

Índice:

1	Introducción.....	3
2	Escenario.....	5
3	Análisis teórico.....	8
3.1	Teoría de antenas.....	8
3.1.1	Introducción.....	8
3.1.2	Intensidad de radiación.....	9
3.1.3	Diagramas de radiación	10
3.1.4	Ganancia directiva y directividad	13
3.1.5	Polarización	13
3.1.6	Ecuación de transmisión de Friis	14
3.1.7	Conclusión	14
3.2	Teoría de Beamforming.....	15
3.2.1	Introducción.....	15
3.2.2	Factor de array y diagrama de radiación.....	15
3.2.3	Métodos de análisis y síntesis de arrays	16
3.2.4	Tiempo de vida de los sensores	18
3.2.5	Objetivo a conseguir con el beamforming.....	21
3.2.6	Conclusión	21
3.3	Teoría de Algoritmos Genéticos	21
3.3.1	Introducción.....	22
3.3.2	Adaptación de los algoritmos genéticos al proyecto	24
3.3.3	Conclusión	24

ABSTRACT

Las redes de sensores inalámbricas (*Wireless Sensor Networks*, WSN de ahora en adelante) consisten en una red de sensores autónomos y espacialmente distribuidos, ideados para monitorizar condiciones físicas o medioambientales, como la temperatura, el sonido o la presión, entre otros. Además, pueden actuar para mandar sus datos cooperativamente a través de la red a una estación. Su desarrollo vino motivado principalmente por aplicaciones militares, como la vigilancia del campo de batalla.

Las WSNs tienen un enorme rango de aplicaciones, ya que pueden adaptarse a distintos ambientes. Pueden operar de manera independiente en lugares donde la presencia humana es arriesgada o, incluso, imposible. Dado que su tiempo de vida depende de baterías y el recambio o la recarga de estas es imposible en lugares cuyo acceso es complicado, es necesario encontrar algoritmos que sean capaces de prolongar la batería de los nodos. En ello consiste el presente proyecto: estudiar un método que haga que el tiempo de vida de los sensores se prolongue, actuando conjuntamente para radiar una menor potencia consiguiendo una mayor potencia recibida en la estación base. Este método será el llamado *beamforming*.

ABSTRACT

1 Introducción

En este primer apartado del presente documento, se presentan los antecedentes que motivan la realización del proyecto, los objetivos que se desean alcanzar y la organización del documento.

1.1 Antecedentes

La siguiente generación de comunicaciones móviles (5G) está actualmente en desarrollo [Agiwal 2016] [Boccardi 2014]. De hecho, se espera que los primeros despliegues de una red 5G operen completamente en 2020 [Community 2015]. Los objetivos de diseño de estos sistemas se muestran en la figura 1.1. Estos sistemas están concebidos para proporcionar velocidades de datos muy altas (típicamente del orden de Gbps), una latencia extremadamente reducida, gran incremento en la capacidad de la estación base y una mejor significativa en la calidad de servicio percibida por el usuario comparado con las redes 4G LTE [Bogale 2016].



Fig. 1.1. Objetivos de diseño y requisitos para las redes 5G. Fuente: [Community 2015].

Existen muchas tecnologías innovadoras que se usarán para satisfacer las demandas del volumen de tráfico masivo: sistemas MIMO enormes, acceso múltiple por división en frecuencia ortogonal (OFDMA), redes de acceso radio a la nube (CRAN), redes definidas por software (SDN), entre otras. Además, 5G también pretende introducir nuevos dispositivos en su arquitectura: infraestructuras inalámbricas compuestas, administración flexible del espectro, celdas pequeñas, despliegue heterogéneo de la red, entre otras [Tsai 2015].

Las iniciativas de investigación han identificado ocho requisitos básicos para la siguiente generación de sistema 5G [Agiwal 2016], siendo la “reducción en energía usada de casi el 90%” uno de ellos. Por tanto, las tecnologías “verdes” se están considerando en los estándares. Como consecuencia, la eficiencia en la energía es un tema clave en el diseño de estas redes [Buzzi 2016]. La eficiencia, en general, y el consumo de energía en particular, incluye claramente algún tipo de optimización. Las tecnologías requeridas para desarrollar sistemas 5G, así como los escenarios de aplicación, son bastante numerosos. Uno de los casos más potenciales del uso de 5G [Bogale 2016] son las Redes de Sensores Inalámbricas (*Wireless Sensor Networks*, WSN), puesto que el número de “cosas conectadas” (Internet de las Cosas), será de 7 billones [Community 2015]. Así, queda claro que la preservación de la energía de las WSN es un tema de gran interés en lo que se refiere al diseño y despliegue de la red.

