

## Índice:

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Escenario.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Análisis teórico.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1</b>	<b>Teoría de antenas.....</b>	<b>4</b>
3.1.1	Introducción.....	4
3.1.2	Intensidad de radiación.....	5
3.1.3	Diagramas de radiación .....	6
3.1.4	Ganancia directiva y directividad .....	8
3.1.5	Polarización .....	9
3.1.6	Ecuación de transmisión de Friis .....	10
3.1.7	Conclusión .....	10
<b>3.2</b>	<b>Teoría de Beamforming.....</b>	<b>11</b>
3.2.1	Introducción.....	11
3.2.2	Factor de array y diagrama de radiación.....	12
3.2.3	Métodos de análisis y síntesis de arrays .....	13
3.2.4	Tiempo de vida de los sensores .....	14
3.2.5	Objetivo a conseguir con el beamforming.....	17
3.2.6	Conclusión .....	17
<b>3.3</b>	<b>Teoría de Algoritmos Genéticos .....</b>	<b>18</b>
3.3.1	Introducción.....	18
3.3.2	Adaptación de los algoritmos genéticos al proyecto .....	18
3.3.3	Conclusión .....	19

# **1 Introducción**

---

## 2 Escenario

---

### 3 **Análisis teórico**

---

Para comenzar el análisis teórico, es necesario comentar cómo se encuentra estructurado en este proyecto. En primer lugar, se comentará brevemente la teoría sobre antenas necesaria para entender la implementación práctica de este trabajo. Posteriormente, se explicará el Beamforming, que es la base para poder optimizar la energía consumida en las redes de sensores. A continuación, se explicará la teoría de los algoritmos genéticos, como modelo a usar para poder optimizar dicha energía.

#### 3.1 **Teoría de antenas**

En este apartado, se comentarán algunos de los parámetros más importantes que caracterizan a una antena; en concreto, se comentarán aquellos que sean útiles para el desarrollo de este proyecto, dejando de lado aquellos parámetros que tienen que ver con la circuitería para alimentar la antena, como la impedancia de antena, coeficiente de reflexión, razón de onda estacionaria, eficiencia de antena debida a la resistencia de radiación, etc.

##### 3.1.1 **Introducción**

Una antena forma parte de un sistema de radiocomunicación, por lo que interesará caracterizar dicho dispositivo con una serie de parámetros que la describan y permitan calcular el efecto que la antena producirá sobre el propio sistema de comunicación, o bien especificar el comportamiento que tendrá una antena específica cuando se integre en dicho sistema de comunicación.

Existe una gran diversidad de tipos de antenas, por lo que es necesario elegir un conjunto de parámetros que nos permitan caracterizar las propiedades más importantes de cada una de dichas antenas. Las características de las antenas dependen de la relación entre sus dimensiones y la longitud de onda de la señal de radiofrecuencia transmitida o recibida. Todos estos parámetros se encuentran recogidos en el estándar *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas* (IEE Std 145-1983).

Tal vez convendría diferenciar la definición de los parámetros según se relacionen con la transmisión o la recepción de la información. Sin embargo, debido al teorema de reciprocidad, puede establecerse una equivalencia entre antena en transmisión y antena en recepción.

A continuación, se describen los parámetros más importantes a tener en cuenta para el desarrollo del proyecto.

### 3.1.2 Intensidad de radiación

Una de las características fundamentales de una antena es su capacidad para radiar energía electromagnética con una cierta direccionalidad, por lo que será conveniente cuantificar este comportamiento con algún parámetro que nos permita poder comparar diferentes antenas.

El marco matemático en el que se encuadra cualquier parámetro asociado a las antenas, normalmente, es el sistema de coordenadas esférico, por lo que para especificar cualquier dirección espacial se utilizan los ángulos  $\theta$  y  $\phi$ .

Se define la densidad de potencia radiada como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección:

$$\vec{\wp}(\theta, \phi) = \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}) \Rightarrow |\vec{\wp}(\theta, \phi)| = \frac{E_{\theta}^2 + E_{\phi}^2}{\eta} [\text{W/m}^2]$$

La potencia total radiada se obtiene como la integral de la densidad de potencia en una esfera que encierre a la antena:

$$P_{rad} = \iint \vec{\wp}(\theta, \phi) \cdot d\vec{S}$$

Se define la intensidad de radiación como la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección por la antena:

$$K(\theta, \phi) = \wp(\theta, \phi) \cdot r^2 \quad [\text{W/estereorradián}]$$

De este modo, la potencia total radiada puede calcularse mediante la intensidad de radiación como:

$$P_{rad} = \iint K(\theta, \phi) \cdot d\Omega = \iint K(\theta, \phi) \cdot \sin \theta \, d\theta \, d\phi$$

donde  $d\Omega = dS/r^2 = \sin \theta \, d\theta \, d\phi$ .

Este parámetro posee la propiedad de ser independiente de la distancia a la que se encuentra la antena. En caso de que la fuente sea isótropa (no existe variación en  $\theta$  ni en  $\phi$ ), se tiene:

$$P_{rad} = \iint K \, d\Omega = K \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sin \theta \, d\theta \, d\phi = 4\pi K \Rightarrow K = \frac{P_{rad}}{4\pi}$$

A la hora de implementar mediante Matlab la potencia que radian las antenas de los sensores de este proyecto, se tendrá en cuenta su potencia total radiada, es decir, en todo momento se utilizará el parámetro  $P_{rad}$  [W]. Con el fin de hacer que los sensores sean lo más genéricos posibles, haremos que la potencia radiada por cada antena esté normalizada, de forma que cuando las antenas radien a la máxima potencia permitida, se tendrá:

$$P_{rad} = 1$$

### 3.1.3 Diagramas de radiación

El diagrama de radiación de una antena se define como la representación gráfica de las características de radiación en función de las coordenadas espaciales.

