

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

GRADO EN FÍSICA

# Síntesis de diagramas de radiación mediante agrupaciones de antenas

*Autor:*

Eduardo Fernández Llorente

*Director:*

Juan Carlos Martín Alonso



1542

**Universidad**  
Zaragoza



Facultad de Ciencias  
**Universidad** Zaragoza



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivo</b>	<b>2</b>
<b>3. Fundamentos de antenas</b>	<b>2</b>
3.1. Campos radiados por una antena . . . . .	2
3.2. Agrupación de antenas . . . . .	4
<b>4. Algoritmo genético</b>	<b>5</b>
4.1. Conceptos generales y etapas del algoritmo . . . . .	5
4.2. Aplicación particular del algoritmo genético a antenas . . . . .	7
<b>5. Resultados</b>	<b>8</b>
5.1. Comprobación del funcionamiento del programa . . . . .	8
5.2. Antenas no equiespaciadas . . . . .	9
5.3. Agrupaciones con direccionalidad elevada . . . . .	11
5.3.1. Sectores angulares finos . . . . .	11
5.3.2. Sectores angulares anchos . . . . .	13
5.4. Diagrama de radiación menos exigente . . . . .	15
<b>6. Adaptación de una agrupación fija a diversas condiciones</b>	<b>17</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>21</b>



# 1. Introducción

Es una realidad que las antenas se han convertido en una parte esencial de nuestra sociedad moderna. Se pueden encontrar en cualquier parte, desde nuestros hogares, lugares de trabajo, medios de transporte o, incluso en los satélites que se envían al espacio. Frecuentemente, las llevamos encima en nuestros teléfonos móviles u ordenadores. Los avances tecnológicos van de la mano con las antenas [1].

La distribución espacial de la radiación emitida por cada antena es característica de cada modelo, y depende de propiedades como su geometría, o la colocación de sus terminales de alimentación. Sin embargo, en muchas ocasiones no existe en el mercado ninguna antena que proporcione la distribución de radiación que se necesita. La situación más adecuada para solucionar este problema suele ser utilizar agrupaciones de antenas [2].

Una agrupación de antenas consiste en un grupo de antenas dispuestas en diversas configuraciones espaciales que, con las amplitudes, desfases y distancias entre ellas adecuadas, sirven para dotar a la radiación de determinadas características. Es frecuente que estas características estén relacionadas con enviar la radiación del lóbulo principal en una dirección determinada, o que este cuente con determinada anchura. El campo electromagnético de la agrupación consiste en la suma de los campos electromagnéticos emitidos por cada antena. Esto se debe a la linealidad de las ecuaciones de Maxwell, lo que permite aplicar el principio de superposición [2].

Las agrupaciones de antenas son sistemas que tienen diversas aplicaciones. Una aplicación muy extendida es el diseño de emisores con muy alta directividad, que pueden cambiar la posición de su lóbulo principal modificando las amplitudes y las fases de cada una de sus unidades [1]. Esta posibilidad es especialmente interesante en radares [1]. Otra aplicación es la técnica de radioastronomía conocida como interferometría de muy larga base o VLBI, por sus siglas en inglés. Este tipo de interferometría consiste en la observación de objetos celestes utilizando un gran número de radiotelescopios, en ocasiones distribuidos por todo el planeta Tierra, funcionando juntos como un radiointerferómetro [3].

La distribución de la radiación emitida por una antena o agrupación se suele expresar mediante una función llamada diagrama de radiación, que más adelante se definirá. En el ámbito de antenas, se denomina síntesis a la determinación de la distribución espacial de las unidades de una agrupación y de la alimentación de cada una de ellas, de forma que el conjunto emita con un diagrama de radiación lo más parecido posible al previamente dado. Los métodos de síntesis han mostrado una constante evolución, sobre todo a partir de los años 70 del siglo XX, ya que previamente se usaban métodos analíticos, y actualmente se usan métodos numéricos. Existen numerosos métodos, como la síntesis de Fourier, la de Schelkunoff, la de Dolph-Chebyshev o el método de Woodward y Lawson [4]. La síntesis de diagramas de radiación sigue siendo actualmente objeto de investigación. Estos

problemas actualmente se abordan mediante técnicas de inteligencia artificial, lo que hace que, conforme se avanza en el desarrollo de este campo, se avanza en métodos de síntesis de antenas.

Para abordar el problema de optimización, se ha utilizado un tipo de algoritmo de inteligencia artificial llamado algoritmo genético. Este algoritmo se usa para abordar problemas de optimización global, es decir, trata de optimizar una función o conjunto de funciones en base a diferentes criterios, como pueden ser cotas, restricciones o variables de las propias funciones. Se fundamenta en el mecanismo de la selección natural, de la recombinación genética de cromosomas y de la evolución natural. Habitualmente se usa cuando el espacio de posibles soluciones es extremadamente alto [5]. La implementación de este tipo de algoritmos no suele resultar extremadamente difícil, además de que ya han sido utilizados previamente en la resolución de problemas de síntesis de antenas [6] [7]. Por todo ello se ha elegido el algoritmo genético para este trabajo.

## 2. Objetivo

El objetivo de este trabajo consiste en la elaboración de un programa de cálculo que resuelva problemas de síntesis de antenas. El programa toma como datos de entrada un diagrama de radiación como objetivo a calcular y los datos básicos de una agrupación de antenas: el número de radiadores, la distribución espacial de energía electromagnética de una antena individual y la distancia entre las antenas, en el caso de considerar una agrupación con antenas fijas. El algoritmo devuelve la relación de amplitudes y fases con las que alimentar cada uno de los elementos de la agrupación, de tal manera que el conjunto emita un diagrama de radiación lo más similar posible al deseado.

El método de optimización elegido para resolver el problema es el algoritmo genético. Se pone a prueba este método con diferentes diagramas de radiación como objetivos. Se usa siempre una agrupación lineal de antenas, es decir, las antenas se disponen alineadas sobre una recta.

## 3. Fundamentos de antenas

Una antena se define como la parte de un sistema emisor o receptor diseñada para radiar o recibir ondas electromagnéticas.

### 3.1. Campos radiados por una antena

Los campos eléctrico y magnético pueden expresarse en función de los potenciales escalar y magnético vector  $\phi$  y  $\vec{A}$ , respectivamente, del siguiente modo [2]:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi - j\omega\vec{A} \quad (3.1)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu}\vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (3.2)$$

Tanto en estas ecuaciones 3.1 y 3.2 como en las 3.4 y 3.3, y en el resto del desarrollo, se suponen dependencias armónicas con el tiempo para todas las magnitudes sujetas a dependencia temporal y usando fasores. La solución general de la ecuación de ondas para medios con fuentes, es decir, con densidad de carga  $\rho$  o densidad de corriente  $\vec{J}$ , vienen dados por los llamados potenciales retardados 3.4 y 3.3 [2]:

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{V'} \frac{\rho(\vec{r}')e^{-jkR}}{R} dv' \quad (3.3)$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{V'} \frac{\vec{J}(\vec{r}')e^{-jkR}}{R} dv' \quad (3.4)$$

Se ha usado que  $k$  es el número de ondas,  $\vec{J}$  es la distribución de corriente de la antena,  $\rho$  es la densidad de carga de la antena,  $V'$  es el volumen de la antena,  $\epsilon$  es la permitividad dieléctrica y  $\mu$  es la permeabilidad magnética. Las coordenadas primadas hacen referencia a la fuente y las coordenadas sin primar hacen referencia a los puntos donde se calculan los potenciales retardados. Además,  $R = |\vec{r} - \vec{r}'|$ . Utilizando las expresiones 3.2 y 3.1 se obtienen las expresiones exactas de los campos eléctrico y magnético, respectivamente. Se debe tener en cuenta que cada antena posee su distribución de corriente  $\vec{J}(\vec{r}')$ , que depende de la geometría de la propia antena y de la posición en la que se coloquen los contactos en la antena. La amplitud de  $\vec{J}(\vec{r}')$  depende de la alimentación de la antena, o lo que es lo mismo, de la potencia que se le suministre [8].

