



TRABAJO FIN DE GRADO  
INGENIERÍA EN INGENIERÍA DE  
TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

# Optimización de redes de sensores

---

## Autor

Francisco Porcel Rodríguez

## Directores

Juan Francisco Valenzuela Valdés  
Pablo Padilla de la Torre

Aquí se puede incluir nombre y logo del  
Departamento responsable del proyecto



Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de  
Telecomunicación

—  
Granada, Marzo de 2016









ugr

Universidad  
de Granada

Alternativamente, el logo de la UGR puede sustituirse /  
complementarse con uno específico del proyecto

# Optimización de redes de sensores

---

## Autor

Francisco Porcel Rodríguez

## Directores

Juan Francisco Valenzuela Valdés

Pablo Padilla de la Torre



## Optimización de redes de sensores

Francisco Porcel Rodríguez

**Palabras clave:** WSN, beamforming, optimización de la energía, nodo, sensor, eficiencia energética, MATLAB, antena, algoritmos genéticos, redes de sensores

### Resumen

En este proyecto se realiza un estudio sobre la optimización de la energía en las redes de sensores inalámbricas. 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. También se prevé que estas redes sean utilizadas para el despliegue de la nueva generación de dispositivos móviles 5G. 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.

El objetivo del beamforming no es otro que conseguir que un array de antenas dado presente un diagrama de radiación especificado. De esta manera, se pretende que la WSN radie en una dirección deseada, es decir, la dirección de la estación base, haciendo que el diagrama de radiación presente un lóbulo considerable en esa dirección. Actualmente, las técnicas existentes para calcular fases y amplitudes para cada una de las antenas para poder diseñar el diagrama de radiación están estrechamente relacionadas con el escenario que se presente, pues dependen directamente de la posición relativa entre sensores. Para ello, deben estar alineados, dispuestos en una circunferencia, etc.

Sin embargo, en los escenarios de las WSNs, los nodos pueden estar establecidos de forma arbitraria en un plano (2D) o incluso un volumen (3D). Por ello, en este proyecto se pretende realizar el cálculo de las fases y amplitudes mediante la técnica de los algoritmos genéticos. Con ellos, de una forma iterativa, es posible calcular esas variables, de tal forma que la directividad sea elevada en esa dirección, haciendo que la potencia recibida por la estación base aumente incluso reduciendo la potencia de los sensores de la WSN, prolongando así el tiempo de vida de sus baterías. De este modo, se conseguiría optimizar su tiempo de vida, el cual es el principal objetivo de este proyecto.

Tras llevar a cabo las distintas simulaciones que componen el proyecto, el resultado obtenido ha sido...







# Optimization in Wireless Sensor Networks

Francisco Porcel Rodríguez

**Keywords:** WSN, beamforming, optimization of energy, node, sensor, energetic efficiency, MATLAB, antenna, genetic algorithms

## Abstract

In this project, a study about the optimization of energy on Wireless Sensor Networks (WSN from now on) has been accomplished. WSNs consist of a network of autonomous sensors distributed along an area, whose main purpose is to monitor physical or environmental conditions, such as temperature, sound or pressure, among others. It is also expected that WSNs shall be used in the deployment of the new generation of wireless systems 5G. Besides, these networks can cooperate to send the data to a base station. Their development was motivated by military applications, such as surveillance of the battlefield.

WSNs have a wide range of applications, as they can adapt to different environments. They can operate independently in places where human presence is risky or even impossible. Given the fact that their life time depends on their batteries and their changing or charging might be impossible in places whose access is complicated, algorithms which can prolong the battery of the nodes are needed. This is what this project consists of: study a method which prolongs the life time of the sensors, by making them acting cooperatively to radiate less power in a certain direction, but receiving more power in the base station than usual WSNs. This method will be the so called beamforming.

The aim of beamforming is no other than to make a certain antenna array present a specified radiation pattern. This way, the main purpose is to make the WSN radiate in a desired direction, that is, the direction of the base station, by making the radiation pattern have a considerable beam in that direction. Nowadays, the existing techniques for calculating the phases and amplitudes for each antenna for designing the radiation pattern are closely related to the scenario of these antennas, as they directly depend on the relative position of the sensors. In order to use these techniques, they must be lined up, organized on a circumference, etc.

However, in the WSN scenarios, nodes can be established in a random way in a plane (2D) or even a volume (3D). So, the purpose of this project is to make the calculation of phases and amplitudes by means of an optimization technique called genetic algorithms. With their help, in an iterative way, it is possible to calculate these variables, in such a way that the directivity is very high in the desired direction, so that the received power by the base station is also higher even reducing the power that the nodes of the WSN radiate, prolonging the life time of their batteries. This way, it would be possible to optimize their life time, which is the main objective of this project.

After carrying out the different simulations studied in the project, the result has been...



---

Yo, **Francisco Porcel Rodríguez**, alumno de la titulación Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación de la **Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación de la Universidad de Granada**, con DNI 75166247Q, autorizo la ubicación de la siguiente copia de mi Trabajo Fin de Grado en la biblioteca del centro para que pueda ser consultada por las personas que lo deseen.