Como vemos, las redes de sensores inalámbricas son un gran punto de avance para el futuro de la tecnología, y de ellas trata este proyecto. Las redes de sensores inalámbricas han experimentado un notable crecimiento a lo largo de los últimos años, provocado principalmente por su adaptabilidad y los rápidos avances en tecnología que se han presentado en las pasadas décadas. Además de ser usadas en la tecnología comentada anteriormente (5G), pueden ser muy útiles para monitorizar cierto medio, siendo posible desplegar una gran cantidad de sensores, cientos o incluso miles, que pueden cooperar para recopilar datos. Estos datos serán entonces enviados a una estación base a través de la antena que incorporan los sensores. Debido a sus atributos ajustables y a que son muy baratos, poseen un gran número de aplicaciones como la monitorización del medioambiente, prevención de incendios, detección de químicos, servicios de cuidados de salud, respuesta de emergencia, misiones de vigilancia, detección de terremotos y previsión del tiempo meteorológico [Akyildiz 2002] [Zanjireh 2007] [Perera 2014]. Los sensores de las WSNs pueden organizarse de una manera *ad-hoc* y pueden ser usados en lugares donde la presencia humana es arriesgada o prácticamente imposible [Tselikis 2012].

La eficiencia de la energía es esencial para que estas redes de sensores sean efectivas, ya que recargar o reemplazar sus baterías puede no ser posible. En la pasada década, un gran número de estudios han propuesto algoritmos que optimicen la energía de las WSNs [Heinzelman 2000] [Zanjireh 2013] [Zanjireh 2014] [Mathew 2014]. El principal factor por el cual se consume energía en las WSNs es la potencia necesaria para poder transmitir los datos captados, es decir, la comunicación. Aquí entrará en juego el uso del beamforming [Anastasi 2004]. A continuación se explicarán unas breves nociones sobre el beamforming para pasar posteriormente a explicar por qué será clave para la optimización de la energía en las WSNs.

El beamforming consiste en un acercamiento versátil y potente para recibir y transmitir señales de interés de una forma muy selectiva en presencia de interferencia y ruido. El beamforming en recepción es un campo de estudio clásico, aunque en continua evolución, que tiene una rica historia en la investigación teórica y práctica en aplicaciones de radar, sónar, comunicaciones radio, procesamiento de audio en micrófonos, biomedicina, radioastronomía, sismología, entre otras áreas [Van Trees 2002]. En la pasada década, ha habido un nuevo interés en el beamforming, debido a sus aplicaciones en las comunicaciones inalámbricas, donde las técnicas multi-antena han emergido como una de las tecnologías clave que darán soporte al enorme crecimiento del número de usuarios de los servicios de datos.

El beamforming en transmisión, en cambio, es un campo de estudio más bien joven y que se está desarrollando dinámicamente. Este tipo de beamforming es el que se pretende estudiar en el presente proyecto. Los estudios más básicos suponen escenarios en los que las antenas se disponen de una manera muy específica e ideal, como equiespaciados a lo largo de un eje o en una circunferencia. Este tipo de beamforming intenta adaptar la fase y amplitud de las antenas para radiar la potencia en una dirección muy concreta.

Es por ese motivo por el cual se pretende usar el beamforming para optimizar la forma en que se radia la potencia de los sensores. El beamforming tratará de modelar el diagrama de radiación en la forma deseada, para conseguir una alta directividad en una

dirección deseada. En caso de que sea conocida la dirección en la que se desea radiar (la dirección en la que se encuentra la estación base), podría ser posible conseguir mediante el beamforming transmitir los datos justo en esa dirección, con la consiguiente reducción del consumo de energía. Sería también posible radiar no solo en una dirección, sino en más de una. Además, mediante el beamforming se puede conseguir evitar las interferencias mediante el modelado del diagrama de radiación.

Uno de los principales problemas para conseguir llevar a cabo el beamforming en la dirección deseada es el complejo cálculo para poder obtener las fases y amplitudes necesarias para cada antena de los nodos que compondrán la red de sensores. Por ello, en el presente proyecto se plantea la posibilidad de solventar dicho problema mediante los algoritmos genéticos que, de forma iterativa, tratarán de optimizar la eficiencia mediante la variación de fases y amplitudes hasta conseguir el mejor conjunto.

Por último, también se plantea implementar la utilización de distintos clusters, cuya función será dividir los sensores de la red en distintos grupos para que radien de forma separada.

1.2 Objetivos

Una vez han introducidos los rasgos más importantes de este proyecto, a continuación se dará paso a comentar los objetivos principales que se desean conseguir.

