSTRACT

This paper studies concepts about linear antenna arrays, designed with genetic algorithms. Each antenna fed with combined amplitude and phase control to adjust side lobe levels and steer nulls. Also, the number of elements and the spacing between them are adjusted.

**Key words:** Adaptive Antennas, Genetic Algorithms, Linear Arrays.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años los avances tecnológicos han permitido que las Telecomunicaciones se encuentren al alcance de un gran número de personas en todo el mundo. Sin embargo, el recurso utilizado para este objetivo, conocido como espectro electromagnético, es limitado y

debe ser racionalizado para que pueda cubrir las necesidades actuales.

Existen algunos métodos que permiten hacer una mejor utilización del espectro electromagnético, uno de los cuales es el empleo de antenas inteligentes que distribuyen los niveles de campo eléctrico para que alcance únicamente a cierta región espacial en particular, dando la oportunidad de atender con la misma frecuencia diferentes lugares. Este procedimiento hace un mayor aprovechamiento de los recursos, con lo cual es posible manejar un mayor número de usuarios.

## 1. ARREGLOS LINEALES

Generalmente el patrón de radiación de un elemento aislado tiene un ancho de haz relativamente grande, y cada elemento individual provee niveles muy bajos de directividad (ganancia). Existen algunas aplicaciones en donde es necesario diseñar antenas con buenas características de directividad, es decir, muy altas ganancias, para alcanzar las demandas actuales de comunicación a larga distancia que han surgido con el desarrollo de las tecnologías de la información [1].

La ampliación de las dimensiones de una antena aislada conduce frecuentemente a una mejor directividad. Sin embargo, existe otra manera para ampliar las dimensiones de la antena, sin necesariamente incrementar el tamaño de los elementos individuales, y consiste en establecer un grupo de elementos radiantes en una configuración eléctrica y geométrica determinada. Esta nueva antena, formada por múltiples elementos, se conoce como un *arreglo*.

Sin tener en cuenta las interacciones entre elementos, el campo total de un arreglo, se determina por la suma vectorial de los campos radiados por cada uno de los elementos individuales.

<sup>1</sup> Miembro Grupo de Investigación en Teleinformática GITUN. Bogotá, Colombia.

<sup>2</sup> Miembro Grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad Distrital F.J.C., GITUD. Bogotá, Colombia.

<sup>3</sup> Miembro Grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad Distrital F.J.C., GITUD. Bogotá, Colombia.

Para suministrar patrones muy directivos, es necesario que los campos de los elementos que forman el arreglo interfieran constructivamente en la dirección de máxima radiación, e interfieran destructivamente en el espacio restante. Idealmente esto puede ser alcanzado, pero en la práctica sólo se llega a un resultado aproximado. En un arreglo con elementos iguales, existen cinco parámetros que pueden ser empleados para formar el patrón de radiación de la antena y que a su vez se constituyen en elementos de diseño para obtener un patrón de radiación con características definidas. Estos son:

- La configuración geométrica del arreglo (lineal, circular, rectangular, esférica, etc.).
- La distancia relativa entre los elementos.
- La amplitud de excitación de los elementos individuales.
- La fase de excitación de los elementos individuales.
- El patrón de radiación de los elementos individuales.

El arreglo más simple, y uno de los más prácticos, se forma colocando los elementos a lo largo de una línea.

Cabe recordar que un aspecto importante a la hora de llevar a cabo el diseño del arreglo es el manejo de los **errores de cuantificación en fase y amplitud**, ya que si se utilizan desfases y alimentadores digitales los efectos de los escalones de cuantificación en la precisión del apuntamiento del haz, la resolución y el nivel de los lóbulos secundarios debe tenerse en cuenta.

### 1.1. Arreglos lineales de N elementos con amplitud y espacio uniforme

A un arreglo como el ilustrado en la Figura 1 con idénticos elementos, todos con la misma amplitud de corriente ( $\alpha$ ) y cada uno con una fase progresiva ( $\beta$ ) se le conoce como un **arreglo uniforme**. El factor de arreglo puede ser obtenido considerando los elementos como fuentes puntuales. Si los elementos a trabajar no fueran fuentes isotrópicas, el campo total sería igual al *producto del campo de un elemento aislado, en un punto de referencia determinado (normalmente el origen), y el factor del arreglo para la configuración del sistema*. Este es el llamado **patrón de multiplicación** para arreglos constituidos con elementos iguales. En estas condiciones el factor de arreglo está dado por la sumatoria:

$$FA = 1 + e^{+j(kd \cos \theta + \beta)} + e^{+j2(kd \cos \theta + \beta)} + \dots + e^{+j(N-1)(kd \cos \theta + \beta)}$$

$$FA = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (1)$$

que simplificada, puede ser escrita como

$$FA = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2)$$

donde

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \quad (3)$$

Multiplicando ambos lados de (2) por  $e^{j\psi}$  y de la diferencia entre estas dos ecuaciones, se puede simplificar como:

$$(FA)(e^{j\psi} - 1) = (-1 + e^{jN\psi}) \quad (4)$$

que puede ser también escrito como

$$FA = e^{j\left[\frac{(N-1)}{2}\psi\right]} \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (5)$$

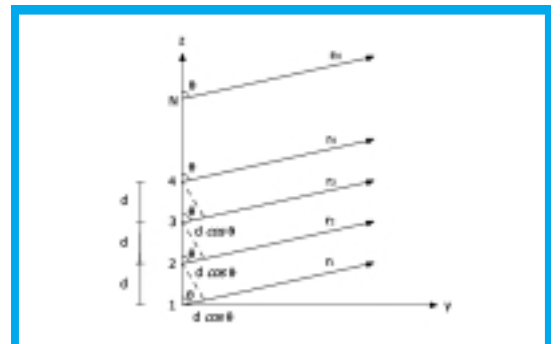


Figura 1. Geometría de Campo Lejano para un arreglo de fuentes isotrópicas de N elementos ubicado a lo largo del eje z

Si el punto de referencia es el centro físico del arreglo, el factor de arreglo (5) se reduce a [2]:

$$FA = \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (6)$$

El valor máximo de (6) es igual a N. Al normalizar el factor de arreglo para que el valor máximo del mismo sea igual a la unidad, (6) es reescrito en forma normalizada como

$$(FA)_n = \frac{1}{N} \left[ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (7)$$

Una forma sencilla de determinar el patrón de un arreglo de antenas es por medio del patrón de multiplicación

El mayor nivel de inteligencia en un arreglo de antenas se logra utilizando la técnica de conmutación de haz adaptativo.