Fdo: Francisco Porcel Rodríguez

Granada a X de Julio de 2016.



---

D. **Juan Francisco Valenzuela Valdés**, Profesor del área de XXXX del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada.

D. **Pablo Padilla de la Torre**, Profesor del área de XXXX del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada.

**Informan:**

Que el presente trabajo, titulado ***Optimización en redes de sensores***, ha sido realizado bajo su supervisión por **Francisco Porcel Rodríguez**, y autorizamos la defensa de dicho trabajo ante el tribunal que corresponda.

Y para que conste, expiden y firman el presente informe en Granada a X de mes Julio de 2016.

**Los directores:**

**Juan Francisco Valenzuela Valdés**

**Pablo Padilla de la Torre**



# Agradecimientos

Poner aquí agradecimientos...



## Índice:

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Organización .....	4
<b>2</b>	<b>Análisis teórico.....</b>	<b>6</b>
2.1	Teoría de antenas.....	6
2.1.1	Introducción.....	6
2.1.2	Intensidad de radiación.....	7
2.1.3	Diagramas de radiación .....	8
2.1.4	Ganancia directiva y directividad .....	11
2.1.5	Polarización .....	11
2.1.6	Ecuación de transmisión de Friis .....	12
2.1.7	Conclusión .....	12
2.2	Teoría de Beamforming.....	13
2.2.1	Introducción.....	13
2.2.2	Factor de array y diagrama de radiación.....	13
2.2.3	Métodos de análisis y síntesis de arrays .....	14
2.2.4	Tiempo de vida de los sensores .....	16
2.2.5	Objetivo a conseguir con el beamforming.....	19
2.2.6	Conclusión .....	19
2.3	Teoría de Algoritmos Genéticos .....	19
2.3.1	Introducción.....	20
2.3.2	Operadores.....	21
2.3.3	Adaptación de los algoritmos genéticos al proyecto .....	22
2.3.4	Conclusión .....	22
<b>3</b>	<b>Scripts creados.....</b>	<b>23</b>
3.1	Herramienta de desarrollo: MATLAB .....	23
3.2	Phased Array Design Toolbox V2.4 for MATLAB.....	23
3.2.1	Fundamento teórico de la herramienta .....	24
3.2.2	Variables y funciones .....	26

<b>4 Realización práctica.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 Escenarios.....</b>	<b>28</b>
<b>4.2 Caso base .....</b>	<b>28</b>
4.2.1 Cambio de comparación .....	32
<b>4.3 Dirección de radiación genérica .....</b>	<b>36</b>
4.3.1 Caso de estudio 1 .....	36
4.3.1.1 1 cluster.....	40
4.3.1.2 2 clusters .....	43
4.3.1.3 3 clusters .....	46
4.3.1.4 Cantidad de clusters optimizada .....	47
4.3.1.5 Comparativa en función de la cantidad de clusters.....	49
4.3.2 Caso de estudio 2.....	51
4.3.2.1 1 cluster.....	51
4.3.2.2 2 clusters .....	55
4.3.2.3 3 clusters .....	57
4.3.2.4 Cantidad de clusters optimizada .....	58
4.3.2.5 Comparativa en función de la cantidad de clusters.....	61
4.3.3 Caso de estudio 3 .....	62
4.3.3.1 1 cluster.....	64
4.3.3.2 2 clusters .....	66
4.3.3.3 3 clusters .....	68
4.3.3.4 Cantidad de clusters optimizada .....	69
4.3.3.5 Comparativa en función de la cantidad de clusters.....	71
4.3.4 Caso de estudio 4.....	72
4.3.4.1 1 cluster.....	74
4.3.4.2 2 clusters .....	76
4.3.4.3 3 clusters .....	78
4.3.4.4 Cantidad de clusters optimizada .....	79
4.3.4.5 Comparativa en función de la cantidad de clusters.....	81
4.3.5 Comparativa de los distintos casos de estudio.....	82
4.3.5.1 2 sensores .....	82
4.3.5.2 5 sensores .....	83
4.3.5.3 10 sensores .....	84

4.3.5.4	20 sensores .....	85
4.3.5.5	50 sensores .....	86
4.3.5.6	Conclusión .....	87
4.3.6	Eficiencia máxima .....	89
4.3.7	Explicación al efecto observado en los casos de estudio en 2D .....	91
<b>4.4</b>	<b>Estaciones base .....</b>	<b>97</b>

# Optimización en redes de sensores

Francisco Porcel Rodríguez – 75166247Q

## 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 red 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 ( $\phi, \theta$ ) 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..... (PENDIENTE)



## 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  $\theta$  y  $\phi$ .

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:

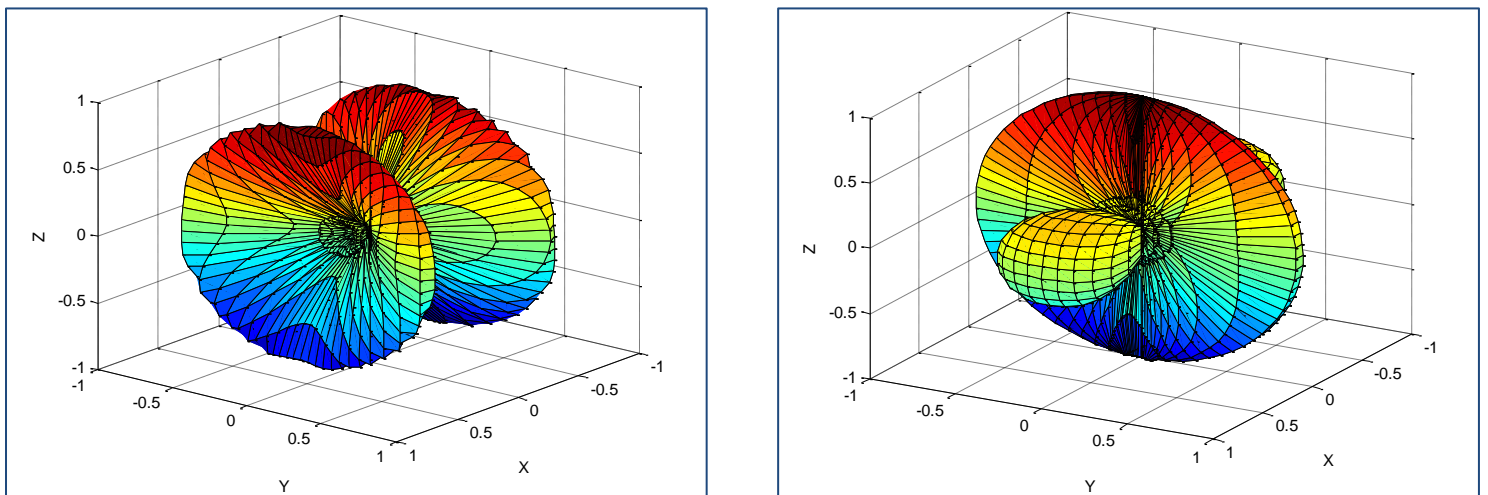


Fig. 2.1. Ejemplos de diagramas de radiación tridimensionales.

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  $\theta = 90^\circ$ .

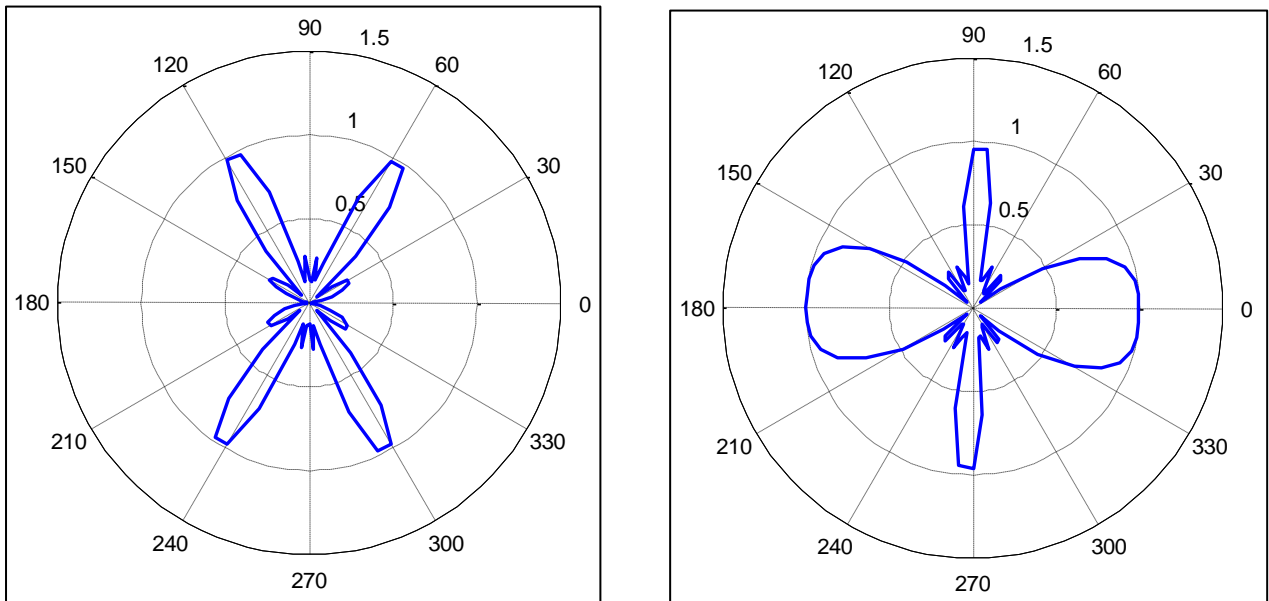


Fig. 2.2. Ejemplos de diagramas de radiación bidimensionales.

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  $\theta$  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 siguiente se ejemplifican algunos de los parámetros comentados anteriormente.