El objetivo principal consiste, en todos los casos, demostrar que gracias al beamforming es posible prolongar el tiempo de vida de los sensores de una WSN, consiguiendo orientar un haz del diagrama de radiación en la dirección deseada.

Uno de los casos principales a estudiar es comprobar si es posible conseguir el objetivo principal para una WSN con todos los sensores dispuestos arbitrariamente en un plano, es decir, un escenario WSN en dos dimensiones.

Otro posible caso de estudio es tener en cuenta que no todos los sensores tendrán disponible la misma energía para poder radiar, es decir, que no todas sus baterías sean capaces de durar el mismo tiempo. En teoría, mediante los scripts que serán presentados a lo largo del proyecto, el beamforming debería conseguir que los sensores con menor batería radien una menor potencia, con el fin de prolongar su batería y que su tiempo de vida se equipare al de aquellos sensores que disponen de una batería con mayor tiempo de vida.

Una vez estudiado el caso en que los sensores se dispongan en un plano, sería mucho más interesante un caso que se asemejara más a la realidad, como es el de que los sensores se sitúen en tres dimensiones. Podríamos decir que este caso es el más real, pues muy difícilmente encontraríamos una WSN cuyos sensores se encuentren perfectamente alineados de tal modo que encajen perfectamente en un plano.

Hasta ahora, se ha hablado de conseguir que mediante el beamforming se pueda radiar en una dirección deseada, es decir, en un ángulo (ϕ, θ) genérico y común a todos los sensores. Sin embargo, en una situación real no es posible encontrar este tipo

de casos; en una situación real, los sensores deberían radiar en la dirección de una estación base con una posición (X, Y, Z) específica. Este será otro de los objetivos del proyecto, conseguir optimizar el tiempo de vida en un escenario en el que exista una estación base que recopile los datos de los sensores.

En un típico escenario WSN, cabe la posibilidad de que puedan existir estaciones que interfieran en la comunicación (estaciones enemigas), que deseen atacar maliciosamente la WSN o que deseen captar los datos que se transmiten. Por tanto, además de resultar interesante que mediante el beamforming se haga que nuestra WSN radie en una dirección en la que se encuentra una estación base, es también posible conseguir que la red no radie en una dirección no deseada. Realmente, lo que se puede conseguir es que se radie con una potencia muy reducida en esa dirección, es decir, que el diagrama de radiación presente un nulo en esa dirección.

Como ya hemos visto, uno de los objetivos a conseguir en el proyecto es que la WSN transmita la información a dos estaciones base. Dado lo comentado anteriormente sobre las "estaciones enemigas", sería también muy interesante impedir que más de una estación enemiga no pueda interceptar la comunicación de nuestra WSN, es decir, otro de los objetivos será que el diagrama de radiación presente más de un nulo en las direcciones de las estaciones enemigas mediante el beamforming.

Finalmente, resta mencionar que estos son solamente unos de los muchos objetivos que se podrían llegar a conseguir. Una vez diseñado el código para conseguir cumplirlos, se desea que sea tan versátil que, en caso de que se busque conseguir unos objetivos distintos, también se pueden llegar a alcanzar. De este modo, este es otro de los objetivos del proyecto: hacer que el código no sea cerrado ni acepte unos pocos parámetros; al contrario, se desea que sea un código abierto que tome una gran variedad de parámetros para poder conseguir diversos objetivos. Un objetivo secundario será compilar el código en un ejecutable (.exe), de tal forma que pueda ser lanzado en paralelo con los parámetros arriba mencionados pasados mediante la línea de comandos en múltiples máquinas para conseguir diversas realizaciones de un mismo caso de estudio. A pesar de que el código pueda permitir la posibilidad de llevar a cabo tantas realizaciones como se desee (N realizaciones) en una misma ejecución, lanzar esas mismas realizaciones en paralelo hará que se reduzca el tiempo de simulación en un factor $1/N$, aproximadamente. Para obtener unos resultados precisos y fiables, el tiempo de simulación crecerá, de forma que la opción de los ejecutables será una gran solución para reducirlo.

1.3 Organización

A continuación, se explica cómo está organizado el presente proyecto. En primer lugar, se encuentra el Fundamento teórico. En él, se comentan algunos de los parámetros de antenas más importantes que serán útiles para la realización del trabajo, entre los que se encuentran la directividad, los diagramas de radiación, entre otros. Tras estas breves nociones sobre antenas, se da paso a explicar las agrupaciones de antenas (arrays), que serán fundamentales para conseguir nuestros objetivos, pues son la base para conseguir que el beamforming se lleve a cabo. Después, se explicará cómo el uso

de los algoritmos genéticos nos ayudará a establecer unas amplitudes y fases óptimas para prolongar el tiempo de vida de las baterías de los sensores de nuestra WSN.