En teoría, conocidos  $\vec{J}(\vec{r}')$  y  $\rho(\vec{r}')$ , las ecuaciones 3.4 y 3.3 permiten obtener las expresiones de  $\vec{A}(\vec{r})$  y  $\phi(\vec{r})$ , y a partir de 3.2 y 3.1 se calculan los campos  $\vec{E}(\vec{r})$  y  $\vec{H}(\vec{r})$ .

En la práctica, resolver 3.4 y 3.3 resulta muy complejo. No obstante, en el caso de las antenas suele interesar el llamado campo lejano, es decir, las situaciones para las que  $r \gg \lambda$ . En estas condiciones, el cálculo de los campos radiados se simplifica. Se define el vector de radiación,  $\vec{N}$  como [8]:

$$\vec{N} = \int_{V'} \vec{J}(\vec{r}')e^{jk\vec{r}'} dv' \quad (3.5)$$

Una vez definido el vector de radiación, con sus coordenadas se pueden obtener expresiones sencillas para los campos eléctrico y magnético para la aproximación de campo lejano [8]:

$$E_\varphi = -j\omega\mu \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_\varphi(\theta, \varphi) \quad E_\theta = -j\omega\mu \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_\theta(\theta, \varphi) \quad (3.6)$$

$$H_\varphi = -jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_\theta(\theta, \varphi) \quad H_\theta = jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_\varphi(\theta, \varphi) \quad (3.7)$$

Es interesante destacar que el vector de radiación, 3.9, es la transformada de Fourier de la distribución de corriente de la antena. Por tanto, los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  son proporcionales a dicha transformada de Fourier.

El diagrama de radiación de la antena es la función que describe la amplitud de campo eléctrico en función de las coordenadas angulares, a una distancia fija de la antena dentro de la zona de campo lejano. Esta función se suele dar normalizada al valor máximo.

### 3.2. Agrupación de antenas

Las agrupaciones de antenas son grupos de antenas, generalmente idénticas, ordenadas en diversas configuraciones, con amplitud y fase adecuadas para obtener un determinado diagrama de radiación [2]. Una agrupación lineal de antenas consiste en una agrupación de antenas que se encuentran alineadas. En este trabajo se tomarán todos los radiadores como idénticos y todas las agrupaciones serán lineales. La densidad de corriente de una agrupación lineal puede expresarse como [9]:

$$\vec{J}(\vec{r}') = \vec{J}_u(\vec{r}') \otimes \sum_{i=0}^{n-1} A_i e^{j\xi_i} e^{jk\vec{r}'} \delta(\vec{r}' - \vec{x}'_i) \quad (3.8)$$

Donde  $\vec{J}_u(\vec{r}')$  es la distribución de corriente normalizada, característica del tipo de antena usada en la agrupación,  $\otimes$  es el producto de convolución,  $A_i$  es la amplitud de la señal de cada antena,  $\xi_i$  es la fase de la señal enviada por cada antena,  $\vec{x}'_i$  es el vector de posición de cada antena,  $\delta$  es la delta de Dirac y  $n$  el número de antenas. Las antenas se encuentran dispuestas sobre el eje  $x$ . Aplicando que la transformada de Fourier del producto de convolución de dos funciones es el producto ordinario de la transformada de Fourier de esas funciones, se obtiene el vector de radiación de la agrupación.

$$\vec{N} = TF[\vec{J}] = TF[\vec{J}_u] \cdot TF\left[\sum_{i=0}^{n-1} A_i e^{j\xi_i} e^{jk\vec{r}'} \delta(\vec{r}' - \vec{x}'_i)\right] \quad (3.9)$$

Se pueden observar dos factores en este vector de radiación. El primero de los factores es el vector de radiación de la antena individual,  $\vec{N}_u(\theta, \phi)$ . El segundo factor, una vez normalizado es el llamado factor de la agrupación,  $FA(\theta, \phi)$  [9].

$$FA(\theta, \varphi) = TF\left[\sum_{i=0}^{n-1} A_i e^{j\xi_i} e^{jk\vec{r}'} \delta(\vec{r}' - \vec{x}'_i)\right] = \sum_{i=0}^{n-1} A_i e^{j\xi_i} e^{jk\vec{x}'_i} \quad (3.10)$$

Se observa fácilmente que el tipo de antena utilizada sólo influye en el factor  $\vec{N}_u(\theta, \phi)$ , y que el factor de la agrupación,  $FA(\theta, \phi)$  depende únicamente de la geometría de la agrupación, de la distancia entre los elementos radiadores y de la distribución de amplitudes, siendo independiente del tipo de antena utilizada.



Gracias a la expresión 3.9 y según 3.6 y 3.7, la amplitud de los campos radiados a una distancia  $\vec{r}$  se pueden expresar como:

$$\left| \vec{E}(\theta, \varphi) \right| = \left| \vec{E}_u(\theta, \varphi) \right| \cdot |FA| \quad \left| \vec{H}(\theta, \varphi) \right| = \left| \vec{H}_u(\theta, \varphi) \right| \cdot |FA| \quad (3.11)$$

Por ello, el diagrama de radiación de la agrupación puede factorizarse como:

$$D(\theta, \varphi) = D_u(\theta, \varphi) \cdot |FA| \quad (3.12)$$

Donde  $D_u$  es el diagrama de radiación de la antena individual. Así, definido el diagrama de radiación buscado y la antena individual elegida, todo problema de síntesis queda reducido a determinar el factor de la agrupación:

$$|FA| = \frac{D(\theta, \varphi)}{D_u(\theta, \varphi)} \quad (3.13)$$

Para ello, se trabaja con características de la agrupación, y no de la antena individual elegida.

## 4. Algoritmo genético

### 4.1. Conceptos generales y etapas del algoritmo

El concepto de algoritmo genético hace referencia a una serie de algoritmos usados para obtener soluciones a problemas de optimización del mismo modo que en la naturaleza se optimiza la adaptación de una especie a su ecosistema mediante los mecanismos de selección natural.

En este apartado se explica en qué consiste el algoritmo utilizado, ilustrando las ideas generales del mismo, mediante la aplicación a la síntesis de diagramas de radiación con agrupaciones de antenas.

En todo problema de optimización se cuenta con una serie de parámetros a modificar para obtener un determinado objetivo. Cada combinación de diferentes valores de estos parámetros constituye un posible estado del sistema, más o menos adecuado al objetivo que se busca. En la terminología utilizada para los algoritmos genéticos, cada uno de los parámetros que se modifica constituye un gen. El valor de cada gen se codifica en binario, mediante una secuencia de bits  $b_n$  que cumplen la siguiente expresión [5].

$$q = \frac{q_{max} - q_{min}}{2^N - 1} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} 2^n b_n + q_{min} \quad (4.1)$$

donde  $q_{max}$  es el valor máximo del parámetro que se codifica,  $q_{min}$  es valor mínimo,  $N$  el número de bits por gen y  $b_n$  es el valor del bit binario, 0 o 1, en la posición  $n$  dentro

del gen. Para el caso de una agrupación de antenas lineales cuya posición se mantiene fija, cada antena se codifica con dos genes, uno de ellos hace referencia a la amplitud y el otro a la fase de alimentación. El conjunto de genes que codifican una posible solución del sistema se conoce como cromosoma, y se expresa como la secuencia binaria de todos los genes correspondientes.