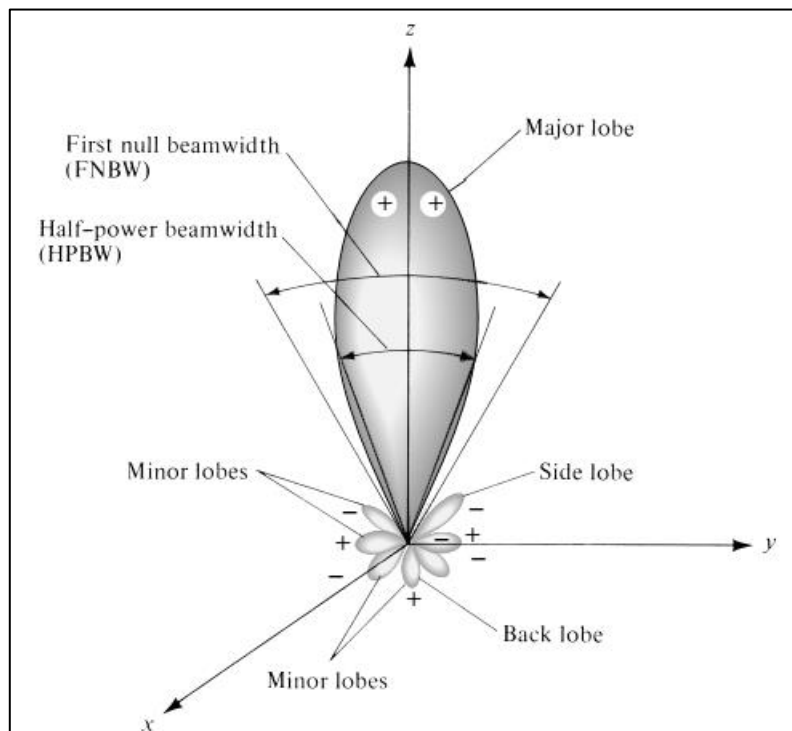


Fig. 2.3. Parámetros del diagrama de radiación. Fuente: [Balanis 2005-1].

### 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  $(\theta, \phi)$  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.

### 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 isótropas (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  $\lambda$  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.

### 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  $\Psi_i$  y la amplitud de es  $a_i$ , el diagrama de radiación del array será:

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

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

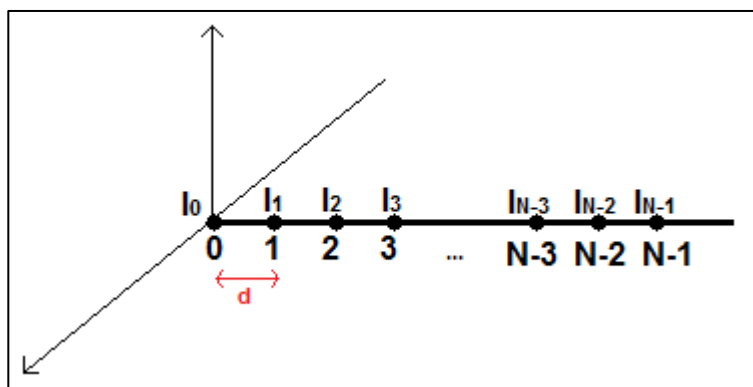


Fig. 2.4. Distribución de antenas a lo largo de un eje.

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  $x$  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:

$$\max\{t_{WSN} = \min(t_{vida\_x\_B}), x \in [1, \max\_sensores]\} \quad (2.25)$$

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

Véase [Tucker 2009].

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 Fundamento teórico de la herramienta

Existen diversas técnicas numéricas utilizadas para diseñar y desarrollar antenas. Una de estas técnicas se basa en la técnica de onda completa, usada para obtener las densidades de corriente y, de este modo, los campos radiados para estructuras arbitrarias. Sin embargo, esta técnica eleva el coste computacional, aunque es útil para arrays de antenas que puedan ser eléctricamente grandes y, por tanto, pueden representar un problema de análisis muy significativo. Conforme aumenta el número de elementos, el problema comienza a relacionarse más con la geometría y con la excitación de los componentes que con los mismos elementos.

Usando modelos matemáticos para los diagramas de radiación específicos de cada elemento, combinándolos geoméricamente en el campo lejano, se pueden calcular los parámetros de un array grande con gran precisión y menor coste computacional. De ello se encarga esta toolbox, de definir de forma rápida y concisa arrays de antenas en dos y tres dimensiones, además de analizarlos. No es poca la variedad de elementos con los que puede trabajar, pues puede implementar arrays de dipolos, parches microstrip, antenas helicoidales o cualquier función que defina el usuario.

Aunque este toolbox es una herramienta muy versátil, se basa en un proceso muy simple de suma de vectores. Acudiendo a la física básica, se conoce que dos o más fuentes de ondas sinusoidales, con una relación de fase definida, generarán un patrón de interferencia. Para producir dicho patrón, solo es necesario escoger una línea o una superficie en un punto distante de las fuentes, es decir, el plano donde se sumarán los campos. Donde las ondas llegan en fase, habrá interferencia constructiva y un máximo, donde lleguen en contra-fase, habrá interferencia destructiva y un mínimo. Esta suma de ondas senoidales según la distancia relativa y la fase entre la fuente y los puntos donde se sumarán los campos es lo único que se necesita para calcular el diagrama de radiación de un array. La dificultad aparece cuando las fuentes son direccionales y están localizadas en 3 dimensiones: el proceso de suma es idéntico, pero hace que trabajar con la trigonometría sea más difícil.