En segundo lugar, encontraremos la explicación del código mediante el cual se sostienen todas las simulaciones llevadas a cabo.

En tercer lugar, se muestran y se comentan todos los resultados obtenidos mediante las simulaciones. Los resultados se encuentran divididos en diversos casos de estudio, que pretenden agrupar de forma clara y concisa simulaciones similares, con el fin de que su discusión sea tan comprensible como sea posible.

Por último.....

2 **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.

2.1 **Teoría de antenas**

Véase [IEEE 1983], [Balanis 2005-1] y [Kraus 1988].

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.

2.1.1 **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.

2.1.2 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 θ y ϕ .

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

$$\vec{\rho}(\theta, \phi) = \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}) \Rightarrow |\vec{\rho}(\theta, \phi)| = \frac{E_\theta^2 + E_\phi^2}{\eta} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.1)$$

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

$$P_{rad} = \iint \vec{\rho}(\theta, \phi) \cdot d\vec{S} \quad (2.2)$$

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

$$K(\theta, \phi) = \rho(\theta, \phi) \cdot r^2 \quad [\text{W/estereorradián}] \quad (2.3)$$

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

$$P_{rad} = \iint K(\theta, \phi) \cdot d\Omega = \iint K(\theta, \phi) \cdot \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.4)$$

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:

$$P_{rad} = \iint K \, d\Omega = K \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \theta \, d\theta \, d\phi = 4\pi K \Rightarrow K = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (2.5)$$

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:

$$P_{rad} = 1 \quad (2.6)$$

2.1.3 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:

$$10\log\left(\frac{\langle\vec{P}\rangle}{\langle\vec{P}_{m\acute{a}x}\rangle}\right) = 20\log\left(\frac{|\vec{E}|}{|\vec{E}|_{m\acute{a}x}}\right) \quad (2.7)$$

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:

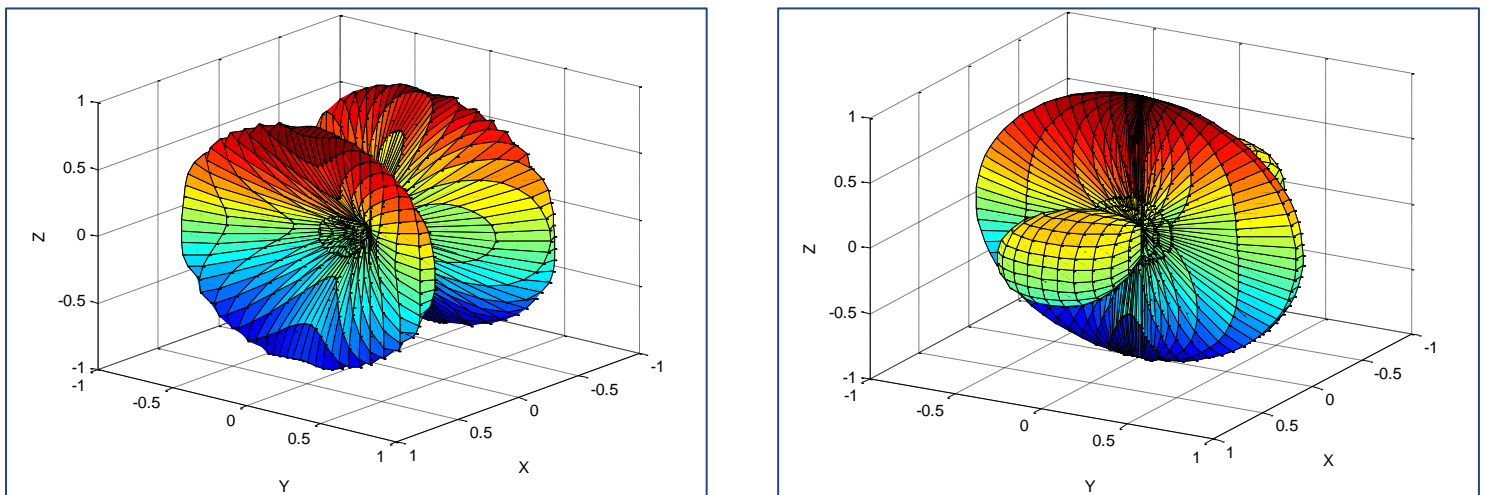


Fig. 2.1. Ejemplos de diagramas de radiación tridimensionales.