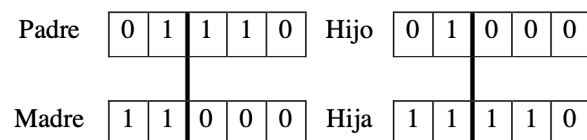
La adecuación de cada cromosoma al objetivo buscado se evalúa mediante una función de mérito. En el caso de la aplicación particular al diagrama de radiación de una agrupación de antenas, se cuenta con un diagrama de radiación objetivo, es decir, el diagrama de radiación que se desea obtener, y este diagrama se compara con el que genera la agrupación codificada en cada cromosoma. Si cada uno de los diagramas se discretiza para  $m$  ángulos, comparando cada uno de los valores deseados  $D_d(\varphi_j)$  con los conseguidos con el cromosoma  $D_c(\varphi_j)$ , se puede usar una función como la mostrada a continuación como función de mérito.

$$f = \sum_{j=1}^m (D_c(\varphi_j) - D_d(\varphi_j))^2 \quad (4.2)$$

Es fácil ver que cuanto menor sea el valor de  $f$ , mejor es la adecuación del cromosoma al objetivo. En realidad la función de mérito da una idea cuantitativa de la bondad de la solución en comparación con el objetivo, aunque puede ser engañosa a la hora de comparar soluciones de objetivos diferentes.

A continuación, se procede a explicar las diferentes etapas que sigue el algoritmo genético.

La primera etapa del algoritmo consiste en la generación de una población inicial de  $N_{cr}$  cromosomas. Habitualmente, la generación de estas cromosomas se realiza de manera aleatoria. A continuación, se evalúa cada una de las soluciones o cromosomas utilizando la función de mérito 4.2. Las peores soluciones, por ejemplo, las  $3N_{cr}/4$  peores, se eliminan, y se genera el mismo número de cromosomas de manera aleatoria, para mantener el número de posibles soluciones. A partir de las  $N_{cr}/4$  mejores soluciones, se obtienen otros  $N_{cr}/4$  cromosomas utilizando el operador recombinación. Este operador se aplica a parejas de cromosomas, donde con una probabilidad relativamente alta, se intercambia una parte de su cadena de bits a partir de una posición que se determina aleatoriamente. El resultado son dos nuevos individuos, tal y como se observa a continuación, en la figura 4.1.



**Figura 4.1:** Recombinación de cromosomas usada en el algoritmo [10]

Otra operación común en los algoritmos genéticos es la mutación, en la que se selecciona una posición dentro del cromosoma de manera aleatoria y se cambia su valor con una probabilidad baja. En este caso, si el valor es cero, se cambia por un uno y viceversa. Esto ayuda a que la solución no converja a mínimos locales [10]. Otra estrategia que se sigue es la denominada supervivencia del más fuerte, lo que quiere decir que cierto número de cromosomas con la menor función de mérito de la población pasan a la siguiente generación sin cruzarse [5]. Este proceso se itera hasta obtener una solución cuya función de mérito sea suficientemente baja.

## 4.2. Aplicación particular del algoritmo genético a antenas

En esta sección se proporciona información sobre el tipo de diagramas de radiación que se han tratado de obtener y sobre los detalles del algoritmo genético empleado, implementado en MATLAB.

Se han considerado antenas individuales con emisión isótropa, lo que quiere decir que  $D_u(\theta, \varphi) = 1 \quad \forall \theta, \varphi$ , por lo que el diagrama de radiación coincide con el factor de la agrupación, como se observa en la ecuación 3.13. En estas condiciones, toda agrupación lineal emite radiación con simetría de revolución en torno al eje de alineación de las antenas [9]. Por ello, se analiza únicamente la emisión en un semiplano limitado por dicho eje. El diagrama de radiación en 3 dimensiones puede deducirse por simetría de revolución. El desarrollo del algoritmo ha contado con 2 etapas. Primero se ha seleccionado una distancia entre las antenas fija, de tal manera que permanecen equidistantes en cada una de las soluciones. Después se permitió que cada antena se pudiese colocar independientemente de las demás, por lo que las antenas ya no tienen por qué estar a la misma distancia. De hecho, el parámetro posición de cada antena puede variar entre 0 y  $10\lambda$ , siendo  $\lambda$  la longitud de onda de trabajo. Es importante destacar que todos los cálculos se han realizado con distancias relativas a esta longitud de onda. De esta manera, todos los resultados cuentan con validez general, independientemente de la frecuencia de operación.

Cada uno de los genes se ha codificado con 8 bits. Esto quiere decir que las amplitudes de emisión de cada antena varían entre 0 y  $2^8$ , aunque posteriormente se procede a su normalización con respecto a la mayor amplitud obtenida. Para el caso de las fases, estas pueden tomar valores entre 0 y  $2\pi$  radianes. Tras diferentes pruebas, se ha decidido tomar una población inicial de 80 cromosomas, una probabilidad de cruce del 95%, una probabilidad de mutación del 5%. Esto es, a 5 de cada 100 cromosomas se les introduce una mutación. El 25% de los cromosomas con una mejor función de mérito sobreviven y se recombinan.

## 5. Resultados

Como se ha especificado previamente, se han elegido diferentes diagramas de radiación objetivo, de tal manera que el algoritmo encuentre valores de los parámetros de la agrupación de antenas que se permiten modificar que den soluciones con diagramas de radiación lo suficientemente parecidos al diagrama de radiación objetivo.

### 5.1. Comprobación del funcionamiento del programa

Este apartado está destinado a comprobar el funcionamiento del programa. Para ello, se ha elegido un diagrama de radiación objetivo resuelto en un libro de la bibliografía: Antenas [8], al que se hará referencia por nombre de su autor, Cardama. El diagrama de radiación cumple lo siguiente:

$$D_d(\varphi) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \varphi \leq 90^\circ \\ 0 & \text{si } 90^\circ < \varphi \leq 180^\circ \end{cases} \quad (5.1)$$

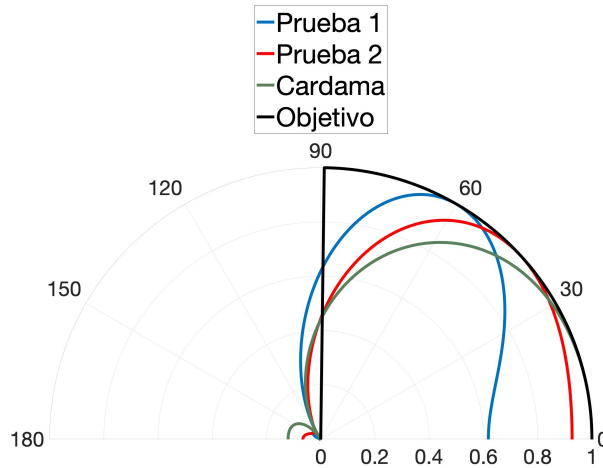
En este caso, se consideran 5 antenas y se realizan dos pruebas. En la prueba 1 se mantienen las antenas fijas y equidistantes, separadas una distancia  $d = \lambda/4$  y el desfase entre antenas consecutivas es  $\xi = -\pi/2$ , como en el Cardama. Se varían únicamente las amplitudes. En la prueba 2 se han obtenido soluciones propias variando también las fases de los elementos de la agrupación.