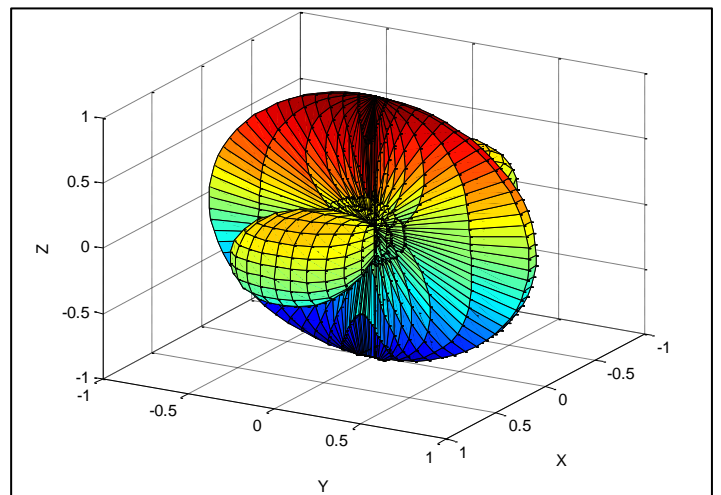
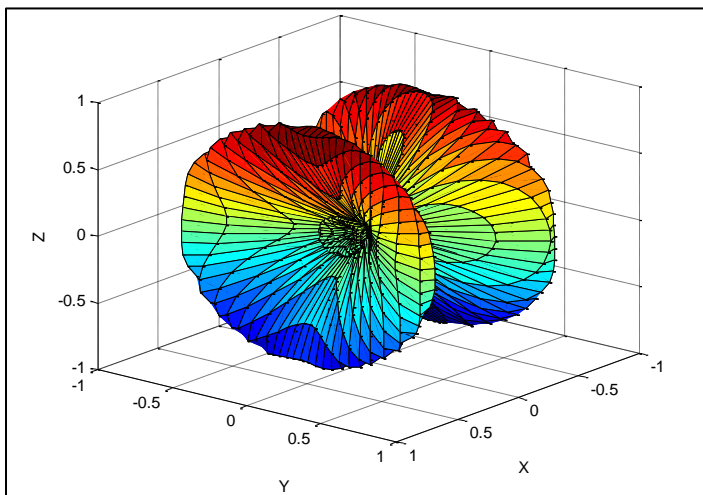
Las características de radiación que configura un diagrama o patrón de radiación suele hacerse en la región de campo lejano, donde la distribución espacial (angular) no depende de la distancia. Esta representación puede ser de campo eléctrico, magnético, de intensidad de radiación o de densidad de potencia radiada. Su representación, además, puede ser en escala lineal o en escala logarítmica (expresada en decibelios). En la representación en dB, los diagramas de radiación de campo y de potencia coinciden, dado que:

$$10\log\left(\frac{\langle\vec{P}\rangle}{\langle\vec{P}_{\max}\rangle}\right) = 20\log\left(\frac{|\vec{E}|}{|\vec{E}|_{\max}}\right)$$

La gráfica de la variación espacial de la relación entre la potencia recibida y la radiada a radio constante desde la antena se denomina diagrama de potencia, mientras que la representación de la magnitud de campo eléctrico (magnético) a radio constante desde la antena se denomina campo de amplitudes. También se puede representar la característica de radiación en términos absolutos (para un valor  $r = \text{cte}$ ), o relativos (normalizando el diagrama al valor máximo de la función que se quiera representar).

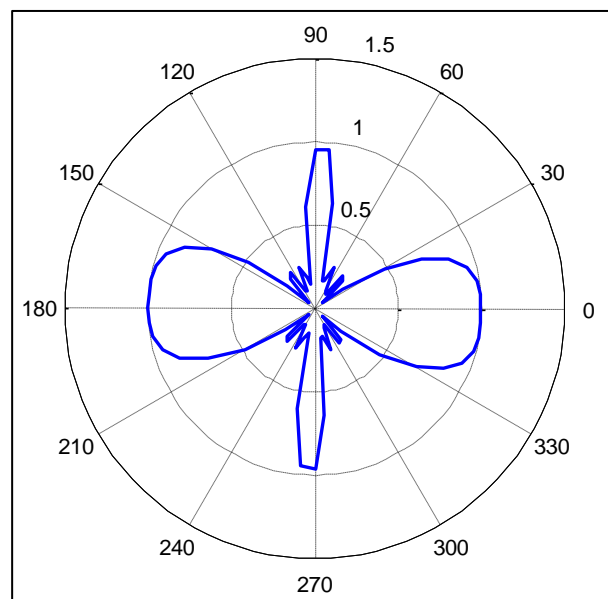
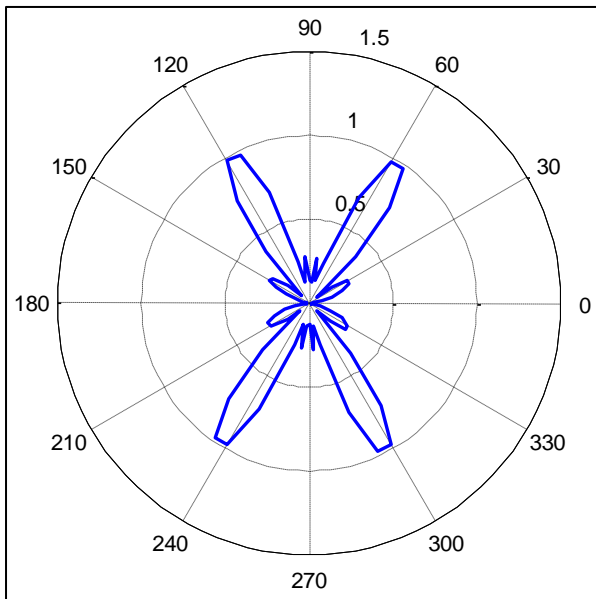
Respecto a su representación gráfica, los patrones de radiación se clasifican en: diagramas tridimensionales y diagramas bidimensionales.