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 $\theta = 90^\circ$.

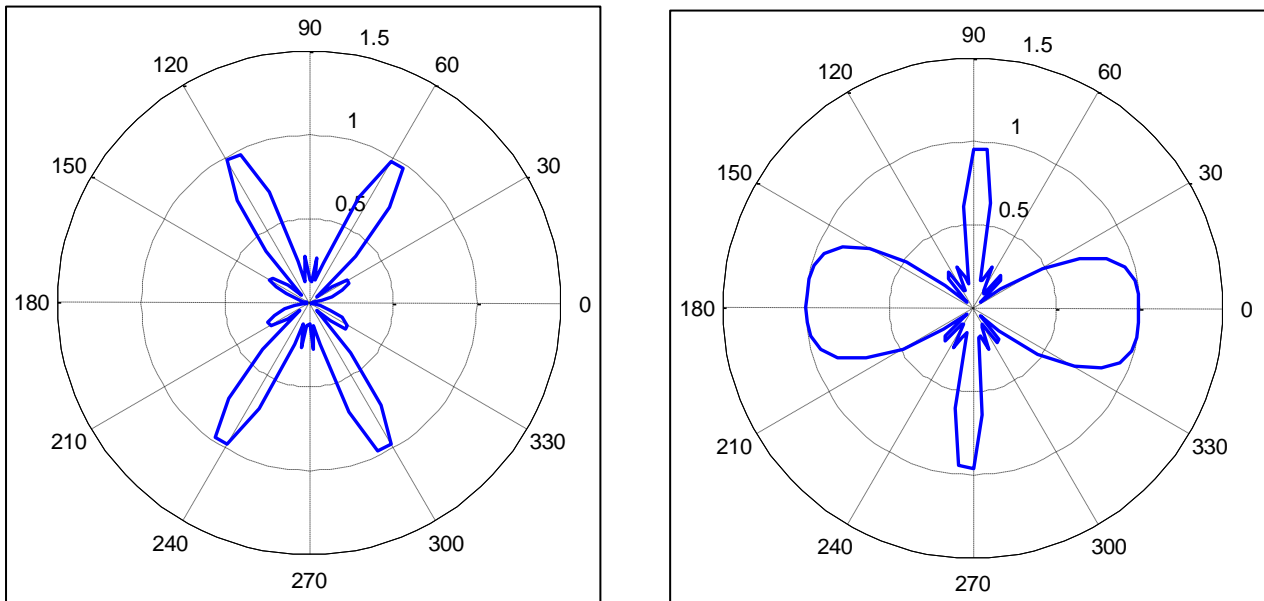


Fig. 2.2. Ejemplos de diagramas de radiación bidimensionales.

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 θ manteniendo ϕ 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 ϕ 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 siguiente se ejemplifican algunos de los parámetros comentados anteriormente.

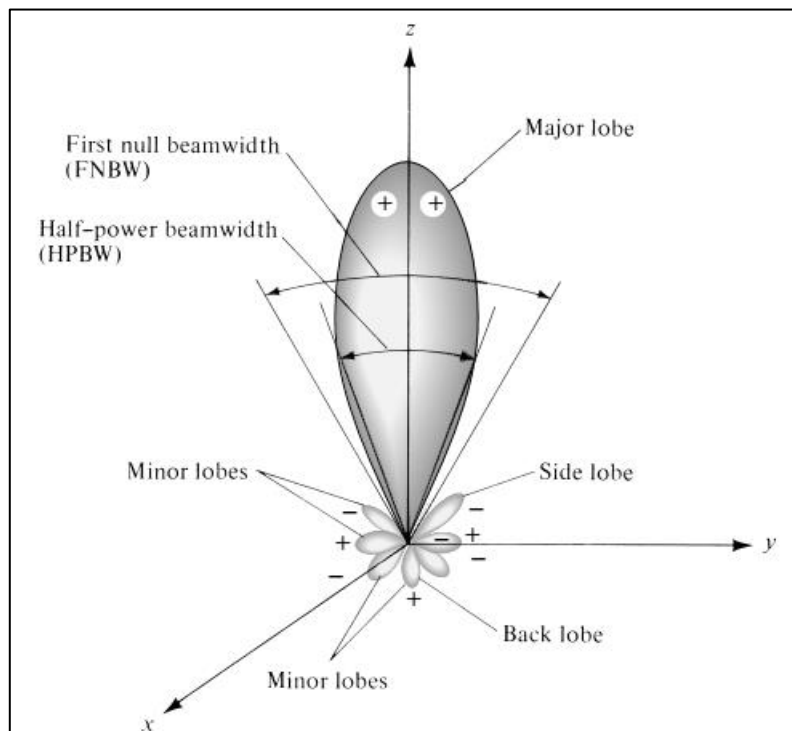


Fig. 2.3. Parámetros del diagrama de radiación. Fuente: [Balanis 2005-1].