A continuación se detalla el proceso que siguen simuladores como HFSS, IE3D, Sonnet y NEC para resolver el diagrama de radiación:

1. Dividir la estructura en pequeños segmentos.
2. Asignar una función a cada segmento, representando la densidad de corriente que posee.
3. Generar una ecuación matricial que represente la interacción entre cada segmento y los demás.
4. Resolver la ecuación matricial, normalmente invirtiéndola, para obtener los coeficientes de las funciones base y las densidades de corriente.
5. Calcular los diagramas de campo lejano y otros parámetros usando las corrientes de cada segmento.

A pesar de que pueda parecer una descripción muy simplificada del algoritmo, ilustra que el número de segmentos puede crecer muy rápido. Concretamente, siendo la

cantidad de segmentos del problema igual a  $N$ , el coste computacional resulta ser igual a  $N^2$ . Como regla general, no deberían existir segmentos mayores que  $1/10$  de la longitud de onda. De este modo, un parche de microstrip de media longitud de onda tendrá al menos 25 segmentos. Un array de parches de 10 elementos de este tipo requerirá un total de 2500 segmentos, lo cual conlleva una matriz de  $2500 \times 2500$  para invertir, que no es en absoluto un problema trivial. El beneficio de usar la solución de onda completa es que todos los parámetros de interés pueden obtenerse de las densidades de corriente, una vez sean calculadas. Estos parámetros incluyen: el diagrama de campo lejano, campos cercanos, impedancia de entrada y acoplamiento mutuo. La contrapartida es que la mayor parte del coste computacional reside en resolver la ecuación matricial, lo cual es inevitable, pues mediante ella se calculan los parámetros arriba mencionados. Aunque el enfoque de la toolbox está altamente basado en la geometría, la ventaja principal es que el coste computacional está relacionado con la cantidad de información que se le requiera calcular, con muy pocos cálculos redundantes.

De este modo, esta herramienta deja de lado el cálculo de algunos parámetros mencionados anteriormente, como la impedancia de entrada, el acoplamiento mutuo o los campos cercanos. Sin embargo, el interés de formar arrays es diseñar un diagrama de radiación específico, de forma que esos parámetros no son tan interesantes.

Otra de las ventajas que ofrece esta toolbox es su descripción simbólica de la geometría del array (orientación de los elementos, excitación de los mismos y tipo de elemento). Estas características pueden ser editadas fácilmente usando unos sencillos scripts.

Para alcanzar un diagrama de radiación deseado, el proceso de modelado se puede llevar a cabo de dos maneras distintas:

- Simulación del diagrama. Se diseña un array, con sus distribuciones de fase y amplitud y se calcula el diagrama a partir de estos valores.
- Síntesis del diagrama. Se especifica un diagrama de radiación usando una plantilla, y se buscan las excitaciones en fase y amplitud para obtener el diagrama de radiación deseado. Dependiendo del diagrama requerido, la solución puede no ser trivial, por lo que se requeriría un bucle de optimización.

Dado que nuestro deseo es el de integrar esta herramienta con los algoritmos genéticos, que serán los encargados de encontrar una fase y amplitud óptimas para cada elemento, la solución que se usará en el proyecto será la primera, la de simular el diagrama. Los algoritmos genéticos se encargarán de proporcionar la fase y amplitud necesarias y la posición de los elementos vendrá dada por el escenario que se esté tratando.

En la figura 3.1 se muestra el sistema de coordenadas usado por la toolbox, tanto en coordenadas esféricas como cartesianas. Como se puede apreciar, el estándar utilizado es el mismo que se ha estudiado a lo largo de las asignaturas impartidas a lo largo del Grado. Además del sistema de coordenadas, podemos ver las ecuaciones necesarias para pasar de un sistema a otro.

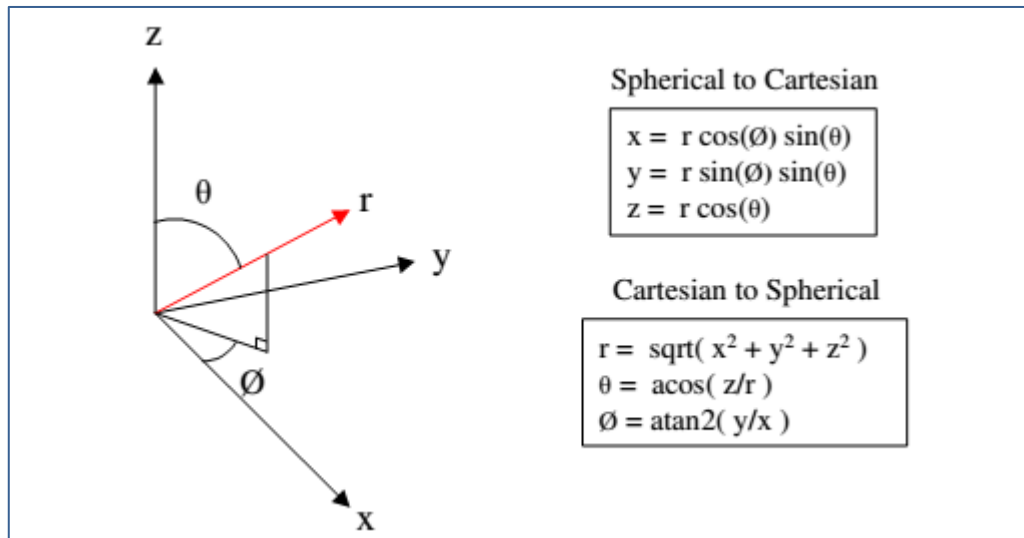


Figura 3.1. Sistema de coordenadas y transformaciones de la toolbox. Fuente: [Tucker 2009]