En cuanto a los diagramas tridimensionales, se obtienen representando una de las magnitudes de radiación en función de las coordenadas espaciales (variando theta y phi). Este tipo de diagramas ofrecen una visión rápida de la forma en la que una antena confina la energía. Como inconveniente, este tipo de representaciones no permite evaluar cuantitativamente otros parámetros. A continuación se muestran un par de ejemplos de este tipo de diagramas:



En cuanto a los diagramas bidimensionales, se obtienen mediante la intersección de un diagrama tridimensional y un plano que, usualmente, suele ser el plano  $\theta = \text{cte.}$  o

el plano  $\phi = \text{cte}$ . La representación de estos diagramas suele hacerse en coordenadas cartesianas y escalas logarítmicas o en coordenadas polares. A continuación se muestran dos diagramas polares resultado de la intersección de los diagramas de las figuras anteriores y el plano  $\theta = 90^\circ$ .



Para antenas con diagramas directivos y polarización lineal, basta conocer los diagramas de los planos principales:

- Diagrama en el plano E: plano que contiene al vector campo eléctrico y la dirección de máxima representación (la representación se hace sobre  $\theta$  manteniendo  $\phi$  como constante).
- Diagrama en el plano H: plano que contiene al vector campo magnético y a la dirección de máxima radiación (se representa la magnitud del campo normalizado en función de  $\phi$  para  $\theta = \pi/2$ ).

Atendiendo a la forma del diagrama de radiación, las antenas pueden clasificarse en:

- Antenas isotrópicas: son aquellas cuya intensidad de radiación es igual en todas las direcciones del espacio. Estas son antenas no realizables (en una única antena), pero suelen servir como antenas de referencia. En la realización práctica de este proyecto, serán utilizadas como casos de estudio.
- Antenas omnidireccionales: son aquellas cuyo diagrama de radiación presenta simetría de revolución entorno a un eje.
- Antenas directivas: estas emiten y reciben de manera mucho más eficiente en una dirección que en las demás. Dentro de esta clasificación, se pueden tener las de tipo pincel, abanico, multihaz, entre otras. Para conseguir el objetivo propuesto en este proyecto, se tratará de hacer antenas lo más directivas posible en la dirección o las direcciones en las que se desee, con el fin de aumentar al máximo el tiempo de vida de la batería que alimenta dichas antenas.

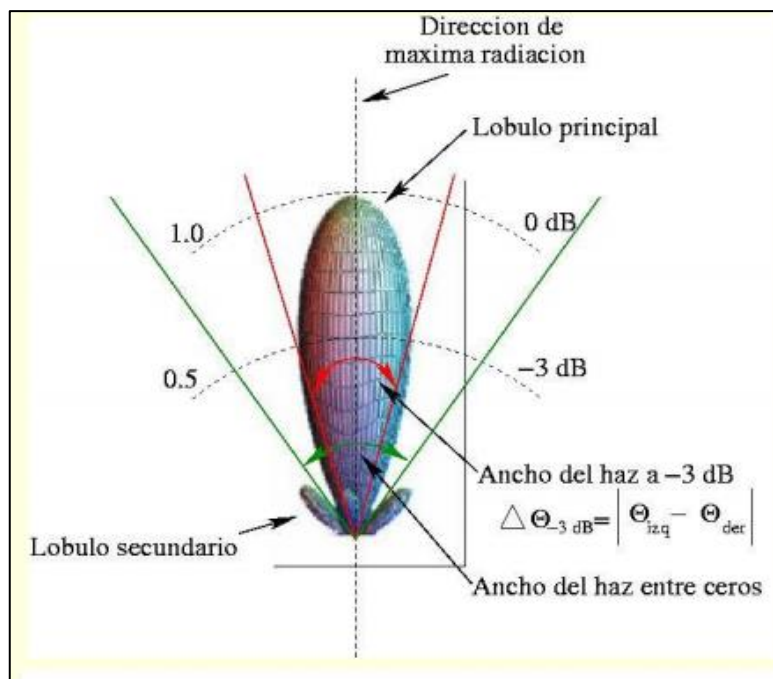
Se denomina haz principal o lóbulo principal a la zona del diagrama de radiación en la que la radiación es máxima. Las zonas que rodean a los máximos de menor amplitud son denominadas lóbulos laterales y al lóbulo lateral de mayor amplitud se le denomina

lóbulo secundario. Para conseguir nuestro propósito en este proyecto, no es estrictamente necesario que exista un lóbulo principal (o secundario) en la dirección que deseamos. En ocasiones, puede bastar con que se trate solamente de un lóbulo lateral, que consiga más directividad en el ángulo deseado que una antena que no use la tecnología que utilizarán las antenas propuestas en el proyecto, el beamforming.

Respecto al diagrama de radiación, se pueden definir una serie de parámetros de uso frecuente, como por ejemplo:

- Ancho del haz a -3 dB ( $\Delta\theta_{-3dB}$ ): se trata de la dirección angular en la que el diagrama de radiación toma por valor la mitad del máximo, es decir, 3 dB por debajo del máximo.
- Ancho del haz entre ceros ( $\Delta\theta_c$ ): es la separación angular de las direcciones del espacio en las que el lóbulo principal toma un valor mínimo. Estos dos parámetros nos dan una idea de la direccionalidad del patrón y, por tanto, de su poder de resolución.
- Relación entre lóbulo principal y secundario: cociente, expresado en dB, entre el valor del diagrama en la dirección de máxima radiación y en la dirección del máximo del lóbulo secundario.
- Relación delante/atrás: es la relación entre el lóbulo principal y el lóbulo posterior.