2.1.4 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.

$$D_g(\theta, \phi) = D(\theta, \phi) = \frac{\wp(\theta, \phi)}{P_r/(4\pi r^2)} \quad (2.8)$$

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.

$$D = \frac{\wp_{m\acute{a}x}}{P_r/(4\pi r^2)} \quad (2.9)$$

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:

$$t_n(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_{m\acute{a}x}} = \frac{K(\theta, \phi)}{K_{m\acute{a}x}} \quad (2.10)$$

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

$$D = \frac{4\pi}{\iint_{4\pi} t(\theta, \phi) d\Omega} \quad (2.11)$$

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.

2.1.5 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 (θ, ϕ) 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.

2.1.6 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 isotrópicas (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:

$$l_o = \frac{P_{rec}}{P_{rad}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.12)$$

donde λ 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.

2.1.7 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.

2.2 Teoría de Beamforming

Véase [Balanis 2005-2].

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.

2.2.1 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.

2.2.2 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 Ψ_i y la amplitud de es a_i , el diagrama de radiación del array será:

$$S(\phi) = \sum_{i=1}^N S_e(\phi) a_i e^{j\Psi_i} = S_e(\phi) \sum_{i=1}^N a_i e^{j\Psi_i} = S_e(\phi) \cdot FA(\Psi) \quad (2.13)$$

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:

$$P(\phi) = \frac{1}{N^2} |S(\phi)|^2 \quad (2.14)$$

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

2.2.3 Métodos de análisis y síntesis de arrays

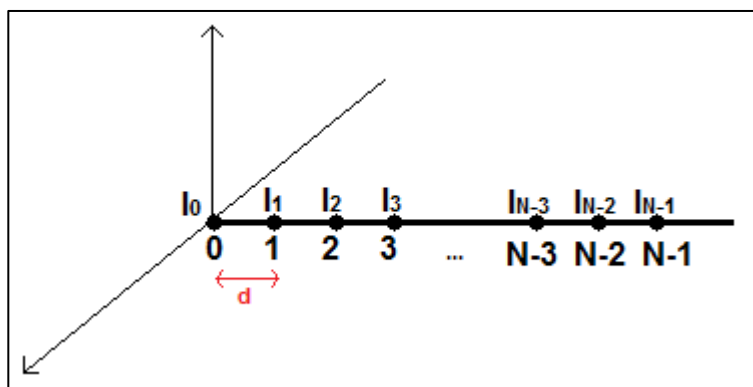


Fig. 2.4. Distribución de antenas a lo largo de un eje.

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 2.4), 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.

2.2.4 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:

$$eficiencia = \frac{\min(t_{vida_{x_B}})}{\min(t_{vida_x})} \quad (2.15)$$

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:

$$E_{ax} = E_t \cdot F_x \quad (2.16)$$

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

$$E_{cx} = P_{tx_x} \cdot t_x \quad (2.17)$$

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:

$$P_{ax} = P_{tx_x} \cdot F_x \quad (2.18)$$

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

$$E_t \cdot F_x = P_{tx_x} \cdot t_{vida_x} \quad (2.19)$$

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

$$t_{vida_x} = \frac{E_t \cdot F_x}{P_{tx_x}} \quad (2.20)$$

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:

$$P_{tx_x_B} = P_{tx_x} \cdot GB \quad (2.21)$$

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:

$$P_{tx_x} = \frac{P_{tx_x_B}}{GB} \quad (2.22)$$

Relacionando esta ecuación con (2.20), se tiene que el tiempo de vida de los sensores que usan beamforming es:

$$\frac{P_{tx_x_B}}{GB} = \frac{E_t \cdot F_x}{t_{vida_x}} \Rightarrow t_{vida_x_B} = \frac{E_t \cdot F_x \cdot GB}{P_{tx_x_B}} \quad (2.23)$$

Volviendo a la ecuación (2.20), 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:

$$GB = \frac{directividad_B}{directividad} \cdot \frac{X \cdot T}{X_B \cdot T} \Rightarrow GB = \frac{directividad_B}{directividad} \cdot \frac{1}{X_B} \quad (2.24)$$

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.