## 2.2. Antenas inteligentes

Una antena inteligente es aquella que, en vez de disponer de un diagrama de radiación fijo, es capaz de generar o seleccionar haces muy directivos enfocados hacia el usuario deseado e incluso adaptarse a las condiciones radioeléctricas en cada momento. La característica básica que se busca en el diseño de un sistema de antena inteligente consiste en tener la capacidad de seleccionar espacialmente a los distintos usuarios ubicados en el área de trabajo. Existen varias técnicas de conmutación para implementar un sistema con esta capacidad, como son: Haz Conmutado, Haz de Seguimiento o el Haz Adaptativo, siendo este último el aplicado en el estudio [3].

**Haz adaptativo.** El término antena adaptativa se aplica a los arreglos que son capaces de ajustar su diagrama de radiación de forma determinada, dependiendo de las fases y de las amplitudes recibidas desde fuentes externas. Una antena como la indicada consiste en una antena de elevada ganancia y varias antenas auxiliares con un diagrama prácticamente omnidireccional. El número de antenas auxiliares determina el máximo número de interferencias que se pueden cancelar.

Los algoritmos matemáticos relacionados con las antenas adaptativas son relativamente complejos. La implementación práctica se puede realizar en forma analógica o digital, aunque últimamente se está imponiendo la tecnología digital. En este caso, la salida de cada elemento del arreglo se pondera con un factor de peso cuyo valor se asigna dinámicamente, de modo que se conforma el diagrama de radiación para maximizar algún parámetro de la señal. De este modo, el diagrama sintetizado habitualmente presentará un lóbulo principal en la dirección del usuario deseado, lóbulos secundarios en las direcciones de las componentes multitrayectoria y mínimos (e incluso nulos) de radiación en las direcciones de las fuentes de interferencia como se puede observar en la figura 2.

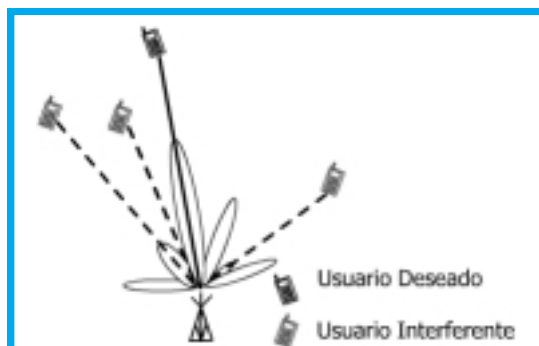


Figura 2. Técnica de Conmutación por Haz Adaptativo

## 2. ALGORITMOS GENÉTICOS

Se pueden definir los algoritmos genéticos, de forma general, como «métodos estocásticos de búsqueda ciega de soluciones cuasi-óptimas. En ellos se mantiene una población que representa un conjunto de posibles soluciones, la cual es sometida a ciertas transformaciones con las que se trata de obtener nuevos candidatos y un proceso de selección sesgado en favor de los mejores candidatos» [4].

### 2.1. Estructura y componentes básicos

Una población que consta de  $n$  miembros se somete a un proceso de selección para constituir una población intermedia de  $n$  criadores. De dicha población intermedia se extrae un grupo reducido de individuos llamados *progenitores* que son los que efectivamente se van a reproducir. Sirviéndose de los *operadores genéticos*, los progenitores son sometidos a ciertas transformaciones de alteración y recombinación en la fase de reproducción, en virtud de las cuales se generan  $s$  nuevos individuos que constituyen la *Descendencia*. Para formar la nueva Población ( $t + 1$ ), se deben seleccionar  $n$  *supervivientes* de entre los  $n + s$  de la población auxiliar y la descendencia, lo que ocurre en la fase de *Reemplazo*.

El método más utilizado para mejorar la convergencia de los algoritmos genéticos es el *elitismo*. Consiste básicamente en realizar la etapa de selección en dos partes: Se muestrea una *Elite* de  $r$  miembros de entre los mejores de la población inicial y se incorporan directamente a la población final, sin pasar por la población intermedia. La población auxiliar de criadores se muestrea de entre los  $n - r$  restantes miembros de la población inicial. Comúnmente, el tamaño de la elite  $r$  es bastante pequeño. El esquema básico de un algoritmo genético elitista se muestra en la Figura 3.

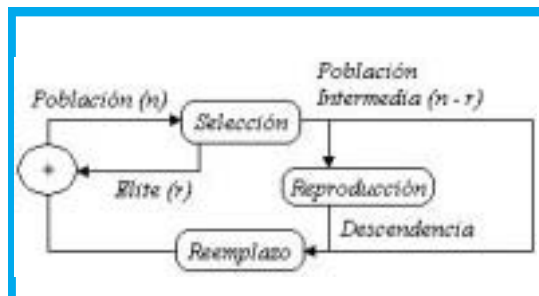


Figura 3. Bucle Básico de un Algoritmo Genético Elitista

Para mejorar el patrón de radiación que se desea obtener se implementa un algoritmo genético.

## 2.2. Operadores aplicados en algoritmos genéticos

Existen dos grupos de operadores que nunca faltan en un algoritmo genético: el **cruce** y la **mutación**. Los operadores de cruce son el arquetipo de los operadores de recombinación: actúan sobre parejas de individuos y normalmente originan otro par de individuos que combinan características de los progenitores. Dado que en los algoritmos genéticos los individuos están representados a través de cadenas, el cruce se lleva a cabo por intercambio de segmentos. Los operadores de mutación, por su parte, son el arquetipo de operadores de alteración, dado que actúan sobre individuos en particular, realizando una pequeña modificación en alguno de sus genes o en el conjunto. En la figura 4 se muestra el resultado de aplicar estos operadores a un par de genes.

Para aplicar el operador cruce, se asigna un peso a cada individuo (en un intervalo entre 0 y 1 de forma aleatoria), se suman los materiales genéticos resultantes y se ajusta a los genes existentes [5].

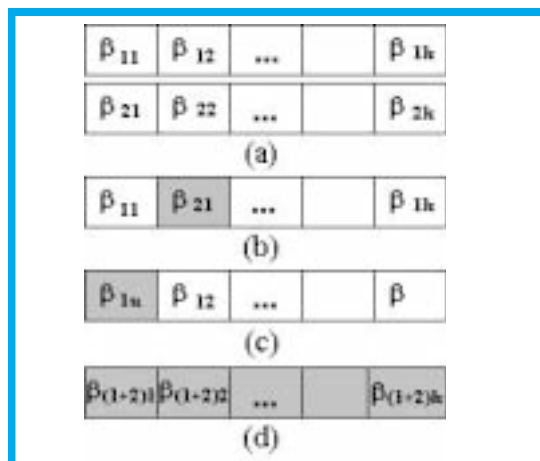


Figura 4. Resultado de aplicar operadores genéticos de Combinación, Mutación y Cruce a un par de genes.