### 3.2.2 Variables y funciones

A pesar de que existen distintas variables globales usadas por la toolbox, la más importante es la llamada *array\_config*. Para un array de N elementos, *array\_config* es una matriz de dimensiones 3x5xN, que describe la orientación, la posición, la excitación y el tipo de elemento. Cada una de las matrices bidimensionales de las N totales tiene la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} L & M & N & Xoff & Amplitud \\ O & P & Q & Yoff & Fase \\ R & S & T & Zoff & Tipo de elemento \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

En la matriz de la ecuación 3.1, existen distintas submatrices:

- (*L M N; O P Q; R S T*): es la matriz de rotación del elemento. En el proyecto, supondremos que los elementos no tienen rotación y todos están orientados de la misma forma.
- (*Xoff; Yoff; Zoff*): es la posición (X, Y, Z) del elemento y será clave para disponer los nodos en el escenario. Esta posición se toma con respecto al eje de coordenadas y se mide en metros.
- *Amplitud*: se trata de la amplitud que se le proporciona al elemento y se mide en voltios lineales.
- *Fase*: es la fase del elemento en cuestión y se mide en radianes.
- *Tipo de elemento*: esta variable identifica el tipo de antena. Se trata de un entero que puede tomar los valores de la tabla 3.1.

Tipo de antena	Valor en <i>array_config</i>
Isotrópica	0
Parche microstrip rectangular	1
Parche microstrip circular	2
Dipolo	3
Dipolo con plano de tierra	4

Helicoidal	5
Apertura rectangular	6
Apertura circular	7
Guía de ondas rectangular	8
Guía de ondas circular	9
Disco parabólico	10

Tabla 3.1. Tipos de antena permitidos en la toolbox.

Esta será la variable más importante que se usará a lo largo de todo el script. Como vemos, es capaz de reunir todo el escenario, pues cuenta con la posición, amplitud y fase de todos los sensores. Sin embargo, introducir toda la información del escenario en la variable puede resultar tedioso. Por ello, la toolbox usa la función *place\_element*.

El uso de esta función es:

$$place\_element(array\_config, xr, yr, zr, x, y, z, tipo, potencia, fase) \quad (3.2)$$

La explicación de cada uno de los valores que puede recibir la función aparece en la tabla 3.2.

Variable	Explicación
<i>array_config</i>	<i>array_config</i> donde introducir los datos
xr	Rotación del elemento con respecto al eje X, Y y Z, en grados
yr	
zr	
x	Posición (X, Y, Z) en metros
y	
z	
tipo	Tipo de antena (ver tabla 3.1)
potencia	Potencia en $V^2$ (dB)
fase	Fase en grados

Tabla 3.2. Variables de la función *place\_element*.

FALTA POR COMPLETAR

## 4 Realización práctica

La base de este trabajo reside en los distintos casos de estudio que se proponen para estudiar la mejora en eficiencia al hacer uso del beamforming con distintas antenas. Para cada uno de los casos, se tratará de optimizar el tiempo de vida de los sensores mediante los algoritmos genéticos. Además, también es posible optimizar el número de clusters apropiado para cada caso. Una vez optimizados estos parámetros, se comparará el tiempo de vida con un caso similar, en el que no se esté utilizando el beamforming, con el fin de poder calcular la eficiencia energética al usar este método. A continuación, se presenta un apartado en el que se explican los tipos de escenarios que podemos encontrar en las WSN; posteriormente, se presentan los distintos casos de estudio.

### 4.1 Escenarios

### 4.2 Caso base

En este primer caso, se disponen cuatro sensores a lo largo de un solo eje, el eje X. Estos sensores se encuentran fijos, separados una distancia unidad. Se consideran antenas isotrópicas, que radiarán de igual forma en todas las direcciones. Situando la estación base en un punto alejado en el eje Y, tendremos que optimizar el diagrama de radiación en la dirección  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ . Además, las baterías de cada sensor están cargadas al máximo y son todas iguales. Dado que las cargas de las baterías están normalizadas según su valor máximo, será un valor unidad.

Realizando una representación del diagrama de radiación de los sensores usando beamforming en función del tiempo, obtenemos lo siguiente. A la derecha, se presenta el mismo diagrama de radiación, pero sin usar beamforming. Los sensores que no usan beamforming se encuentran en fase y entregan el máximo de potencia permitida.