2.2.5 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 (2.24):

$$t_{vida_x} = \frac{E_t \cdot F_x}{P_{tx_x}} \quad t_{vida_x_B} = \frac{E_t \cdot F_x \cdot GB}{P_{tx_x_B}}$$

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.

2.2.6 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.

2.3 Teoría de Algoritmos Genéticos

Véase [Mitchell 1998].

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 [Padilla 2015].

Los algoritmos genéticos consisten en una búsqueda heurística que imitan las ideas evolutivas de la selección natural y la genética. Como tal, representan la utilización de una búsqueda aleatoria usada para resolver problemas de optimización. Aunque en un principio son aleatorios, resultan ser más bien pseudo-aleatorios, pues parten de un grupo aleatorio que irá convergiendo a una región óptima en el espacio de búsqueda. Las técnicas básicas de los algoritmos genéticos están diseñadas para simular procesos en sistemas naturales necesarias para la evolución, especialmente aquellas que siguen los principios acuñados por Charles Darwin de “supervivencia del más fuerte”. En la naturaleza, la competitividad entre los individuos para buscar recursos escasos resulta en el dominio de los más fuertes frente a los más débiles.

Los algoritmos genéticos funcionan mejor que la inteligencia artificial dado que son más robustos. Al contrario que los antiguos sistemas de IA, no rompen fácilmente incluso aunque las entradas se modifiquen ligeramente, ni tampoco en la presencia de ruido. Además, aunque el espacio de búsqueda sea grande, un algoritmo genético ofrece mayores beneficios que la mayoría de técnicas de optimización.

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.

2.3.1 Introducción

Los algoritmos genéticos simulan la supervivencia del más fuerte entre individuos sobre generaciones consecutivas para solucionar un problema. Cada generación consiste en una población con ciertas características, análoga a los cromosomas que vemos en nuestro ADN. Cada individuo representa un punto en un espacio de búsqueda y una posible solución. A los individuos de la población se les hace pasar a través del proceso de evolución.

Estos algoritmos se basan en la analogía con la estructura genética y el comportamiento de los cromosomas en una población de individuos, siguiendo los siguientes fundamentos:

- Los individuos de una población compiten por recursos.
- Los individuos más exitosos en cada “competición” producirán más “hijos” que aquellos individuos que lo han hecho peor.
- Los genes de los “buenos” individuos se propagan a través de la población, de modo que dos buenos padres a veces producirán mejores hijos que sus padres.
- Por tanto, cada generación sucesiva se adaptará mejor a su medio.

Una población de individuos se acota en un espacio de búsqueda, cada uno de ellos representando una posible solución a un problema dado. Cada individuo se codifica como un vector de componentes de longitud infinita, o variables, de acuerdo con un alfabeto, normalmente el alfabeto binario. Para continuar con la analogía de los genes, estos individuos se equiparan a los cromosomas y las variables son análogas a los genes.

Por tanto, un cromosoma (solución) está compuesto de varios genes (variables). A cada una de las soluciones se le asigna un resultado de aptitud (score), representando las habilidades de un individuo para “competir”. El individuo con el resultado de aptitud óptimo es el buscado. El algoritmo genético trata de “criar” las soluciones para producir “hijos” mejores que los padres, combinando la información de los cromosomas.

Las nuevas generaciones de soluciones se producen conteniendo, de media, mejores genes que una solución típica de una generación previa. Cada generación sucesiva contendrá mejores soluciones parciales que las generaciones anteriores. Con el tiempo, una vez que la población ha convergido y no produce hijos notablemente diferentes a las generaciones previas, se dice que el algoritmo ha convergido a un grupo de soluciones para el problema en cuestión. A esto se le llama criterio de parada; sin embargo, no es este el único criterio, pues existen otros como la cantidad de generaciones máximas u optimizar las soluciones hasta conseguir cierto porcentaje de la solución deseada.

2.3.2 Operadores

Tras una población inicial generada de forma aleatoria, el algoritmo evoluciona a través de tres operadores:

- **Selección.** Este operador equivale a la supervivencia del más fuerte. Con respecto a este operador, la idea clave es dar preferencia a los mejores individuos, permitiéndoles pasar sus genes a la siguiente generación. La bondad de cada individuo depende de su aptitud, que puede ser determinada por una función objetivo.
- **Cruzamiento.** Este operador distingue a los algoritmos genéticos de otras técnicas de optimización. Dos individuos se eligen de entre la población utilizando el operador de selección. Se elige aleatoriamente un punto de cruzamiento a lo largo de los vectores; entonces, se intercambian los valores de estos vectores, creándose dos hijos. Estos dos nuevos hijos se combinarán y pasarán a la siguiente generación. Recombinando partes de buenos individuos, es muy probable que este proceso cree incluso mejores individuos.
- **Mutación.** Con una baja probabilidad, una parte de los nuevos individuos tendrán sus bits cambiados. El propósito de este operador es mantener la diversidad de la población y evitar una convergencia temprana.