## 2.3. Evaluación y selección

Durante la evaluación, se decodifica el gen, convirtiéndose en una serie de parámetros de un problema, se halla la solución del problema a partir de esos parámetros, y se le da una puntuación a esa solución en función de lo cerca que esté de la mejor solución. A esta puntuación se le llama *Fitness* [6].

El *Fitness* determina siempre los cromosomas que se van a reproducir, y aquellos que se van a eliminar, pero hay varias formas de considerarlo para seleccionar la población de la siguiente generación.

## 3. ANÁLISIS

Cuando se desea cubrir un usuario ubicado dentro de un área determinada, se espera que la señal que recibe por parte de la antena transmisora tenga las mejores características, que incluyan tanto el nivel de la señal, así como también un adecuado ancho de haz.

Es posible alterar la simetría del conjunto de elementos que forman el arreglo, variando en cierta medida los valores de alimentación y de disposición, de forma que se adapten a las condiciones de cambio que aparecen en el medio, como la ubicación del usuario o la llegada de una señal interferente a la zona de trabajo.

Existen tres parámetros que alteran en diferente medida el patrón de radiación de un arreglo, que son: La fase relativa entre cada uno de los elementos que hacen parte del arreglo, la amplitud de la corriente que circula a través de los elementos del arreglo y la distancia (en múltiplos de longitud de onda  $\lambda$ ) que separa cada componente.

### 3.1. Codificación de variables

Para obtener el patrón de radiación de un arreglo lineal uniforme, se emplea la siguiente ecuación:

$$FA = \sum_{n=1}^N \alpha e^{j(n-1)\psi} \quad (8)$$

donde  $\psi = kd \cos \theta + \beta$  de manera que el algoritmo tendría como entradas los valores para  $\beta$  (fase progresiva entre elementos),  $\alpha$  (amplitud de la corriente de alimentación) y  $d$  (distancia entre elementos). Cada uno de estos parámetros puede tomar cualquier valor en un rango determinado, y luego de ser seleccionado, su valor se mantiene constante a lo largo del tiempo, lo que dificulta a su vez realizar cambios significativos en la forma del patrón de radiación.

Para el ángulo de desfase  $\beta$  se pueden asumir valores entre 0 y  $2\pi$ , con una mayor o menor cantidad de muestras entre los extremos del rango. El número de muestras debe permitir alcanzar la mayor cantidad posible de ángulos de máxima radiación, sin ser tan extenso como para que su cálculo no admita soluciones convenientes en tiempos cortos.

La amplitud de la corriente que circula a través de los elementos que forman el arreglo, cuyo valor se encuentra normalizado, puede encontrarse en un intervalo entre 0 y 1, y posee las mismas restricciones que para la fase de alimentación. El intervalo es abierto, esto quiere decir que se puede ampliar, sin embargo esto implica un mayor gasto de energía y con ello mayores pérdidas en el sistema de alimentación del arreglo.

La distancia entre elementos se da en múltiplos de  $\lambda$  (longitud de onda), facilitando con ello los cálculos en (8), el intervalo de trabajo depende del diseñador, en principio se da la libertad de mover los elementos en un espacio comprendido entre  $-0.5\lambda$  y  $0.5\lambda$  alrededor del punto central, que es originalmente la posición dada al elemento cuando se estudian de manera igualmente espaciada.

### 3.2. Ecuación general

Ahora que se han analizado algunas características básicas para el empleo de los algoritmos genéticos, es necesario realizar algunos cambios a la ecuación (8) con el objetivo de permitir modificaciones a las variables de diseño, de modo que se puedan tomar valores independientes para cada una de ellas.

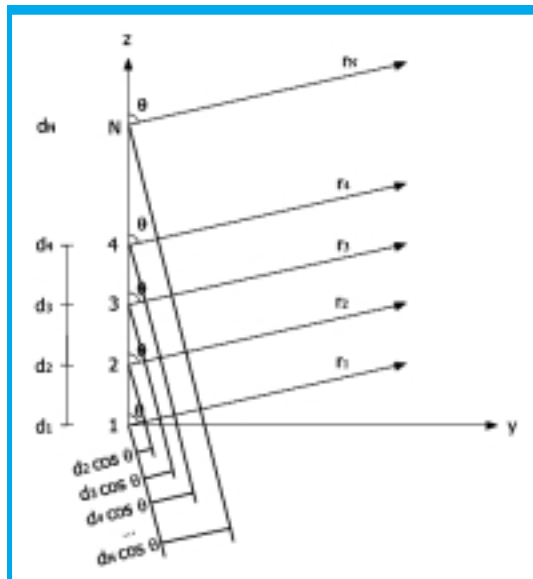


Figura 5. Geometría de Campo Lejano para un arreglo de fuentes isotrópicas de N elementos ubicado a lo largo del eje z separados una distancia no uniforme

En la Figura 5 se observa la geometría de campo lejano que se tiene para un arreglo lineal con diferentes separaciones entre los elementos que lo conforman. Sobre el punto (p) para el cual se

desea calcular el valor de la amplitud de campo eléctrico recaen los aportes de cada una de las contribuciones de campo eléctrico de cada elemento individual.

Como punto de referencia se toma al elemento colocado en el origen de los ejes, o referidos a la Figura 5, se toma al elemento que se encuentra en la parte inferior del arreglo. Su aporte es la primera componente de la sumatoria que permite calcular el factor de arreglo, de ahí en adelante los demás elementos presentan un desfase en la llegada de la señal al punto p que es producto de su ubicación espacial y del desfase propio en la alimentación entre cada elemento.

**Variación de la fase entre elementos adyacentes.** El primer análisis corresponde a los cambios que sufre la ecuación (8) cuando se altera el concepto de fase progresiva, planteado inicialmente. Para un arreglo con N elementos, con diferentes fases entre los mismos, la expresión para el factor de arreglo, puede ser escrita de la siguiente manera:

$$FA = 1 + e^{j(kd \cos \theta + \beta_2)} + e^{2j(kd \cos \theta + j(\beta_2 + \beta_3))} + \dots + e^{(N-1)j(kd \cos \theta + j(\beta_2 + \beta_3 + \dots + \beta_N))} \quad (9)$$

Lo cual muestra el aporte que entrega cada elemento al factor de arreglo, con un ajuste correspondiente a la diferencia en el desfase entre cada elemento. A medida que se toma un nuevo aporte, se tiene un valor acumulado en la fase con respecto al elemento de referencia, que se convierte en una sumatoria de cada una de las fases presentes entre los elementos.