En la figura posterior se ejemplifican algunos de los parámetros comentados anteriormente.



### 3.1.4 Ganancia directiva y directividad

La ganancia directiva de una antena es la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y distancia dadas y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isótropa que radiase la misma potencia que la antena.



$$D_g(\theta, \phi) = D(\theta, \phi) = \frac{\wp(\theta, \phi)}{P_r/(4\pi r^2)}$$

La directividad se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en la dirección de máxima radiación de la antena ( $\wp_{m\acute{a}x}$ ), a una distancia dada, y la densidad de potencia que se le entregaría a esa misma distancia a una antena isotrópica que radiase la misma potencia. Con esta definición, se tienen en cuenta las pérdidas en la propia antena, debidas a las pérdidas óhmicas.

$$D = \frac{\wp_{m\acute{a}x}}{P_r/(4\pi r^2)}$$

La ganancia directiva en el ángulo en el que se desea tener una máxima radiación supondrá un parámetro clave a la hora de calcular el tiempo de vida de los sensores en el desarrollo práctico del proyecto.

La directividad se puede obtener, en general, a partir del conocimiento del diagrama de radiación de la antena. Se define el diagrama de radiación normalizado como:

$$t_n(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_{m\acute{a}x}} = \frac{K(\theta, \phi)}{K_{m\acute{a}x}}$$

Así, la expresión de la directividad puede escribirse en la forma:

$$D = \frac{4\pi}{\iint_{4\pi} t(\theta, \phi) d\Omega}$$

Conocida la directividad y el diagrama de radiación normalizado, la ganancia directiva se obtiene mediante el producto:  $D(\theta, \phi) = D \cdot t(\theta, \phi)$ . La directividad se suele expresar en dBi (dB sobre el nivel de la antena isotrópica), como  $10 \cdot \log(D)$ . Existen distintos métodos para aproximar el valor de la directividad, como la fórmula de Kraus o la fórmula de Tai y Pereira. Sin embargo, dichas aproximaciones son útiles cuando el diagrama de radiación de las antenas tiene un lóbulo principal estrecho y lóbulos secundarios muy pequeños. Dado que, en principio, no nos preocuparán los lóbulos secundarios y trabajamos con herramientas de simulación, no será necesario usar estas aproximaciones, pues los resultados que ofrecerá Matlab serán bastante precisos.

### 3.1.5 Polarización

La polarización de una antena en una dirección es la polarización de la onda radiada por ella en esa dirección, esto es, la figura geométrica que describe, al pasar el tiempo, el extremo del vector campo eléctrico en un punto fijo del espacio en el plano perpendicular a la dirección de propagación. Si la figura es un segmento, se dice que la onda está linealmente polarizada y si es un círculo, se dice que la onda está circularmente polarizada.

Fijada una dirección  $(\theta, \phi)$  de incidencia de una onda sobre una antena, la potencia que se entrega procedente de una antena transmisora a una antena receptora va a depender, entre otros factores, de la polarización relativa de una antena respecto a la otra.

Sin embargo, a lo largo del desarrollo práctico, se supondrá que las antenas transmisoras y receptora estará polarizadas adecuadamente, de manera que no existan pérdidas debido a la polarización.

### 3.1.6 Ecuación de transmisión de Friis

Se denomina ecuación de transmisión de Friis a la relación entre la potencia entregada por una antena a su receptor y la potencia entregada por un transmisor a su antena. Esta ecuación representa las pérdidas que existen en una canal de comunicación (radio enlace) establecido entre dos equipos.

Supongamos una situación ideal, esto es, una comunicación entre dos antenas isotropas (iguales), una funcionando como antena transmisora y la otras como antena receptora, separadas entre sí una distancia  $d$ . Las dos antenas están perfectamente adaptadas a sus circuitos (con el fin de despreciar las pérdidas por desadaptación) y están inmersas en un medio ideal (el vacío), sin obstáculos.

La pérdida por propagación ( $l_o$ ), que se define como el cociente entre la potencia captada por la antena receptora y la potencia radiada por la transmisora, viene dada por:

$$l_o = \frac{P_{rec}}{P_{rad}} = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda. Como vemos, esta pérdida es independiente del tipo de antenas usadas y es debida al decaimiento que se produce en la amplitud de los campos en su propagación.

A pesar de que pueden existir otro tipo de pérdidas además de las pérdidas por propagación, como las debidas a desadaptación, reflexión en tierra plana, difracción, ondas de superficie, atenuación por lluvia, refracción, etc., solo supondremos las debidas a la propagación, pues al fin y al cabo solamente nos interesará comparar antenas que usan beamforming frente aquellas que no lo usan, y ambos tipos de antenas sufrirán el mismo tipo de pérdidas, de manera que no influirán en los resultados de eficiencia. Las pérdidas por propagación sí serán realmente interesantes, pues no todas las antenas se encontrarán a la misma distancia de la estación receptora.

### 3.1.7 Conclusión

Una vez conocidos los parámetros necesarios para poder caracterizar nuestro escenario y dispuestos los sensores, será necesario saber cómo calcularlos. Además, es también preciso conocer por qué queremos que el diagrama de radiación se adecue a nuestras necesidades. Con unas amplitudes y fases en cada antena de los sensores que habremos de calcular, podremos conseguir aumentar la directividad en la dirección

deseada y reducir la potencia radiada de los distintos sensores, aumentando el tiempo de vida. La importancia de estos conceptos se explica en el siguiente apartado: **Teoría de Beamforming**.