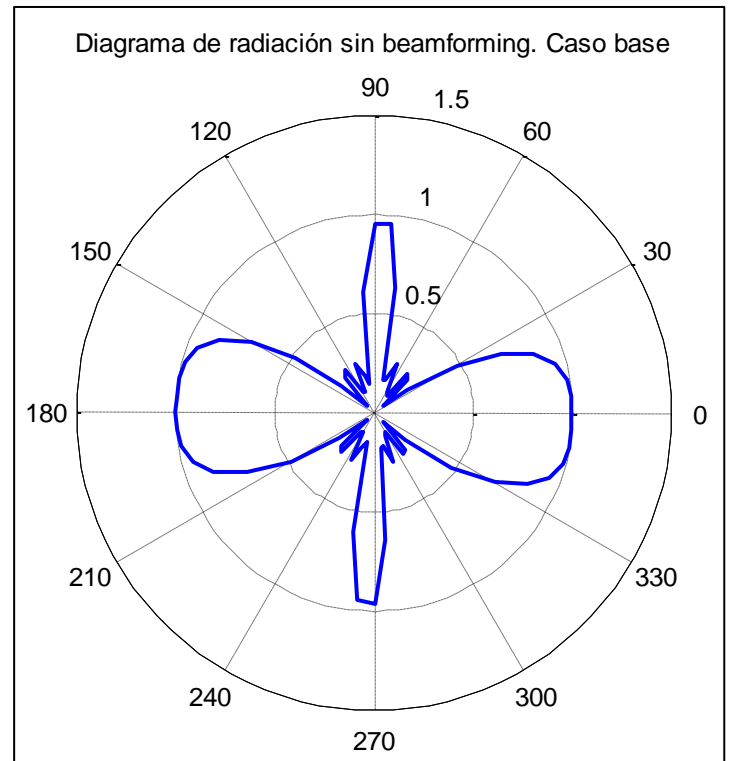
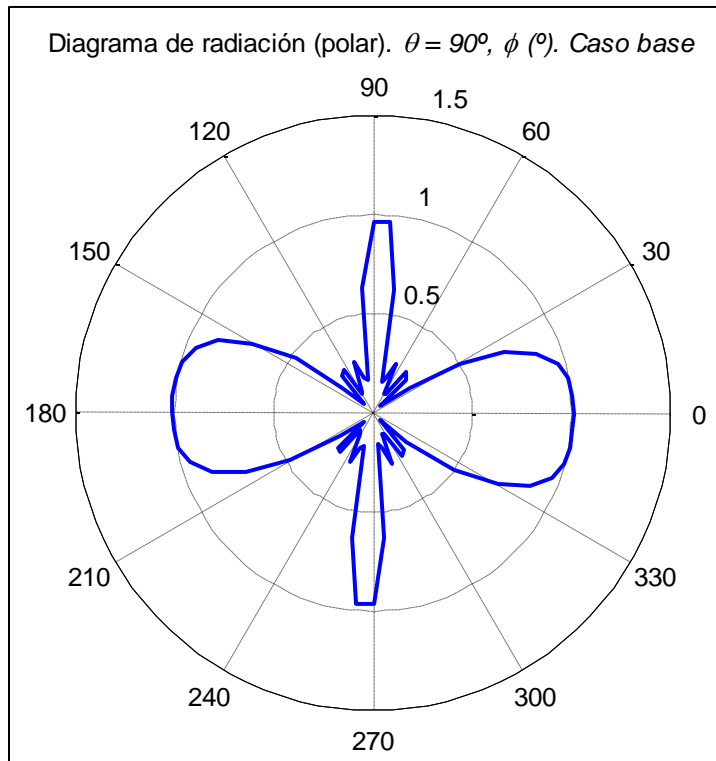


Fig. 4.2.1. Diagramas de radiación (polar). Dirección de radiación deseada:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ .

Se presentan también los diagramas de radiación en tres dimensiones.