Para simplificar esta expresión e indicar únicamente la variación relativa en la fase de alimentación con respecto a un arreglo con fase progresiva, se puede describir la ecuación (9) como sigue a continuación:

$$FA = 1 + e^{j(kd \cos \theta + \beta + \delta\beta_2)} + \dots + e^{2j(kd \cos \theta + \beta + j(\delta\beta_3))} + \dots + e^{(N-1)j(kd \cos \theta + \beta + j(\delta\beta_N))} \quad (10)$$

$$FA = \sum_{n=1}^N e^{j[(n-1)(kd \cos \theta + \beta) + \delta\beta_n]} \quad (11)$$

$$FA = \sum_{n=1}^N e^{j[(n-1)\psi + \delta\beta_n]} \quad (12)$$

La variación relativa en la fase de alimentación se hace con respecto a un arreglo de fase progresiva.

donde  $\delta\beta_1 = 0$ , esto quiere decir que no existe desfase del primer elemento con él mismo.

La ecuación (12) permite variar el ángulo de desfase entre elementos adyacentes sin que se pierdan las características para un arreglo de fase progresivo, que se puede obtener cuando se hace que la variación de fase sea cero,  $\delta\beta_n = 0$  en todos los elementos.

**Variación de la distancia entre elementos.** Cuando se altera la característica de un arreglo equidistante, se modifica también la respuesta general del factor de arreglo, para examinar los cambios que se presentan en la ecuación (8) con la alteración en la distancia que separa los elementos, sin perder generalidad en la ecuación, es necesario hacer un análisis especial, que permita modificar este parámetro. En primer lugar veamos como se puede realizar una segmentación en la distancia, que permita introducir los cambios en la ecuación sin mayores perturbaciones. Para un arreglo equidistante la separación entre elementos se denota por la letra  $d$  y ésta a su vez se expresa en términos de longitudes de onda ( $\lambda$ ) [7].

La idea es mover el elemento con respecto a su posición inicial, que es aquella que tendría si estuviera ubicado en un arreglo uniforme, una cierta cantidad que no permita que se crucen dos elementos en la misma posición, lo cual limita el rango de trabajo a unos intervalos no mayores a la distancia  $d$ , repartidos a lado izquierdo y derecho del punto original de cada elemento.

Con las condiciones anteriores, la variación para la distancia ( $\delta d_x$ ) estaría dada por la siguiente expresión  $\delta d_x = d\left(\frac{x}{m} - \frac{1}{2}\right)$  con  $x = (1, 2, \dots, m)$  y entonces:

$$\delta d_x = d\left(\frac{x}{m} - \frac{1}{2}\right) \quad (13)$$

donde  $d$  es la distancia entre elementos equidistantes,  $m$  es la cantidad de segmentos en los que se reparte la distancia y  $x$  es la ubicación en el segmento. Se necesita formular la distancia con respecto al primer elemento, que es el dispositivo de referencia, en función de las variaciones correspondientes, como se observa de la Figura 6b:

Al variar la distancia entre elementos se debe tener en cuenta que estos no se crucen.

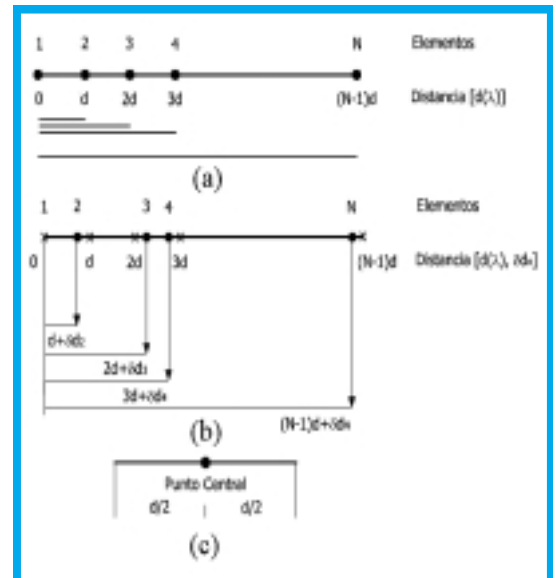


Figura 6. Separación entre elementos (a) arreglo lineal equidistante (b) arreglo lineal con perturbaciones en su separación (c) Rango de variación para la distancia

$$\begin{aligned} d_1 &= 0d + \delta d_1, & \text{distancia del elemento 1 al 1} \\ d_2 &= 1d + \delta d_2, & \text{distancia del elemento 2 al 1} \\ d_3 &= 2d + \delta d_3, & \text{distancia del elemento 3 al 1} \\ &\dots \\ d_N &= (N-1)d + \delta d_N, & \text{distancia del elemento N al 1} \end{aligned}$$

con  $\delta d_1 = 0$ , que indica que el primer elemento continua en la misma posición como referencia para calcular el patrón de radiación. Con las condiciones planteadas, es posible construir la ecuación que permite analizar el factor del arreglo

$$\begin{aligned} FA &= 1 + e^{j(kd_2 \cos \theta + \beta)} + e^{j(kd_3 \cos \theta + 2\beta)} + \dots + e^{j(kd_N \cos \theta + (N-1)\beta)} \\ FA &= 1 + e^{j(kd \cos \theta + \beta + k\delta d_2 \cos \theta)} + \\ &\quad + e^{j[2(kd \cos \theta + \beta) + k\delta d_3 \cos \theta]} + \dots \\ &\quad + e^{j[(N-1)(kd \cos \theta + \beta) + k\delta d_N \cos \theta]} \end{aligned} \quad (14)$$

agrupando los términos comunes y en forma de sumatoria

$$\begin{aligned} FA &= \sum_{n=1}^N e^{j[(n-1)(kd \cos \theta + \beta) + k\delta d_n \cos \theta]} \\ FA &= \sum_{n=1}^N e^{j[(n-1)\psi + k\delta d_n \cos \theta]} \end{aligned} \quad (15)$$

La ecuación (15) resume la expresión que permite evaluar un arreglo dispuesto de diferentes maneras a lo largo del eje  $z$ .