A continuación se muestran en la tabla 5.1 las soluciones obtenidas, junto con la solución del Cardama. En la figura 5.1 se observan los diagramas de radiación de las agrupaciones <sup>1</sup>.

Antena	Amplitudes relativas [Fase respecto a la antena 0]					Función de mérito
	0	1	2	3	4	
Solución Cardama	0	$2/\pi$	1	$2/\pi$	0	6.71
Prueba 1	0.407	0.706	1	0.698	0.411	8.19
Prueba 2	0.15 [0]	0.34 [0.12]	1 [5.15]	0.78 [3.79]	0.35 [2.46]	4.98

**Tabla 5.1:** Tabla comparativa de los resultados del Cardama [8] con los resultados propios de una agrupación de 5 antenas para el objetivo de la ecuación 5.1

<sup>1</sup>En todas las representaciones gráficas de los diagramas de radiación de este trabajo la escala del semicírculo da el ángulo en grados con respecto al semieje x positivo, sobre el que se alinean las antenas. Estas siempre se ordenan de manera que, a mayor índice, mayor coordenada x.



**Figura 5.1:** Comparación de los diagramas de radiación obtenidos con 5 antenas

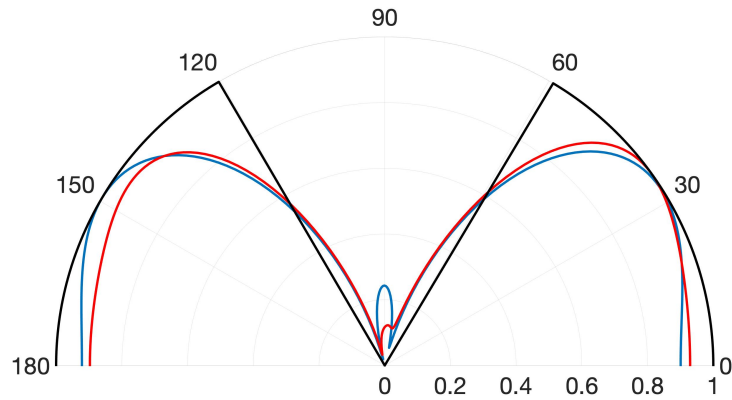
Se ve que la solución al añadir el grado de libertad correspondiente a las fases de las antenas la solución evaluada con la función de mérito es incluso mejor que la del Cardama. Así queda comprobado el correcto funcionamiento del programa. El tiempo de cálculo de la prueba 1 ha sido de 1 minuto, lo que ha supuesto 983 iteraciones. El tiempo de cálculo de la prueba 2 ha sido de 30 segundos, lo que ha supuesto 196 iteraciones. Para todos los cálculos del trabajo se ha utilizado un MacBook Pro de 2019 de 13 pulgadas, con un procesador Intel Core i5 de 4 núcleos (1.4 GHz).

Cabe destacar que la solución para cada uno de los casos no es el diagrama de radiación, son los valores de amplitudes, fases y posiciones de cada una de las antenas. Sin embargo, en una memoria de 25 páginas no se pueden plasmar todos los resultados, ya que no hay espacio (más adelante se analizan diagramas de hasta 100 antenas). Por ello, se mostrarán sólo las representaciones gráficas de los diagramas de radiación, junto con sus respectivas funciones de mérito, que es lo importante para evaluar la solución.

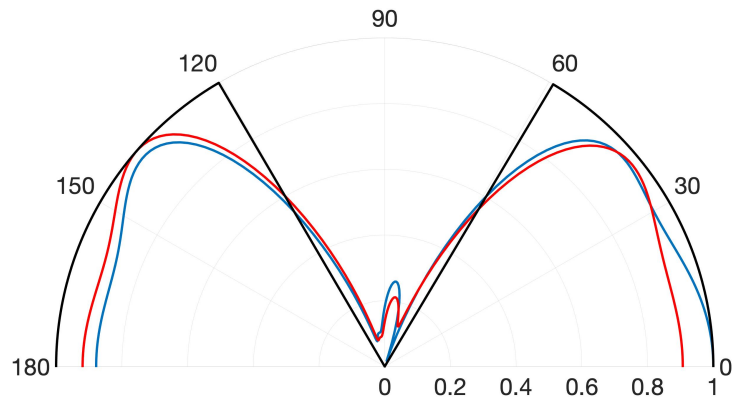
## 5.2. Antenas no equiespaciadas

A continuación, se decidió probar un objetivo más complejo, con un factor de agrupación uniforme desde  $0^\circ$  hasta  $60^\circ$  y desde  $120^\circ$  hasta  $180^\circ$ , siendo nulo para el resto de ángulos. Además, se ha añadido un grado de libertad a cada antena, su posición. Esto ha supuesto añadir un gen más por antena.

Los siguientes diagramas de radiación se han obtenido para agrupaciones con 5, 11, 20 y 70 antenas, mostrados en la figura 5.2. En la tabla 5.2 se muestran los valores de función de mérito, tiempo de cálculo y número de iteraciones que el programa utiliza para converger a las soluciones mostradas.



(a) Diagramas de radiación: objetivo (negro), y obtenidos con 5 (azul) y 11 (rojo) antenas



(b) Diagramas de radiación: objetivo (negro), y obtenidos con 20 (azul) y 70 (rojo) antenas

**Figura 5.2:** Diagramas de radiación con antenas no equiespaciadas

Número de Antenas	Función de mérito	Tiempo de cálculo	Número de iteraciones
5	6.48	11 minutos	6996
11	6.00	4 horas	124284
20	5.56	9 horas	127853
70	5.53	18 horas	134185

**Tabla 5.2:** Datos de los cálculos de este apartado en función del número de antenas

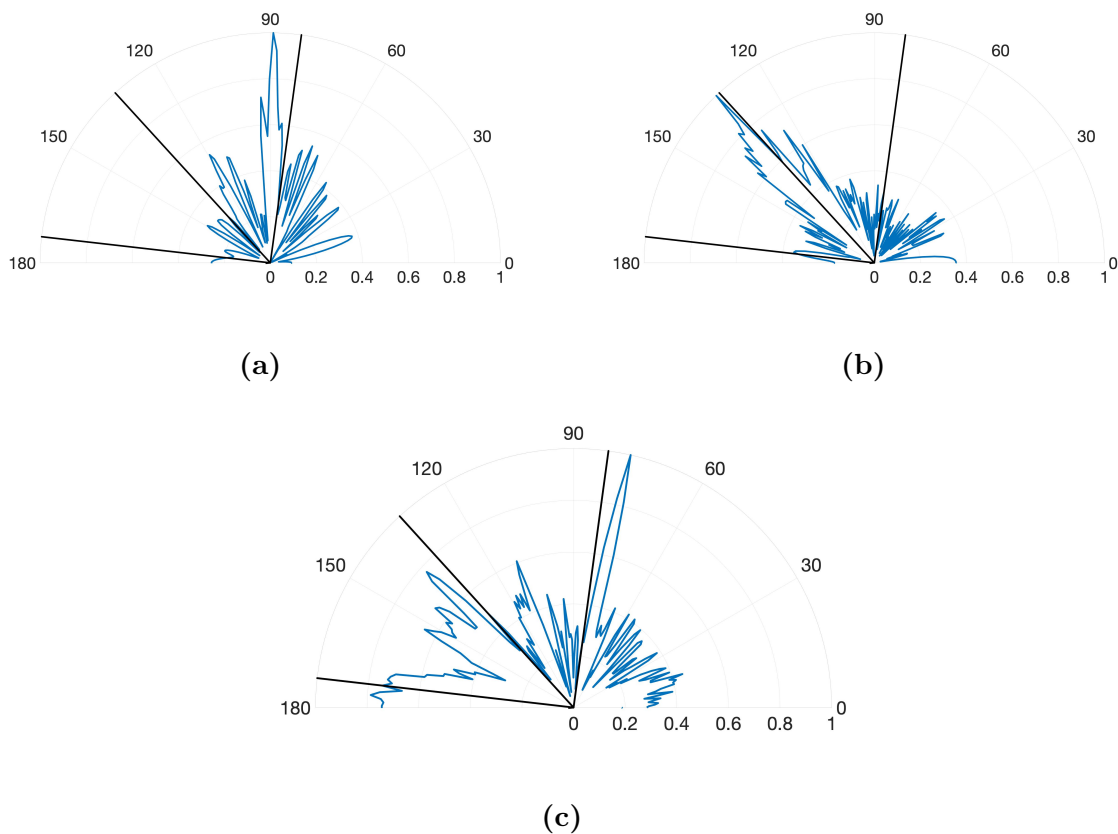
A la vista de la tabla 5.2, pasar de 5 a 11 o de 11 a 20 antenas supone una mejoría apreciable en la función de mérito obtenida. Sin embargo, el aumento de 20 a 70 antenas apenas mejora el diagrama de radiación. La decisión sobre el número de antenas depen-