#### Bibliografía:

1. "IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas" (IEEE Std 145-1933).
2. Constantine A. Balanis, "Antenna Theory", 3ª Ed., Wiley Interscience (Capítulo 2).
3. John D. Kraus and Ronald J. Marhefka, "Antennas for all applications", 3ª Ed., McGraw-Hill (Capítulo 2).
4. Ángel Cardama, et al, "Antenas" Ediciones UPC (Capítulos 1 y 2).
5. Robert E. Collin, "Antennas and Radiowave Propagation", McGraw-Hill, 1985 (Capítulo 6).

## 3.2 Teoría de Beamforming

En el apartado anterior, se explican detalladamente distintos parámetros para caracterizar antenas individuales. Dado que en este proyecto se desea trabajar no solo con una, sino con varias antenas, es preciso definir una serie de conceptos básicos de las agrupaciones de antenas.

### 3.2.1 Introducción

Una antena funcionando de manera independiente presenta como característica un gran ancho de haz, por lo que conlleva una baja directividad. Una forma de solucionar este problema es mediante la agrupación de antenas lineales (*array*) alimentadas con amplitudes y fases determinadas, de tal forma que se obtenga el diagrama de radiación deseado, esto es, el beamforming.

El uso de agrupaciones de antenas está muy extendido y sus aplicaciones son muy diversas, entre las que se incluyen la síntesis de un diagrama de radiación con una directividad, ancho de haz o nivel del lóbulo principal al secundario dado.

En una agrupación de elementos idénticos, existen cinco variables de control que permiten configurar el diagrama de radiación del array:

- La configuración geométrica de la agrupación total (lineal, circular, rectangular, tridimensional, etc).
- El desplazamiento relativo entre los elementos.
- La amplitud de la excitación de los elementos individuales.
- La fase de la excitación de los elementos individuales.
- El diagrama de radiación de cada elemento individual.

### 3.2.2 Factor de array y diagrama de radiación

Se define una agrupación como un conjunto de  $N$  antenas iguales que radian o reciben de forma simultánea. Para antenas transmitiendo, el campo radiado se obtiene como interferencia de las  $N$  antenas radiando a la vez; sin embargo, para antenas recibiendo, el campo radiado se obtiene como la combinación lineal de todas las señales que se reciben de forma individual.

Los elementos componentes de un array pueden ser cualquier antena (antenas de parche, ranura, etc.), aunque las más habituales suelen ser antenas eléctricamente pequeñas, como los dipolos. En radioastronomía, es usual utilizar antenas eléctricamente grandes para conseguir haces muy estrechos.

La clasificación más sencilla de los arrays se hace atendiendo a su geometría, y podemos encontrar:

- Arrays lineales: en este tipo de agrupación, los elementos se disponen a lo largo de una recta, pudiendo estar equiespaciados o no.
- Arrays planos: en este caso, los elementos se sitúan sobre un plano. Las agrupaciones más usadas de este tipo son las circulares y las reticulares.
- Arrays tridimensionales: en esta configuración, los elementos se sitúan en un volumen.

En el apartado **Casos de estudio**, se estudiarán estos tres tipos de arrays. A continuación, se explicará cómo obtener el diagrama de radiación (estudiado en el apartado anterior) de un array de antenas.

En los arrays de antenas, cada uno de los elementos tiene un diagrama de radiación que definiremos como  $S_e(\phi)$ . Si la fase del elemento  $i$  es  $\Psi_i$  y la amplitud de es  $a_i$ , el diagrama de radiación del array será:

$$S(\phi) = \sum_{i=1}^N S_e(\phi) a_i e^{j\Psi_i} = S_e(\phi) \sum_{i=1}^N a_i e^{j\Psi_i} = S_e(\phi) \cdot FA(\Psi)$$

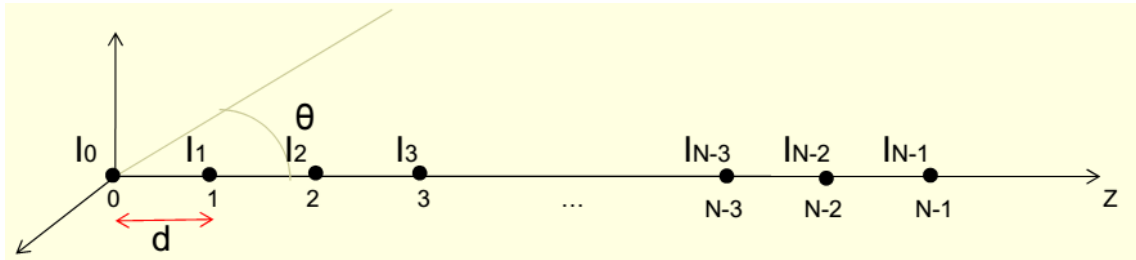
donde  $FA(\Psi)$  es el factor de array. Se asume que el diagrama de radiación de cada uno de los elementos,  $S_e(\phi)$ , es el mismo para todos ellos. El factor de array caracteriza el comportamiento del array, y depende de su geometría y de la amplitud y la fase de la señal de sus elementos. Si los elementos que forman el array son isotrópicos, el diagrama de radiación de cada antena será  $S_e(\phi) = 1$ .

El diagrama de radiación en potencia del array se obtendrá como:

$$P(\phi) = \frac{1}{N^2} |S(\phi)|^2$$

Una vez definido el diagrama de radiación del array, se puede analizar de la misma manera que se estudió en el apartado anterior.