**Variación de la amplitud de corriente.** La variable que es más sencilla de manipular en la

Al variar cada parámetro junto con los algoritmos genéticos se logra mejorar las características del factor de arreglo.

ecuación general es la amplitud de la corriente que alimenta el circuito, ya que ésta amplitud se encuentra representada en la magnitud de las exponenciales que se presentan en la sumatoria. Se debe recordar que estos valores se encuentran normalizados individualmente, esto quiere decir que el máximo valor que toma cada factor es igual a la unidad, y por lo mismo el valor más alto que puede tomar el factor del arreglo es determinado por la cantidad de elementos que lo conforman.

Para este análisis, la salida final del factor de arreglo se toma en su valor normalizado, es decir, al resultado de la ecuación se lo divide por la cantidad de elementos que lo conforman, esta condición facilita el proceso de análisis y se puede compensar fácilmente colocando un amplificador en la salida del sistema de alimentación.

En la ecuación (8) el cambio en la amplitud se observa de la siguiente manera:

$$FA = \sum_{n=1}^N \alpha_n e^{j(n-1)\psi} \quad (16)$$

esto quiere decir que cada elemento de antena tiene una amplitud de corriente diferente que permite alcanzar una mayor o menor distancia en cada usuario.

**Variación General de los Parámetros.** Después de haber analizado la forma en que cada variable individual altera el comportamiento de la ecuación para un arreglo lineal de elementos, se puede elaborar a partir de la unión de las ecuaciones (12), (15) y (16) la expresión que puede ser empleada junto con los algoritmos genéticos para el mejoramiento de las características en el factor de radiación del conjunto.

$$FA = \sum_{n=1}^N \alpha_n e^{j[(n-1)\psi + k\delta d_n \cos \theta + \delta\beta_n]}$$

$$FA = \sum_{n=1}^N \alpha_n e^{j[(n-1)\psi + \delta\psi_n]} \quad (17)$$

donde

$$\psi = kd \cos \theta + \beta$$

$$\delta\psi_n = k\delta d_n \cos \theta + \delta\beta_n \quad (18)$$

Las alteraciones introducidas en el arreglo en amplitud de corriente, en fase y en distancia están constituidas por  $\alpha$ ,  $\delta\beta$  y  $\delta d$  respectivamen-

te, y se convierten ahora en las entradas para el algoritmo genético que buscará mejorar la forma del patrón de radiación total. Se tiene una estructura similar entre la ecuación general para un arreglo equidistante y la ecuación para un arreglo con fase, corriente y distancia modificados, únicamente aparece el término  $\delta\psi_n$  que es la perturbación del elemento  $\psi_n$  respectivo. Esto quiere decir que los cambios en la forma de salida del arreglo alteran simultáneamente la fase de cada uno de los apor-tes presentes en cada elemento.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Mejoramiento del factor de arreglo para un caso puntual

**Modificación de un único parámetro ( $\beta$  ó  $\alpha$  ó  $d$ ).** Un estudio preliminar implica el análisis de los cambios en cada uno de los parámetros que caracterizan un arreglo. Se plantea un estudio de cada variable de forma individual, para posteriormente llegar a un caso general de variación total de parámetros, encontrando aspectos positivos y negativos en cada uno de los casos planteados.

Para llevar a cabo este estudio, se planea obtener un diseño de arreglo que permita cumplir con un objetivo específico: radiar el mayor nivel de señal a un usuario al mismo tiempo que se mantiene un nivel bajo o nulo en una dirección determinada (ángulo de rechazo).

El movimiento de la fase  $\beta$  entre los elementos y en general de los parámetros de diseño implica un desplazamiento en la posición de lóbulo de máxima radiación, que en algunos casos no es el mismo ángulo del usuario, pero que permite incrementar la diferencia en relación al ángulo de rechazo. Un factor importante dentro del problema planteado es el relacionado con la inicialización de las variables, es decir, conocer cuales deben ser los valores más convenientes que debe tomar cada variable al inicio de la búsqueda por la mejor solución.

De la Tabla I, se puede inducir la manera en que pesa cada una de las variables en la obtención de resultados específicos, la más importante de todas es la fase de referencia  $\beta$ , que le imprime al diseño un punto de partida sobre el cual iniciar el proceso de búsqueda, disminuyendo el tiempo para llegar a una solución ajustada al diseño.

El factor de rechazo es la diferencia entre la amplitud de la señal que le llega al usuario y la del interferente.

El cálculo de la fase de referencia  $\beta$  se puede deducir de la relación para el ángulo de máxima radiación ( $\theta_{m\acute{a}x}$ )

$$\theta_{m\acute{a}x} = \cos^{-1} \frac{\beta}{kd} \quad (19)$$

Sin embargo el peso de cada variable es diferente, pues no todas afectan en la misma proporción la forma del patrón de radiación, siendo la de menores resultados la variación de la amplitud de la corriente  $\delta\alpha_n$ , que aplicada de manera individual o en forma conjunta con la variación de fase  $\delta\beta_n$  o distancia  $\delta d_n$  obtuvo consecuencias importantes para el cumplimiento de los objetivos.

Tabla I. Comparación de Resultados para cambios en los parámetros de un arreglo lineal.

| Técnica de Mejoramiento                                                | Factor de Rechazo (dB) | ángulo de radiación ajustado por la fase $\beta$ | Generación Máxima |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------|
| Arreglo Lineal Equidistante                                            | 11.4157                | 120°                                             | 1                 |
| Variación de Fase $\delta\beta_n$                                      | 27.8127                | 120°                                             | 1                 |
|                                                                        | 35.1299                | 120°                                             | 10                |
| Variación de Amplitud de Corriente $\delta\alpha_n$                    | 17.7793                | 100°                                             | 1                 |
|                                                                        | 21.6403                | 140°                                             | 1                 |
|                                                                        | 2.9144                 | 90°                                              | 1                 |
|                                                                        | 1.1998                 | 60°                                              | 1                 |
|                                                                        | 25.2903                | 120°                                             | 1                 |
|                                                                        | 30.5915                | 120°                                             | 10                |
|                                                                        | 28.2154                | 120°                                             | 1                 |
| Variación de la Separación $\delta d_n$                                | 39.2213                | 120°                                             | 10                |
| $\delta\beta_n$ y $\delta\alpha_n$                                     | 18.6322                | 120°                                             | 1                 |
| $\delta\beta_n$ y $\delta d_n$                                         | 28.6956                | 120°                                             | 1                 |
| $\delta\alpha_n$ y $\delta d_n$                                        | 18.4320                | 120°                                             | 1                 |
| $\delta\beta_n$ , $\delta\alpha_n$ y $\delta d_n$                      | 26.6878                | 120°                                             | 1                 |
| Condiciones: Ángulo de Radiación Deseado 120°<br>Ángulo de Rechazo 75° |                        |                                                  |                   |

La variación de la distancia  $\delta d_n$  que existe entre los elementos que forman el arreglo permite diseños adecuados por medio de un cambio físico y no eléctrico en el sistema, y su combinación con cambios de fase  $\delta\beta_n$  eleva el grado de eficiencia del diseño. Una de las desventajas que posee el modificar todos los parámetros de diseño en cada situación en particular, es el gasto computacional que acarrea modificar a través de los algoritmos genéticos cada variable, pues se hace necesario ejecutar el algoritmo de mutación y cruce en cada una de las poblaciones que representan las variables.