dería de criterios económicos, pero parece que en este caso no aporta una mejora notable configurar más de 20 antenas.

### 5.3. Agrupaciones con direccionalidad elevada

#### 5.3.1. Sectores angulares finos

Se analiza en esta sección la probabilidad de confinar la radiación en diferentes sectores angulares estrechos. Para ello, se generan aleatoriamente 3 valores entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , que definen 3 direcciones de  $1^\circ$  de anchura en la zona superior del diagrama polar. El diagrama de radiación objetivo consiste en dar valor unidad a esas 3 direcciones, siendo nulo para el resto de direcciones angulares. Se continúa usando la función de mérito que aparece en la ecuación 4.2. A continuación en la figura 5.3 se muestran los diagramas de radiación objetivo, junto con los diagramas conseguidos con agrupaciones de 20, 70 y 100 antenas, y en la tabla 5.3 sus funciones de mérito y tiempo de cálculo.



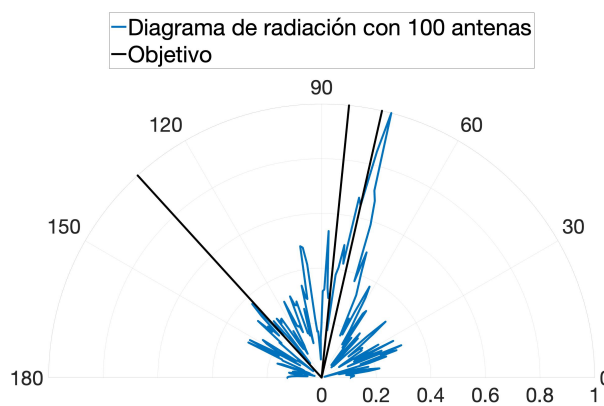
**Figura 5.3:** Diagramas de radiación conseguidos con 20 (a), 70 (b) y 100 antenas (c) en azul, junto con el objetivo en negro

Número de Antenas	20	70	100
Función de mérito	18.76	18.80	26.46
Tiempos de cálculo	1 hora 15 minutos	1 hora 45 minutos	3 horas

**Tabla 5.3:** Valores de la función de mérito para 20, 70 y 100 antenas

Es obvio que los resultados quedan alejados del objetivo. Resulta especialmente llamativo el caso en el que se utilizan 100 antenas, que proporciona la peor función de mérito y necesita el mayor tiempo de cálculo. No obstante, es el único caso de los 3 que cuenta con 3 máximos cercanos a las 3 direcciones observadas en el diagrama de radiación objetivo.

Se probó otra vez el cálculo para otros 3 ángulos aleatorios diferentes. A continuación se muestra el resultado obtenido para este nuevo objetivo. Se ha probado únicamente con 100 antenas. Esto se basa en los resultados del apartado anterior, dando más importancia a la proximidad entre los máximos generados y los del objetivo que a la función de mérito.



**Figura 5.4:** Diagrama de radiación conseguido con 100 antenas

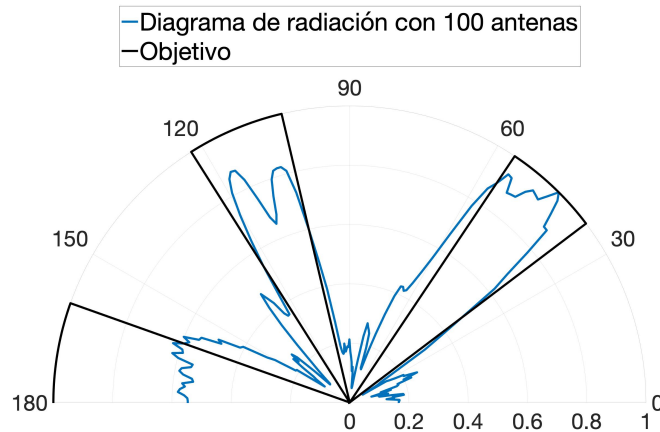
En este caso, los 3 ángulos generados para los que se querían orientar los lóbulos del diagrama se encuentran más próximos que en el caso de la figura 5.3. Tiene como valor de función de mérito  $f = 25,73$ . La representación gráfica del diagrama de radiación hace ver que la solución no es buena, porque sólo hay un máximo orientado próximo a una de las 3 direcciones en las que debería apuntar.

Como conclusión, con direcciones angulares de  $1^\circ$  de anchura, el sistema no proporciona soluciones suficientemente próximas al objetivo, o al menos el algoritmo no es capaz de encontrarlas. Pese a ello, la información obtenida de estos cálculos sí es interesante, ya que señala algunos límites del método empleado.



### 5.3.2. Sectores angulares anchos

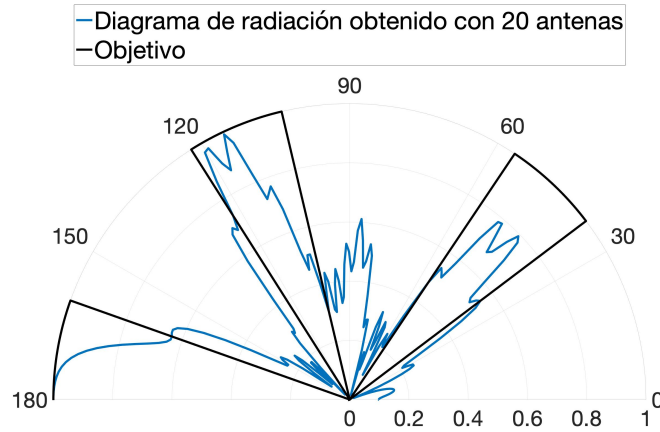
Visto que los sectores angulares estrechos, de  $1^\circ$  de anchura han resultado objetivos demasiado exigentes, se prueba una idea similar, aunque con sectores angulares más anchos, de  $20^\circ$  de anchura, también generados de manera aleatoria. Usando la función de mérito de la ecuación 4.2, sin ningún tipo de modificación, se ha obtenido el diagrama de radiación observado a continuación. Cabe destacar que se ha mantenido el criterio de usar 100 antenas.