### 3.2.3 Métodos de análisis y síntesis de arrays



Se conoce el análisis de arrays de antenas como el estudio de las agrupaciones de antenas basándose en la geometría y alimentación de un array dado. El análisis de arrays se centra en modelos y escenarios muy concretos. Estando todos los elementos equiespaciados una distancia  $d$  a lo largo de un eje (figura XXXX), los tipos de análisis pueden estar basados en la distribución de corriente de las antenas, que puede ser:

- Uniforme: Todas las antenas se alimentan con la misma amplitud. Este tipo de distribución es la que radia el mayor campo en la dirección del haz principal, además de presentar el mínimo ancho de haz. Presenta el peor nivel de relación lóbulo principal a secundario.
- Triangular. Se define únicamente para un número impar de antenas. Su ancho de haz es aproximadamente el doble que la uniforme.
- Binómica. Este tipo de distribución de corriente es la que menor campo radia en la dirección del haz principal. Su ancho de haz es mucho mayor que la de la distribución de corriente triangular. Además, solo presenta un lóbulo.

Otros tipos de análisis pueden basarse en la disposición de los elementos, con distribución de corriente uniforme y variando el desfase entre elementos:

- Agrupación transversal broadside: el ancho de haz se sitúa de forma perpendicular al eje en el que se disponen los elementos.
- Agrupación longitudinal endfire: presenta el máximo en la dirección del eje.

Por último, existen diversos tipos de arrays para los que se puede calcular su directividad, que es uno de los parámetros de antena más importantes, ya que nos da una medida de la capacidad de un array de concentrar el haz principal en una o varias direcciones del espacio. Para calcular la directividad, los arrays se pueden clasificar según la distancia entre los elementos:

- Espaciado  $d = m\lambda/2$ , que depende solo de la alimentación y del número de elementos de la agrupación, siendo independiente de la fase progresiva.
- Espaciado infinito.
- Espaciado  $d \ll \lambda$ , el cual implica un diagrama de radiación isotrópico.

Como se acaba de explicar, existen distintas condiciones para poder analizar un array de antenas, como son el espaciado, la distribución de corriente y la geometría. Esto implica que se deben dar unas condiciones muy exactas para poder analizar un array,

condiciones que nuestro modelo WSN no presentará. Por este motivo, difícilmente podrían usarse estos métodos.

Por otro lado, además de los métodos de análisis, existen los métodos de síntesis de agrupaciones lineales de antenas. El objetivo de estos métodos es el siguiente: dado un diagrama de radiación con unas determinadas especificaciones, obtener la separación entre antenas y la secuencia de alimentación. Para conseguir esto, se deben determinar los fasores corriente para que las interferencias de los campos radiados se aproximen al diagrama de radiación deseado, o que cumpla ciertas condiciones sobre el diagrama, como un determinado ancho de haz, directividad, etc.

Sin embargo, el escenario de las WSNs que pretendemos estudiar es muy distinto. En este escenario, como ya se estudió en el apartado **ESCENARIO WSN**, los sensores tomarían una posición arbitraria (de forma longitudinal, en un plano o en un volumen). A partir de sus posiciones, con el script a implementar se han de buscar de forma automática unas amplitudes y unas fases apropiadas para que puedan usar el beamforming correctamente.

De este modo, no se pueden aplicar los métodos de análisis, pues a pesar de que parten de una geometría del array dada para calcular su diagrama de radiación, las condiciones impuestas son muy estrictas, ya que en el modelo WSN el espaciado entre sensores puede ser muy diverso. Tampoco podrían aplicarse los métodos de síntesis, pues a pesar de que sí que queremos conseguir obtener un diagrama de radiación dado, no nos es posible colocar los sensores en las posiciones que especifiquen estos métodos.

En apartados posteriores, se profundizará en el método a utilizar para conseguir unas amplitudes y fases apropiadas que proporcionen un diagrama de radiación deseado dada la geometría de la WSN, los algoritmos genéticos.

### 3.2.4 Tiempo de vida de los sensores

Como se ha comentado a lo largo de los apartados anteriores, conseguir una ganancia directiva elevada en la dirección deseada es muy importante para conseguir una eficiencia elevada con respecto a los sensores que no utilizan beamforming. En este apartado se explicará por qué este parámetro será clave para conseguir nuestro objetivo.

El tiempo de vida de los sensores será decisivo para calcular la mejora en eficiencia de aquellos sensores que utilicen beamforming frente a aquellos que no lo utilicen. El tiempo de vida de un sensor será la cantidad de tiempo que tarde el sensor en agotar su batería desde que sea establecido. Por ello, este apartado está dedicado a estudiar el cálculo del tiempo de vida de cada sensor. Definiendo el tiempo de vida del sensor  $x$  que usa beamforming como  $t_{vida_{x_B}}$  y el tiempo de vida del sensor  $y$  que no usa beamforming como  $t_{vida_x}$ , definiremos la eficiencia de los sensores que usen beamforming como:

$$eficiencia = \frac{\min(t_{vida_{x_B}})}{\min(t_{vida_x})}$$

De esta manera, la mejora proporcionada por el beamforming vendrá marcada por aquel sensor que presente menor tiempo de vida, es decir, aquel que agote antes su batería, a pesar de que puedan existir otros que tarden mucho más en agotar la batería. Aunque típicamente se asume que la cantidad total de potencia es la misma para cada sensor, esto no tiene por qué ser siempre cierto. En este proyecto, se estudiarán casos en los que la cantidad de batería sea la misma para todos los sensores, pero también se estudiarán los casos en los que no se proporcione la misma batería a todos ellos. Para dar cabida a todos los casos, supondremos que el consumo de cada nodo viene dado por una variable aleatoria uniforme  $F_x$  de valores  $[0, 1]$ . Por tanto, la energía disponible en el sensor  $x$ ,  $E_{ax}$ , con  $x = 1, 2, \dots, \text{máx\_sensores}$ , es:

$$E_{ax} = E_t \cdot F_x$$

donde  $E_t$  es la energía total disponible para cada sensor. Adicionalmente, la energía consumida por cada sensor  $E_{cx}$  es:

$$E_{cx} = P_{tx\_x} \cdot t_x$$

donde  $P_{tx\_x}$  es la cantidad de potencia dedicada a transmitir los datos del sensor  $x$  y  $t_x$  es el tiempo de transmisión. Es importante destacar que aquellos sensores que usen beamforming deberán disponer de un mayor tiempo de transmisión. Suponiendo que el tiempo de transmisión de los sensores que no usan beamforming sea  $T$ , si se tiene un cluster con  $X$  sensores que usan beamforming, su tiempo de transmisión será  $X \cdot T$ , puesto que han de radiar durante  $X$  veces más para poder llevar a cabo el beamforming.

El consumo de cada nodo también puede ser expresado en término de potencia. Por tanto, la potencia disponible  $P_{ax}$  viene dada por:

$$P_{ax} = P_{tx\_x} \cdot F_x$$

El máximo tiempo de vida  $t_{vida\_x}$  de los sensores se obtiene cuando el consumo de energía es igual a la energía disponible:

$$E_t \cdot F_x = P_{tx\_x} \cdot t_{vida\_x}$$

Como consecuencia, el tiempo de vida de cada sensor será:

$$t_{vida\_x} = \frac{E_t \cdot F_x}{P_{tx\_x}}$$

(XXX)

En este punto, se debe considerar que  $P_{tx\_x}$  es la potencia necesaria para transmitir datos sin considerar el beamforming. Sin embargo, cuando se aplica el beamforming,  $P_{tx\_x}$ , que está relacionada con la excitación en amplitud de cada sensor, se multiplica por un efecto de ganancia proporcionado por el beamforming. Este efecto de ganancia depende del diagrama de radiación final y puede inducir ganancia en unas direcciones y pérdida en otras. Este efecto de ganancia del beamforming ( $GB$ ) está estrechamente relacionado con la directividad en la dirección deseada. A igualdad de potencia transmitida, una mayor directividad en la dirección deseada supondrá una mayor

potencia recibida, lo cual permitirá prolongar el tiempo de vida si decidimos reducir la potencia transmitida. De este modo, podríamos conseguir que en el receptor se reciba la misma potencia que cuando no se usa beamforming, pero con una menor potencia transmitida, lo que hará que se prolongue el tiempo de vida de los sensores que usan beamforming. Así, podemos modelar la potencia para transmitir datos al receptor como:

$$P_{tx\_x\_B} = P_{tx\_x} \cdot GB$$

donde  $P_{tx\_x\_B}$  es la excitación en amplitud de cada sensor que usa beamforming y  $P_{tx\_x}$  es el equivalente para los sensores que no lo usan. De este modo, la excitación en amplitud de los sensores que no usan beamforming es:

$$P_{tx\_x} = \frac{P_{tx\_x\_B}}{GB}$$

Relacionando esta ecuación con (XXX), se tiene que el tiempo de vida de los sensores que usan beamforming es:

$$\frac{P_{tx\_x\_B}}{GB} = \frac{E_t \cdot F_x}{t_{vida\_x}} \Rightarrow t_{vida\_x\_B} = \frac{E_t \cdot F_x \cdot GB}{P_{tx\_x\_B}}$$

Volviendo a la ecuación (XXX), vemos que la única diferencia que existe entre el tiempo de vida de los sensores que usan beamforming y los sensores que no lo utilizan es ese factor GB (ganancia del beamforming).

Finalmente, resta definir la ganancia del beamforming (GB) como:

$$GB = \frac{directividad_B}{directividad} \cdot \frac{X \cdot T}{X_B \cdot T} \Rightarrow GB = \frac{directividad_B}{directividad} \cdot \frac{1}{X_B}$$

donde  $directividad_B$  es la directividad en la dirección en la que se desea radiar de aquellos sensores que usan beamforming (en lineales),  $directividad$  es la directividad en esa misma dirección para los sensores que no usan beamforming,  $X$  es la cantidad de sensores del cluster en cuestión para los sensores que no usan beamforming (como radian de forma independiente, se considera que la cantidad de clusters es igual a la cantidad de sensores),  $X_B$  es la cantidad de sensores que usan beamforming pertenecientes al cluster en cuestión y  $T$  es el tiempo necesario para transmitir la información. Tal y como vemos, aumentar la directividad usando beamforming supondrá una mejora en el tiempo de vida, pero hacer que aumente la cantidad de sensores del cluster hará que empeore.

En cuanto a la ganancia que se obtiene al usar beamforming, ha de tenerse en cuenta también la distancia desde los sensores hasta la estación base receptora, a través de la ecuación de transmisión de Friis. Para los sensores que no usan beamforming, para calcular la potencia recibida, se tendrá en cuenta la distancia desde cada sensor hasta la estación base; sin embargo, para los que usan beamforming, solo tendrá en cuenta la distancia desde la estación base al cluster correspondiente. Sin embargo, a pesar de tenerse en cuenta también para poder calcular el tiempo de vida de unos y otros sensores, el beamforming no aportará a priori ninguna mejora en este aspecto.



### 3.2.5 Objetivo a conseguir con el beamforming

Una vez definida la manera de calcular la eficiencia obtenida al usar beamforming, solo resta comentar cuál es el objetivo exacto que se persigue para conseguir dicha mejora al utilizar esta tecnología.