#### 4.2. Mejoramiento del factor de arreglo para todos los ángulos

El análisis no termina con el mejoramiento de un par de ángulos particulares, sino que por el contrario, encuentra su parte más interesante en

el estudio de diferentes combinaciones de pares de ángulos de máxima radiación y de rechazo.

Se define  $\theta_o$  como el ángulo del usuario, a  $\xi$  como el ángulo de rechazo o interferencia, y a  $\theta_{m\acute{a}x}$  como el ángulo de máxima radiación del factor de arreglo calculado. En la figuras 7 a 10, cada ángulo se toma en un intervalo de  $[0, 2\pi]$ . Para calificar el arreglo y realizar comparaciones entre diferentes tipos de configuraciones, se definen:

- **Factor de Rechazo.** Como se mencionó anteriormente, el factor de rechazo, es la diferencia (en dB) que existe entre las amplitudes de la señal en el ángulo de radiación deseado y ángulo de rechazo para el factor del arreglo.
- **Factor de Pérdida.** El factor de pérdida es la diferencia (en dB) entre la amplitud del máximo del factor de arreglo y el valor de la señal en el ángulo deseado.
- **Corrimiento de Ángulo.** Es la diferencia que se crea, por el empleo de algoritmos genéticos, entre el ángulo de máxima radiación y el ángulo de radiación deseado o del usuario.
- **Número de Máximos.** Indica la cantidad de lóbulos que poseen un valor de señal cercano al 0.1% del valor máximo de la señal.
- **Número de Lóbulos.** Es la cantidad de lóbulos que tiene el factor de arreglo.
- **Ancho del Haz.** El ancho del haz se toma como los ángulos para los cuales el valor de la señal se reduce en 3 dB en relación con la señal en el ángulo de radiación del usuario.
- **Fitness.** El fitness es una variable que utilizan los algoritmos genéticos para seleccionar y clasificar a la población que hace parte de estudio y mejoramiento. Para el caso específico, el fitness se toma como la suma de tres factores: La amplitud de la señal en el ángulo del usuario, el factor de rechazo y el corrimiento de ángulo.

*Comparación entre un arreglo uniforme y un arreglo con parámetros modificados por algoritmos genéticos.* Con la alteración de los parámetros en los arreglos convencionales se presentan alteraciones en las características generales del factor de arreglo. Se incrementa el promedio de cada parámetro de observación, como los 7.36 dB en el factor de rechazo que

indica que se radia una mayor cantidad de señal al usuario frente a la señal que recibe el interferente, este aumento en el promedio se logra gracias a que el sistema es capaz de rechazar a un grupo mayor de señales cercanas al ángulo de máxima radiación. La tabla que se muestra a continuación, resume los resultados obtenidos:

**Tabla II. Resultados entre un arreglo convencional y uno mejorado con algoritmos genéticos.**

| Característica (Promedio) | Arreglo Convencional | Arreglo Mejorado | Mejora   |
|---------------------------|----------------------|------------------|----------|
| Factor de Rechazo         | 9.6949               | <b>17.0532</b>   | 7.3583   |
| Factor de Pérdida         | <b>5.066e-5</b>      | 0.8444           | -0.8443  |
| Corrimiento de ángulo     | <b>0.44321</b>       | 14.2351          | -13.7918 |
| Número de Máximos         | 1.9141               | <b>1.7916</b>    | 0.1225   |
| Número de Lóbulos         | 3.5817               | <b>3.8600</b>    | 0.2783   |
| Ancho de Haz              | <b>107.8504</b>      | 107.8850         | -0.0346  |
| Fitness                   | 0.22411              | <b>0.23348</b>   | 0.00937  |

*Comparación entre arreglos lineales con un número de elementos diferente y ajuste en los parámetros.* Un estudio similar al planteado en la sección anterior se puede efectuar para arreglos que mantienen una separación de referencia de  $0.25 \lambda$ , pero que están conformados por un número de elementos diferentes. Los resultados obtenidos de esta simulación se visualizan en la Tabla III.

**Tabla III. Comportamiento frente a la cantidad de elementos que conforman el arreglo.**

| Característica (Promedio) | N = 2          | N = 4    | N = 8          |
|---------------------------|----------------|----------|----------------|
| Factor de Rechazo         | <b>20.211</b>  | 17.0532  | 17.0852        |
| Factor de Pérdida         | 1.6708         | 0.8444   | <b>0.68873</b> |
| Corrimiento de ángulo     | 38.6155        | 14.2351  | <b>9.2504</b>  |
| Número de Máximos         | <b>1.3560</b>  | 1.7916   | 1.8626         |
| Número de Lóbulos         | 1.9535         | 3.8600   | <b>6.1945</b>  |
| Ancho de Haz              | 185.5490       | 107.8850 | <b>60.4364</b> |
| Fitness                   | <b>0.23440</b> | 0.23348  | 0.23113        |

*Comparación entre arreglos lineales con separaciones diferentes entre elementos y ajuste en los parámetros.* A medida que se incrementa la separación ( $d$ ) de la distancia de referencia en la ecuación (15), la respuesta del sistema presenta algunos cambios que pueden ser de mayor o menor ayuda para algunos criterios de diseño.

**Tabla IV. Comportamiento frente a la separación relativa entre elementos que forman el arreglo**

| Característica (Promedio) | $d=0.25 \lambda$ | $d=0.50 \lambda$ | $d=0.75 \lambda$ |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Factor de Rechazo         | 17.05320         | <b>17.4990</b>   | 17.20800         |
| Factor de Pérdida         | <b>0.84445</b>   | 1.0619           | 1.04230          |
| Corrimiento de ángulo     | 14.23510         | <b>11.7549</b>   | 11.99710         |
| Número de Máximos         | <b>1.79160</b>   | 2.1010           | 3.41950          |
| Número de Lóbulos         | 3.86000          | 6.9515           | <b>9.90050</b>   |
| Ancho de Haz              | 107.88500        | 61.30270         | <b>44.33880</b>  |
| Fitness                   | 0.23348          | <b>0.235930</b>  | 0.23503          |

Al aumentar la separación entre los elementos se reduce el ancho de luz.