**Figura 5.5:** Diagrama de radiación conseguido con 100 antenas

La función de mérito del diagrama de radiación representado en la figura 5.5 es  $f = 16,05$ . Para este objetivo, se ve que al tener unas direcciones angulares más anchas, el algoritmo es capaz de encontrar soluciones más aceptables. Aún así, fuera de los sectores angulares en los que se debe maximizar la radiación, esta es relativamente elevada, aunque se ha conseguido reducir en comparación con la elección del objetivo cuyos sectores angulares son de  $1^\circ$  de anchura. Como conclusión más positiva, se comprueba que sí es posible dirigir la mayor parte de la radiación hacia 3 sectores angulares, aunque estos no pueden ser tan estrechos como se desee; su anchura mínima tiene un límite.

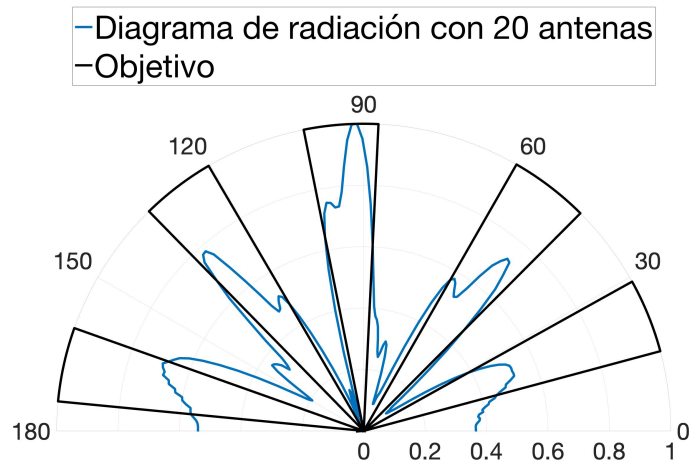
Una vez se ha comprobado que con 100 antenas se obtiene un diagrama de radiación similar al deseado, se ha decidido probar con un número inferior de antenas, particularmente se reduce a 20. En la figura 5.6 se muestra el diagrama de radiación obtenido.



**Figura 5.6:** Diagrama de radiación conseguido con 20 antenas

El diagrama de radiación representado en la figura 5.6 tiene como valor de función de mérito  $f = 18,27$ . Es algo superior al valor de función de mérito obtenido para diagrama de radiación representado en la figura 5.5, aunque si se llevase a cabo, se ha de tener en cuenta que la diferencia es relativamente pequeña, por lo que no es probable que por economía merezca la pena trabajar con 100 antenas en vez de con 20. Además, cabe destacar que la solución con 20 antenas se ha obtenido en una cuarta parte del tiempo que la solución con 100 antenas.

Por continuar explorando los límites del método, se planteó conseguir lóbulos del diagrama de radiación en más direcciones. Particularmente, se han generado 5 sectores angulares de manera aleatoria entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  de  $15^\circ$  de anchura con valor uniforme para el diagrama de radiación, siendo este nulo para el resto de direcciones. Para ello, se ha escogido una agrupación de 20 antenas, como en el caso anterior. En la figura 5.7 se observa el diagrama de radiación de la solución.

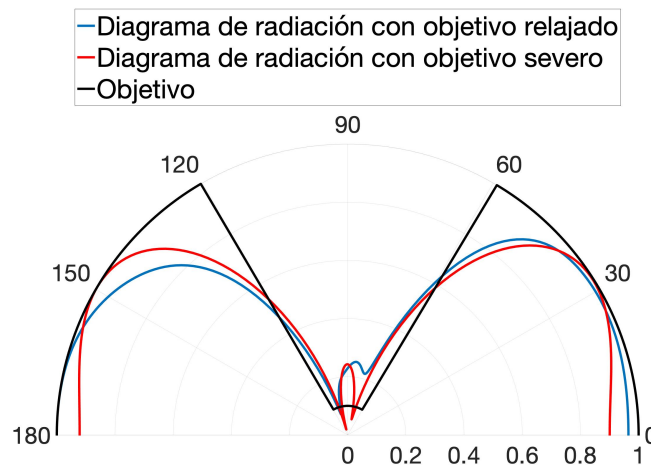


**Figura 5.7:** Diagrama de radiación conseguido con 20 antenas

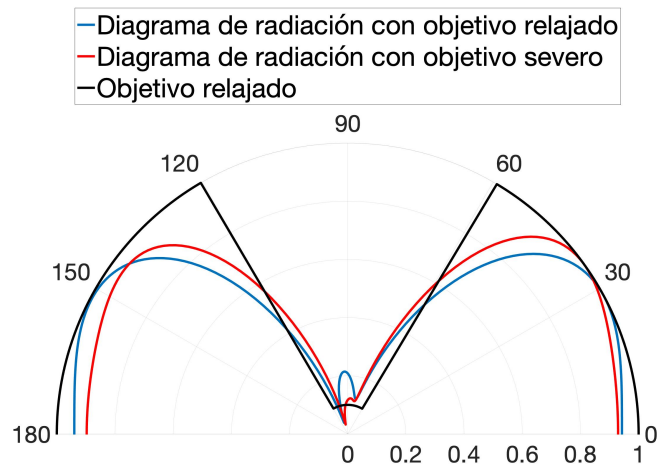
En la figura 5.7 se observa que usando únicamente 20 antenas se puede obtener el objetivo esperado, es decir que la radiación esté orientada en 5 direcciones diferentes y relativamente estrechas. Para cada dirección angular se ha conseguido que haya un máximo del diagrama de radiación obtenido. A pesar de que no todos los máximos tengan valor unidad, es importante saber que el algoritmo es capaz de encontrar soluciones que orienten la radiación en las direcciones esperadas, sobre todo con un número de antenas moderado y unas direcciones angulares relativamente estrechas. La función de mérito obtenida tiene valor  $f = 24,44$ , superior a las funciones de mérito obtenidas con 3 direcciones angulares objetivo anchas, aunque cualitativamente presenta los máximos en las regiones angulares correctas.

#### 5.4. Diagrama de radiación menos exigente

Como se ha observado en el apartado 5.3.1, plantear diagramas de radiación objetivo demasiado exigentes puede resultar contraproducente. Debido a esto, se planteó cómo puede llegar a cambiar la forma de trabajar del algoritmo cuando se sustituyen los valores nulos del diagrama de radiación objetivo por valores bajos, como 0,1 o 0,2. El propósito de esto es realizar una comparación de estos resultados con los obtenidos en el apartado 5.2. Se muestran los resultados obtenidos para 5 y 11 antenas en las figuras 5.8 y 5.9, respectivamente.



**Figura 5.8:** Diagramas de radiación conseguido con 5 antenas



**Figura 5.9:** Diagramas de radiación conseguidos con 11 antenas

En las tablas 5.4 y 5.5 se aportan los resultados de función de mérito y tiempo de cálculo, respectivamente.

	Objetivo severo (Sección 5.2 )	Objetivo relajado
5 antenas	6.48	5 7.27
11 antenas	6.00	6.77

**Tabla 5.4:** Comparación de funciones de mérito

	Objetivo severo (Sección 5.2)	Objetivo relajado
5 antenas	31 minutos	5 minutos
11 antenas	4 horas	12 minutos

**Tabla 5.5:** Comparación de tiempos empleados

Cabe destacar que los valores de función de mérito de la tabla 5.4 se han calculado con respecto al objetivo severo.