Supongamos un grupo de antenas isotrópicas que radian de forma independiente (sin usar beamforming), y se desea que radien en una dirección dada (la dirección de una estación base, por ejemplo). Estas antenas radian de igual forma en todas las direcciones, es decir, su ganancia directiva es la misma en todas las direcciones. Si usaran beamforming con unas amplitudes y fases determinadas para cada una de ellas, se podría conseguir que su diagrama de radiación conjunto presentara un haz muy directivo en la dirección deseada, con unas amplitudes menores que las de aquellas antenas que no usan beamforming. De este modo, con una amplitud menor, se prolonga significativamente el tiempo de vida de cada una de las antenas.

Comparemos estas ecuaciones:

$$t_{vida\_x} = \frac{E_t \cdot F_x}{P_{tx\_x}} \qquad t_{vida\_x\_B} = \frac{E_t \cdot F_x \cdot GB}{P_{tx\_x\_B}}$$

Como vemos, podemos prolongar el tiempo de vida de los sensores que usan beamforming aumentando el factor GB, es decir, aumentando la directividad en la dirección deseada. Conjuntamente, además, podemos reducir la potencia transmitida por dichos sensores y, a la vez incluso, conseguir una mayor directividad que los sensores que no usan beamforming.

### 3.2.6 Conclusión

De este modo, solo resta conocer el algoritmo mediante el cual calcular las amplitudes y fases necesarias para llevar a cabo el beamforming, para conseguir aumentar la directividad lo suficiente y reducir la potencia transmitida lo necesario para que el tiempo de vida de los sensores sea mayor que otros sensores que no usen esta tecnología. Además, también será preciso calcular la cantidad óptima de clusters y qué sensores pertenecerían a qué clusters. Para todo esto, se recurre a los algoritmos genéticos, que se explicarán en el apartado siguiente.

#### Referencias

Hubregt J. Visser, “Phased Array Basics”, 2005 (The Linear Broadside Array Antenna”).

Warren L. Stutzman & Gary A. Thiele, “Antenna Theory and Design”, 2ª Ed., Wiley & Sons (Capítulos 3 y 8).

### 3.3 Teoría de Algoritmos Genéticos

Para poder resolver el problema propuesto en el apartado anterior (calcular las amplitudes, fases y clusters necesarios para prolongar el tiempo de vida de los sensores usando beamforming), se acude a los algoritmos genéticos, que actuarán como un algoritmo de optimización del tiempo de vida. Estos algoritmos serán adecuados, pues han mostrado resolver una gran variedad de problemas de optimización.

Los algoritmos genéticos consisten en una búsqueda heurística que imita el proceso de selección natural. Estos algoritmos pertenecen a una clase mayor, la de los algoritmos evolutivos, que generan soluciones para problemas de optimización usando técnicas inspiradas en la evolución natural, como la herencia, mutación, selección y cruzamiento.

A continuación, se ofrecerán algunas definiciones sobre la metodología a aplicar para poder resolver el problema que se nos presenta.

#### 3.3.1 Introducción

En un algoritmo genético, una población de soluciones candidatas para un problema de optimización (llamadas individuos, criaturas o fenotipos) se evoluciona hacia mejores soluciones. Cada solución candidata tiene un conjunto de propiedades (sus cromosomas o genotipos), que pueden ser mutadas y alteradas.

La evolución normalmente empieza a partir de una población de individuos generada de manera aleatoria. A partir de ahí, se sigue un proceso iterativo con la población; cada paso de este proceso es llamado generación. En cada generación, se evalúa la aptitud de cada individuo de la población; la aptitud es normalmente el valor de la función objetivo del problema de optimización a ser resuelto.

Los individuos más adecuados se seleccionan estocásticamente de la población actual y el genoma de cada individuo es modificado (recombinado y aleatoriamente mutado) para formar una nueva generación. La nueva generación de soluciones candidatas se usa para la siguiente iteración del algoritmo. Comúnmente, el algoritmo termina cuando el máximo número de generaciones se ha producido, o se ha alcanzado cierto nivel de aptitud de la población.

#### 3.3.2 Adaptación de los algoritmos genéticos al proyecto

En el caso que nos concierne, el de resolver el problema de optimización para alcanzar unas amplitudes y fases adecuadas, junto con la cantidad apropiada de clusters, la amplitud y la fase de cada sensor que compone nuestra WSN serán los individuos, así como la cantidad de clusters. En una red de  $X$  sensores, el total de variables (individuos) será  $2 \cdot X + 1$ , es decir, la amplitud y fase de cada sensor más la cantidad de clusters, que es común a todos los sensores. El tamaño de la población será de 100.

Así, en una primera generación, el valor de cada variable será aleatorio. Después, se evalúan los individuos mediante la función objetivo, es decir, dadas las amplitudes,

fases y cantidad de clusters, se calcula el tiempo de vida de cada uno de los sensores, siendo la función objetivo:

$$\max\{t_{WSN} = \min(t_{vida\_x\_B}), x \in [1, \max\_sensores]\}$$

De este modo, el tiempo de vida de nuestra red de sensores vendrá marcado por aquel sensor que primero agote su batería. Una vez evolucionados, se elegirá el mejor conjunto de individuos, es decir, aquellos que han hecho aumentar el tiempo de vida de los sensores, y se creará una nueva generación. En nuestro caso, el criterio de parada será un número de generaciones elevado, 200.

### 3.3.3 Conclusión

Los algoritmos genéticos son una solución perfecta para poder calcular los distintos parámetros que necesitamos para llevar a cabo el beamforming de forma óptima. De manera automática, se calcularán las amplitudes y fases de las antenas de nuestros sensores y la cantidad de clusters necesarios que optimizarán el tiempo de vida de aquel sensor que agote antes su batería.