Cuando se extiende la separación relativa entre los elementos, se conservan algunas características, como por ejemplo, el factor de rechazo del arreglo, el factor de pérdida y el corrimiento del ángulo, que prácticamente no modifican sus promedios con los cambios efectuados. No obstante, la separación de  $0.50 \lambda$  tuvo la mejor respuesta en el factor de rechazo y para  $0.25 \lambda$  el corrimiento del ángulo indica que el máximo de la señal no se encuentra tan cerca del usuario. Las variaciones en la distancia contribuyen al incremento en el número de máximos que posee la señal en el factor de arreglo. Esta es una característica que permanece en relación a los arreglos convencionales. La ventaja más importante que se logra extendiendo la separación de referencia entre los elementos es la reducción del ancho del haz en cerca del 40% para incrementos de  $0.25 \lambda$ .

#### 4.3. Mejoramiento del factor de arreglo empleando algoritmos genéticos

Finalmente, después de aplicar el proceso de algoritmos genéticos a la población inicial con un ajuste de fase inicial, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Una mejor distribución de la potencia de transmisión, gracias a que el factor de rechazo se distribuye a lo largo de cada uno de los ángulos de máxima radiación.
- Se trasladan los valores nulos de la función para el patrón de radiación de un arreglo lineal, con el fin de suministrar la mayor cantidad de nivel de señal en la dirección del usuario y rechazar las señales interferentes provenientes de otros ángulos alrededor del punto máximo de radiación.
- De acuerdo a la forma en que la función de evaluación se defina, es posible mejorar características individuales, como por ejemplo el ancho del haz, la amplitud en el ángulo de máxima radiación, el factor de rechazo, etc.

A continuación se comparan los resultados para arreglos lineales convencionales contra arreglos obtenidos a partir de algoritmos genéticos.

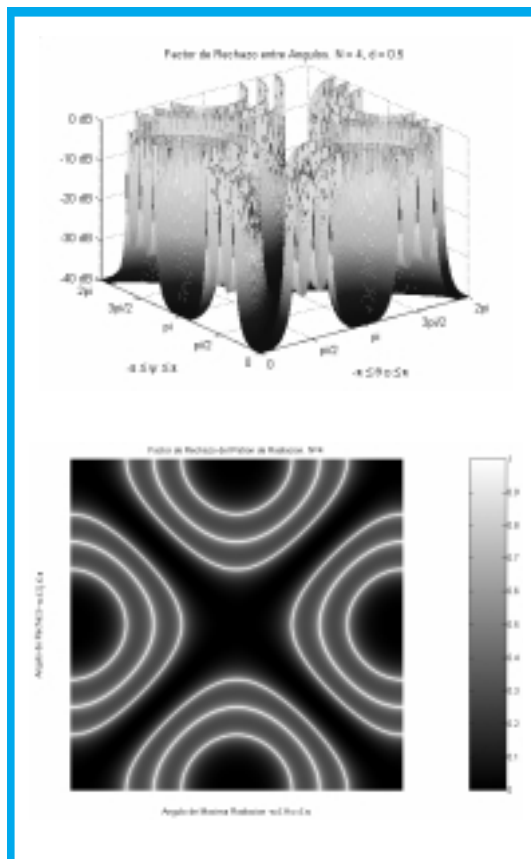


Figura 7. Factor de Rechazo de un arreglo convencional formado por 4 dipolos separados una distancia de  $0.50 \lambda$  con fase progresiva.

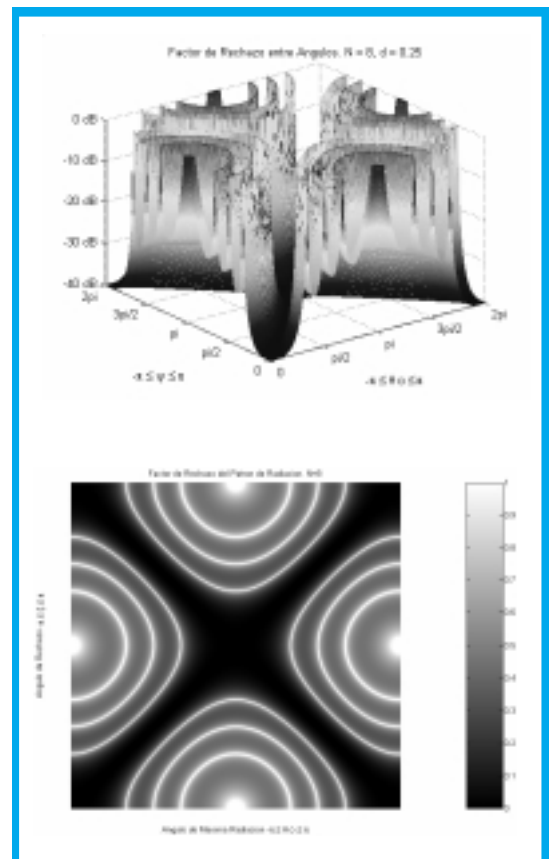


Figura 9. Factor de Rechazo de un arreglo convencional formado por 4 dipolos separados una distancia de  $0.25 \lambda$  con fase progresiva.

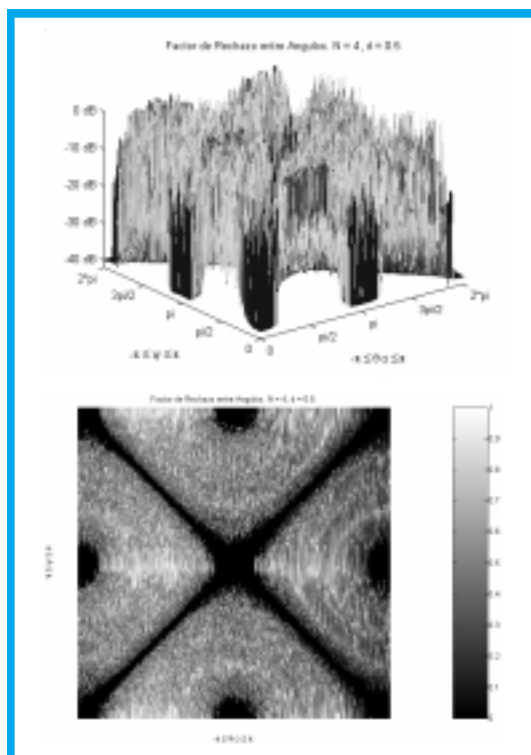


Figura 8. Factor de Rechazo de un arreglo formado por 4 dipolos separados una distancia de referencia de  $0.50 \lambda$  con fase progresiva optimizado con algoritmos genéticos