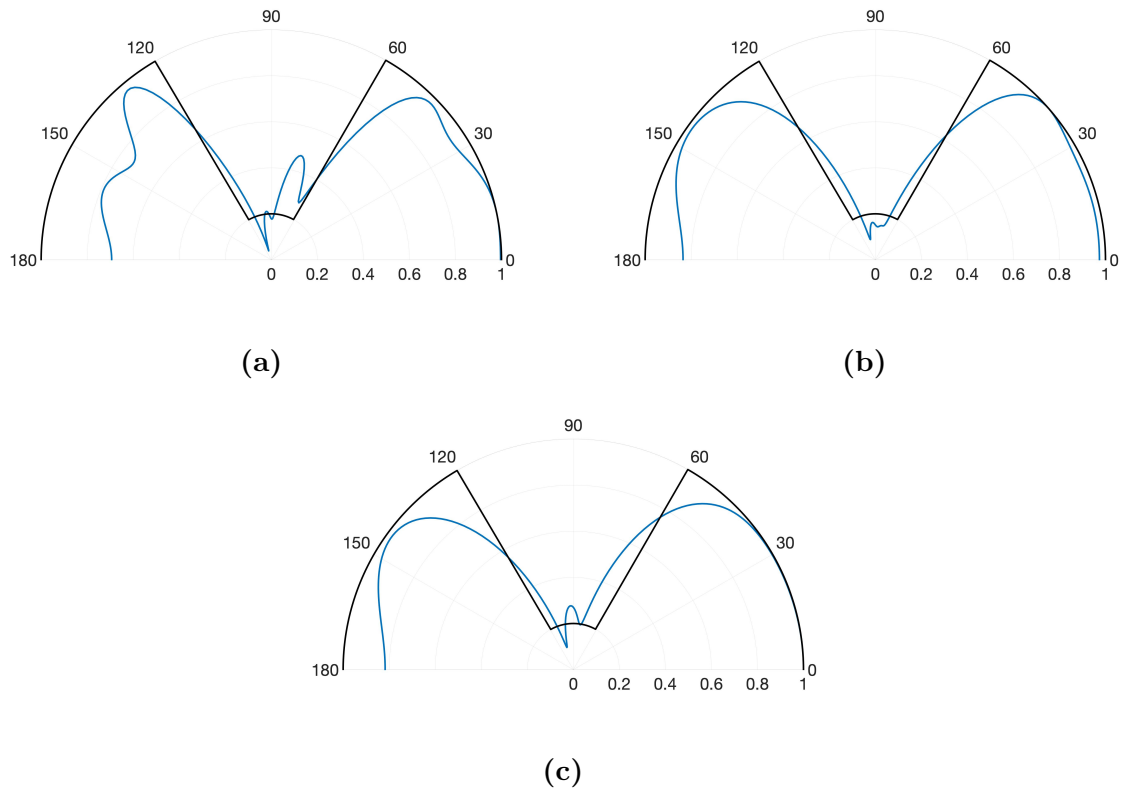
Los diagramas de radiación calculados con un objetivo relajado tienen peores funciones de mérito que los que se han calculado con el objetivo severo, aunque son diagramas aceptables.

Como se observa en la tabla 5.5, los tiempos de cálculo son considerablemente mejores. Para aplicaciones como las de la sección siguiente, en las que el tiempo de cálculo es crucial, se prefiere trabajar con un objetivo relajado.

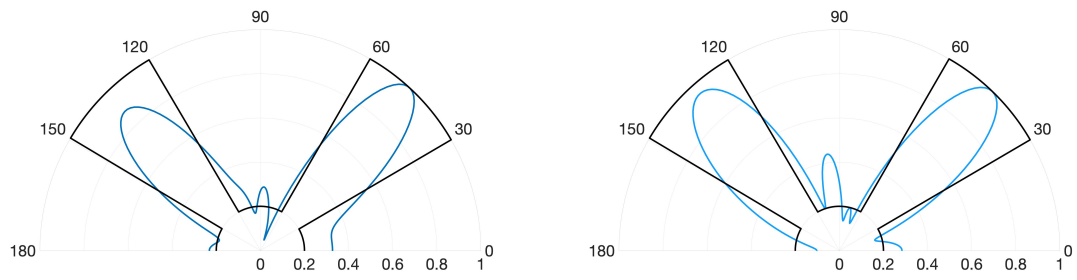
## 6. Adaptación de una agrupación fija a diversas condiciones

Una de las ventajas de las agrupaciones de antenas es su capacidad de proporcionar diversos diagramas de radiación sin necesidad de realizar ningún movimiento mecánico, simplemente modificando la alimentación de las antenas que la forman. En esta idea se basan las llamadas antenas adaptativas. Una antena adaptativa es una agrupación de antenas cuyo diagrama de radiación se modifica si el entorno cambia [11]. Se han propuesto como solución para optimizar el servicio de estaciones de telefonía móvil. De esta manera, se puede dirigir el diagrama de radiación hacia los usuarios conectados en cada momento [12]. La idea de la implementación de estos sistemas consistiría en orientar el diagrama de radiación emitido para que, en función de las necesidades en cada momento, el programa realizado en este trabajo calcule las alimentaciones más adecuadas de cada una de las unidades que forman parte de la antena adaptativa. En este caso se las llama antenas inteligentes, ya que serían capaces de cambiar su diagrama de radiación de manera autónoma [13].

Las torres de telecomunicaciones cuentan habitualmente con una agrupación de 16 antenas [14]. Se considera la agrupación lineal equiespaciada. Se han elegido 3 diagramas de radiación objetivo, y para cada uno de ellos se mostrará una prueba con 3 distancias diferentes entre antenas consecutivas:  $\lambda/4$ ,  $\lambda/6$  y  $\lambda/8$ . Los resultados obtenidos se muestran en los diagramas de radiación que se muestran en las figuras 6.1, 6.2 y 6.3, y en la tabla 6.1.

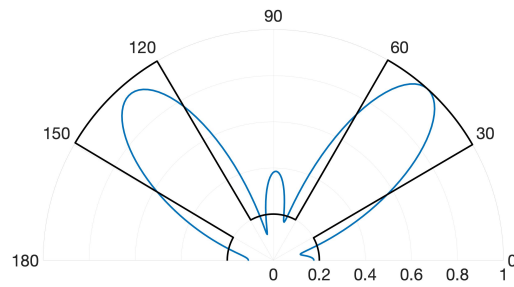


**Figura 6.1:** Diagramas de radiación para el primer objetivo: dos direcciones angulares anchas. Se han representado 3 distancias:  $d = \lambda/4$  (a),  $d = \lambda/6$  (b) y  $d = \lambda/8$  (c)



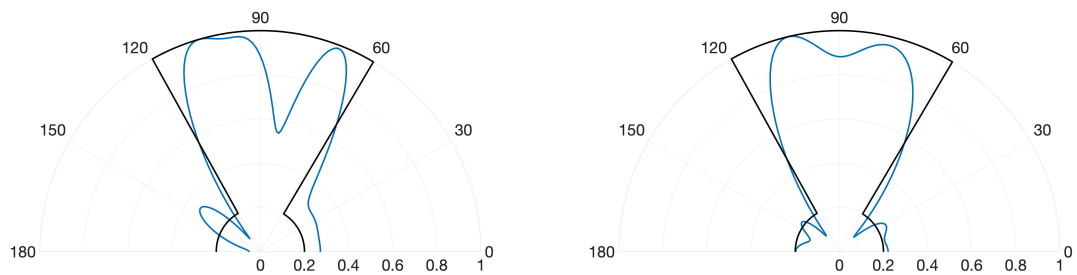
(a)