Los efectos que producen estos operadores genéticos se resumen a continuación:

- Usando solamente el operador de selección, el algoritmo tenderá a rellenar la población con copias de los mejores individuos de la población.
- Usando los operadores de selección y cruzamiento, se tenderá a causar que el algoritmo converja a una buena solución, aunque sub-óptima.
- Utilizando solamente el operador de mutación, se induce a una búsqueda aleatoria por el espacio de búsqueda.
- Usando los operadores de selección y mutación, se crea un algoritmo paralelo que es tolerante al ruido.

2.3.3 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:

$$\max\{t_{WSN} = \min(t_{vida_x_B}), x \in [1, \max_sensores]\} \quad (3.25)$$

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. El operador de selección será el método de selección por restos, se ha elegido cruzamiento heurístico con una probabilidad de 0.8 y mutación uniforme con probabilidad de 0.1.

2.3.4 Conclusión

En resumen, a lo largo de este apartado, se ha afirmado que gracias a los tres operadores mencionados (selección, cruzamiento y mutación), el algoritmo genético convergerá con las sucesivas generaciones a una solución óptima. Esta simple operación consiste en una técnica rápida, útil y robusta debido a que los algoritmos genéticos combinan la dirección y el azar de una manera efectiva y eficiente. Dado que la población contiene implícitamente mucha más información que simplemente el resultado de aptitud, los algoritmos genéticos combinan la información buena escondida en una solución con la información buena de otra solución para producir nuevas soluciones con buena información heredada de ambos padres, conduciendo a la solución óptima.

La habilidad del algoritmo para explorar y conseguir buenos resultados de forma simultánea y su aplicación con éxito a problemas del mundo real refuerza la conclusión de que los algoritmos genéticos son una técnica de optimización robusta y poderosa.

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.

3 Scripts creados

Una vez acabado el análisis teórico del proyecto, a continuación se explicará el código que permitirá llevar a cabo las distintas simulaciones, cuyos resultados se discutirán en el apartado **5. Resultados**. En primer lugar, se ofrece una introducción a la herramienta de desarrollo utilizada en este proyecto: MATLAB. En segundo lugar, se comentan los scripts base aportados por la herramienta “*Phased Array Design Toolbox V2.4 for Matlab*”, que servirán para realizar distintos cálculos como la directividad y el campo del array que forme nuestra WSN. Por último, se comentarán los scripts que han sido diseñados para unir las distintas opciones de la herramienta arriba mencionada y el beamforming y los algoritmos genéticos, dando lugar a los resultados del proyecto.

3.1 Herramienta de desarrollo: MATLAB

MATLAB (*MATrix LABoratory*, o Laboratorio de Matrices) es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (el lenguaje M). MATLAB permite trabajar con matrices, dibujar funciones y datos, implementar algoritmos, crear interfaces de usuario e interactuar con programas escritos en otros lenguajes. El uso de matrices será esencial para este proyecto; la representación de datos será muy importante para poder visualizar los resultados; la implementación de algoritmo será clave para poder combinar el beamforming y los algoritmos genéticos para conseguir nuestro objetivo. Por estos motivos, MATLAB es la herramienta de desarrollo escogida para este proyecto.

En 2004, MATLAB tenía alrededor de un millón de usuarios, tanto del entorno empresarial como el académico. Estos usuarios provienen de ingenierías, ciencias y económicas.

La aplicación MATLAB está construida en torno a su propio lenguaje de programación. Un uso común de MATLAB se realiza a través de su propia ventana de comandos, que es interactiva y, a través de ella, se pueden ejecutar ficheros que contiene código MATLAB.

3.2 Phased Array Design Toolbox V2.4 for MATLAB

Dada la versatilidad que ofrece MATLAB, es posible usar las llamadas *Toolboxes*, o grupos de funcionalidades agrupadas, que pueden ser creadas por usuarios y que aportan a MATLAB un gran conjunto de herramientas. Una de ellas es Phased Array Design Toolbox V2.4 for MATLAB, creada por Neill Tucker. Esta herramienta será la base para poder realizar el estudio del beamforming en nuestro proyecto. En los apartados siguientes, se comentarán algunas de las funciones que nos serán útiles; otras, en cambio, no son usadas para el desarrollo del trabajo.

3.2.1 asdasd asd