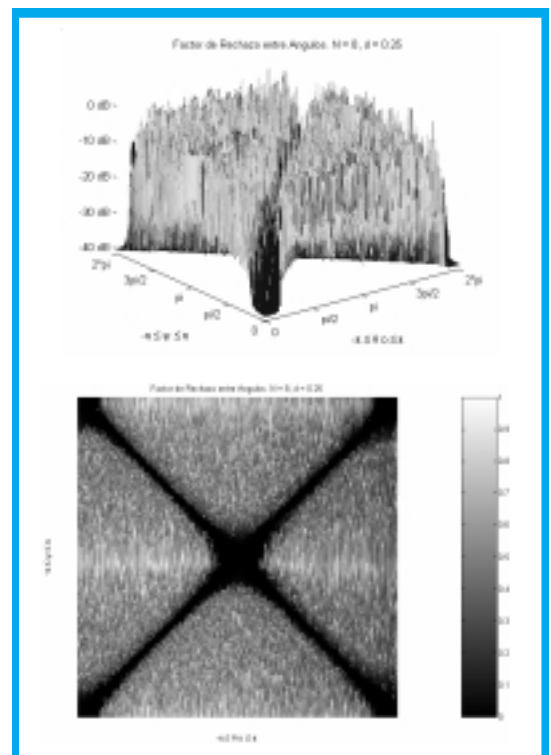


Figura 10. Factor de Rechazo de un arreglo formado por 4 dipolos separados una distancia de referencia de  $0.25 \lambda$  con fase progresiva optimizado con algoritmos genéticos

Con algoritmos genéticos se logra mejorar el factor de rechazo al compararlo con un arreglo de fase progresiva.

Utilizando la misma metodología se pueden trabajar arreglos con otras configuraciones geométricas.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- El valor máximo de radiación se reduce cuando la separación entre elementos es menor a  $0.50 \lambda$  para algunos valores de  $\beta$ . Exactamente en  $0.50 \lambda$  se tiene que para cada fase  $\beta$  colocada en el arreglo existe como máximo un par de ángulos de máxima radiación de la misma amplitud.
- El número de lóbulos principales se incrementa proporcionalmente a la distancia para intervalos superiores a  $0.50 \lambda$ .
- Con la introducción de los algoritmos genéticos a la variación de parámetros en un arreglo se obtiene una señal apropiada y de nivel superior a la mayoría de las demás señales en otras direcciones en las que el sistema no está interesado en enviar información.
- La variación conjunta de fase ( $\beta$ ) y distancia ( $d$ ) obtuvo, en promedio, los mejores resultados para las características de diseño planteadas.
- Cada parámetro ( $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $d$ ) tiene un conjunto discreto de valores, definidos en un intervalo propio de cada variable a fin de limitar el tamaño del conjunto solución. Para la fase es adecuado incluir un conjunto de valores que incluyan los ángulos fundamentales, como  $\pi/2$ ,  $\pi$  y  $3\pi/2$ .
- A partir de la 4ª y 8ª generación el algoritmo alcanzaba resultados que cumplían con los objetivos planteados de diseño, a excepción de aquellos ángulos que se encontraban cercanos al ángulo del usuario, y cuyo nivel variaba de acuerdo al ancho del haz y con ello dependía de la cantidad de elementos que formaran el arreglo.
- La interferencia producto de las señales alrededor del arreglo se reducen gracias al direccionamiento que se tiene del lóbulo de máxima radiación, sumado a la reducción de la recepción de la antena en ángulos sobre los cuales existe interferencia.

El estudio se puede extender a otro tipo de geometrías como por ejemplo arreglos circulares, rectangulares, elípticos o en general cualquier

geometría; analizando cada uno de estos sistemas en diferentes condiciones, como por ejemplo el cambio en el número de ángulos de interés y de rechazo, la exploración en el espacio alrededor de la antena en tres dimensiones. También, se pueden trabajar otros modelos diferentes a los algoritmos genéticos como las redes neuronales, la lógica difusa para obtener diseños específicos en un número reducido de ensayos o analizar los arreglos a partir de la teoría de elementos finitos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BALANIS C. Antenna Theory, analysis and design, 2 Edición, New York, Editorial Jhon Wiley & Sons, 1997.
- [2] KRAUS J. Antennas. McGraw Hill, New York, 1956.
- [3] JIMÉNEZ O. Introducción a la tecnología de Antenas Inteligentes. Aplicación a UMTS. <http://www.tid.es/presencia/publicaciones/comsid/esp/21/03.pdf>
- [4] GUERVOS J. Informática evolutiva: Algoritmos genéticos, <http://lgeneura.ugr.es/~jmerelo/ie/ags.htm>
- [5] GÓMEZ, J. Diseño de Antenas Yagi Uda usando algoritmos genéticos. Revista Ingeniería Universidad Distrital «Francisco José de Caldas» Facultad de Ingeniería. Vol. 8. No 2. Año 2003.
- [6] De la Herrán, M. Computación Evolutiva. <http://www.redcientifica.com/doc/doc199904260012.html>
- [7] BRAY, M. Optimization of Thinned Aperiodic Linear Phased Arrays Using Genetics Algorithms to Reduce Grating Lobes During Scanning. IEEE Transactions on antennas and propagation. Vol. 50. No. 12. Diciembre 2002.

### Mauro Flórez

Ingeniero Electrónico Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Estudios posdoctorales en Canadá. Ph.D, en Ingeniería de telecomunicaciones UTIM. Magister en Politología. Universidad Javeriana. Docente Investigador Universidad Nacional de Colombia. Co-Director Grupo de Investigación en Teleinformática GITUN.

### Martha Ruth Ospina

Ingeniera Electrónica Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Especialista en Telecomunicaciones Móviles Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Candidata a Magíster en Telecomunicaciones Universidad Nacional de Colombia. Profesora Asistente Facultad de Ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Directora del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad Distrital, GITUD. [mospina@udistrital.edu.co](mailto:mospina@udistrital.edu.co)

### William Francisco Galindo Cepeda

Ingeniero Electrónico Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Miembro del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la U.D., GITUD. Network Management Enginner. Huawei Technologies. Asistente de Salas Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Docente Colegio Superior de Telecomunicaciones. [wfgalindoc@udistrital.edu.co](mailto:wfgalindoc@udistrital.edu.co)