(b)



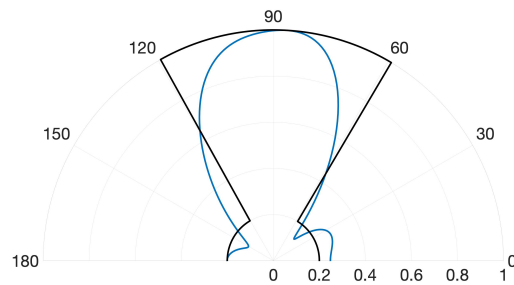
(c)

**Figura 6.2:** Diagrama de radiación para el segundo objetivo: dos direcciones angulares estrechas. Se han representado 3 distancias:  $d = \lambda/4$  (a),  $d = \lambda/6$  (b) y  $d = \lambda/8$  (c)



(a)

(b)



(c)

**Figura 6.3:** Diagrama de radiación para el tercer objetivo: una dirección angular ancha. Se han representado 3 distancias:  $d = \lambda/4$  (a),  $d = \lambda/6$  (b) y  $d = \lambda/8$  (c)

	$\lambda/4$		$\lambda/6$		$\lambda/8$	
	Función de mérito	Tiempo de cálculo	Función de mérito	Tiempo de cálculo	Función de mérito	Tiempo de cálculo
Objetivo 1	5.79	8 minutos	3.02	5 minutos	4.08	20 segundos
Objetivo 2	5.98	11 minutos	5.56	4 minutos	6.40	40 minutos
Objetivo 3	4.87	20 minutos	4.23	13 minutos	3.81	5 segundos

**Tabla 6.1:** Valores de función de mérito y tiempo de cálculo para cada uno de los diagramas de radiación de las figuras 6.1, 6.2 y 6.3

De acuerdo con el apartado anterior, las zonas del diagrama de radiación objetivo cuyo valor es 0,2 se corresponden con las zonas en las que interesa no tener radiación. Se recuerda que esto se ha hecho porque el algoritmo converge a una solución más rápido que si su valor es nulo, aunque los valores de las funciones de mérito se han calculado con el objetivo severo.

Si se analizan los casos de  $d = \lambda/4$  y  $d = \lambda/6$ , se puede observar que cuando  $d = \lambda/6$ , el programa converge a una solución cuya función de mérito es menor y le ha tomado menos tiempo encontrarla. Para el caso de antenas separadas una distancia  $d = \lambda/8$ , los tiempos para resolver los objetivos 1 y 3 son considerablemente más bajos que para resolver estos objetivos con las otras dos distancias. Sin embargo, para obtener la solución para el segundo objetivo, el programa requiere mucho más tiempo de cálculo hasta encontrar la solución, y la función de mérito es peor que para los otros casos, por lo que puede parecer bastante buena distancia entre antenas consecutivas en un principio, pero es necesario tener un buen muestreo de lo que le cuesta encontrar soluciones al algoritmo a la hora de separar las distancias.

A la vista de los resultados, no es evidente decidir cuál de las 3 distancias entre antenas consecutivas resulta la mejor elección. Parece claro que  $d = \lambda/6$  resulta siempre mejor que  $d = \lambda/4$ . La distancia  $d = \lambda/8$  puede dar lugar a casos en los que se alargue mucho el cálculo de un resultado, lo que podría resultar un problema. En todo caso, para tomar una decisión más acertada de distancia entre antenas se debería contar con un mayor número de casos a comparar.



## 7. Conclusiones

Se ha realizado un programa de cálculo propio en MATLAB que permite resolver casos de síntesis de diagramas de radiación haciendo uso de agrupaciones lineales de antenas con fases y amplitudes de alimentación variables. En algunos casos, la posición de cada antena también queda como un grado de libertad más para cada antena. La resolución de este problema se ha abordado en este trabajo utilizando un algoritmo usado en problemas de optimización, el algoritmo genético.

El programa elaborado se ha puesto a prueba con diferentes diagramas de radiación objetivo. En la mayoría de casos, el programa genera soluciones aceptables invirtiendo tiempos de cálculo moderados (segundos o minutos, en el ordenador del que se disponía).

No obstante, cuando se busca confinar la radiación en sectores angulares estrechos ( $^{\circ}$  de anchura), el método no proporciona soluciones apropiadas. Estos resultados dan idea de los límites del método.

Se ha observado que para encontrar una solución ante un objetivo, a veces es conveniente programar otro objetivo menos exigente que el que se quiere alcanzar, para que la búsqueda resulte más rápida.

Para una antena de 16 antenas equiespaciadas se ha analizado su capacidad de adaptación a diferentes diagramas de radiación, considerando 3 distancias entre antenas consecutivas:  $d = \lambda/4$ ,  $d = \lambda/6$  y  $d = \lambda/8$ . Se valora positivamente la capacidad de adaptación observada. Para decidir la distancia entre antenas consecutivas más conveniente, sería necesario realizar más pruebas.

## Referencias

- [1] J. D. Kraus y D. A. Fleisch, “Electromagnetics: With Applications”, *McGraw Hill International, Chapter*, vol. 2, 1999.
- [2] D. K. Cheng, “Field and Wave Electromagnetics”, *IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter*, vol. 28, 2 1986, ISSN: 21680329.
- [3] A. Jaradat, F. Jaron, J. Gruber y A. Nothnagel, “Considerations of VLBI transmitters on Galileo satellites”, *Advances in Space Research*, vol. 68, 3 2021.
- [4] C. A. S. F., M. F. Bataller, A. V. Nogueira y J. N. P. Z., “Síntesis de diagramas de radiación con agrupaciones circulares de antenas aplicables en sistemas umts 3g”, *Universidad Politécnica de Valencia*, 2002.
- [5] J. A. Pros y A. A. Linares, “Optimización de antenas mediante algoritmos genéticos”, *Universitat Oberta de Catalunya*, 2014.
- [6] L. Zen, Z. L. Yu, W. Ser y W. Cen, “Linear Aperiodic Array Synthesis Using an Improved Genetic Algorithm”, *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, 2012.
- [7] D. Marcano y F. Duran, “Synthesis of antenna arrays using genetic algorithms”, *IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION MAGAZINE*, 2000.
- [8] Á. Cardama, A. Lluís, J. Roca y col., “Antenas EDICIONS UPC”, *460*, vol. 2, 2002.
- [9] C. A. Balanis, “Antenna Theory: Analysis and Design, Fourth Edition”, *John Wiley Sons, Inc.*, 2016.
- [10] P. T. Rodríguez-Piñero, “Introducción a los algoritmos genéticos y sus aplicaciones”, *Universidade da Coruña*, August 2013 2013.
- [11] C. G. Mansilla, E. M. Brandau y N. F. Morineau, “Antenas inteligentes y su desempeño en redes wireless”, *Síntesis Tecnológica*, vol. 3, 2 2007.
- [12] P. Ortega, Ó. Enríquez y J. Morales, “Estudio de antenas inteligentes y principales aplicaciones en los sistemas de telefonía móvil”, *Escuela Politécnica Nacional*, 2005.
- [13] F. Gross, “Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB”, *McGraw-Hill*, 2005.
- [14] P. Gajewski, E. Sedek y Z. Bielecki, “Millimeter-wave MIMO radio channel sounder”, *Military University of Technology, Poland and Telecommunication Research Institute, Poland*, 2009.