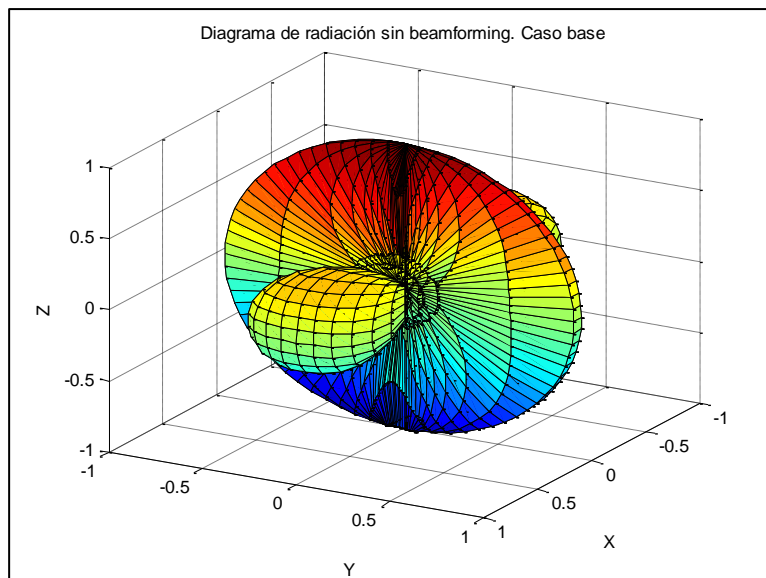
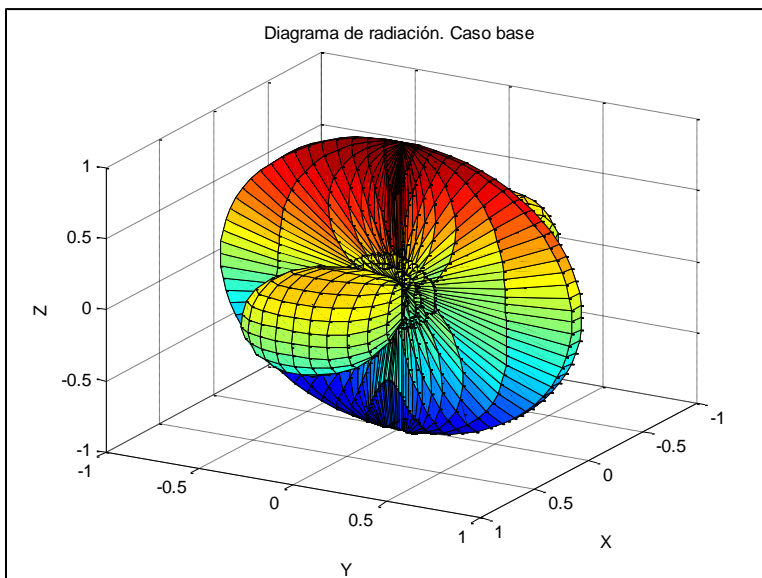


Fig. 4.2.2. Diagramas de radiación (tridimensional). Dirección de radiación deseada:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ .

Dado que la optimización se realiza también en función del tiempo, se ha comprobado que el diagrama de radiación usando beamforming conforme transcurre el tiempo tan solo sufre variaciones muy leves. Podemos comprobar así el correcto funcionamiento del algoritmo que se ha implementado, pues dado que los sensores están fijos a lo largo del tiempo, también será fijo el diagrama de radiación resultante. En el caso en que los sensores no usan beamforming, el diagrama de radiación es constante a lo largo del tiempo, pues siempre radian de la misma manera. Vemos que existen unos



lóbulos laterales destacables y un gran lóbulo situado en el plano YZ, en la dirección en la que se desea radiar.

En cuanto a los clusters, en la gran mayoría de instantes de tiempo, todos los sensores pertenecen al mismo cluster. Se podría pensar que dado que los sensores se encuentran fijos, esta situación no debería cambiar. Sin embargo, debido al carácter pseudoaleatorio de los algoritmos genéticos, existen algunos instantes de tiempo en los que se llegan a crear hasta dos clusters. Cuando esto ocurre, el diagrama de radiación para cada cluster varía e incluso no llega a presentar un lóbulo importante en la dirección de radiación deseada. Esto significa que el algoritmo de optimización no ha logrado optimizar adecuadamente la cantidad de clusters, pues no se consigue el objetivo deseado.

A la vista de los resultados y dado que ambos diagramas de radiación son iguales, cabría esperar que la eficiencia al usar beamforming fuera prácticamente del 100%, es decir, que el tiempo de vida de los sensores sea el mismo que el caso en el que no se use beamforming. Sin embargo, la eficiencia obtenida es de tan solo el 86.6%, lo cual quiere decir que los sensores tienen un tiempo de vida un 13.4% inferior al tiempo de vida de los sensores que no usan beamforming (se considera en todo momento que cuando el tiempo de vida es el mismo para ambos casos la eficiencia será del 100%).

Como vemos, este resultado no es muy alentador y podría indicar que el uso del beamforming no es realmente útil. Pero estudiemos a qué se debe este comportamiento ineficiente de los sensores. Debemos tener claro que el array formado por una serie de antenas isotrópicas dispuestas a lo largo de un eje y equiespaciadas entre sí tendrá su dirección de máxima radiación en el plano transversal al eje formado por este array. De este modo, dado que hemos colocado los sensores en el eje X, la máxima radiación se producirá en el plano YZ, es decir, para los ángulos  $\varphi = 90^\circ$  y  $\varphi = 270^\circ$ . El ángulo  $\varphi = 90^\circ$  es precisamente el ángulo para el cual queremos optimizar el diagrama de radiación, de manera que el diagrama de radiación de las antenas que no usan beamforming ya está apuntando en esa dirección. De esta forma, el coste energético que conlleva el sincronismo de los 4 sensores (14%, como se puede consultar en el apartado **XXXSINCRONISMO**) implica una reducción en el tiempo de vida de los sensores y, por tanto, una eficiencia reducida. De hecho, la eficiencia que hemos obtenido es aproximadamente una eficiencia un 14% inferior, debido al sincronismo que deben llevar a cabo los sensores.

Por este motivo, dado que ambos casos presentan un gran lóbulo en la dirección de radiación, se decide llevar a cabo el mismo tipo de estudio (con la misma disposición de los sensores), pero cambiando el ángulo en el cual se situará la estación base. La nueva dirección será  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 60^\circ$ . Tras la simulación del beamforming para esta nueva dirección, se obtienen los siguientes diagramas de radiación.

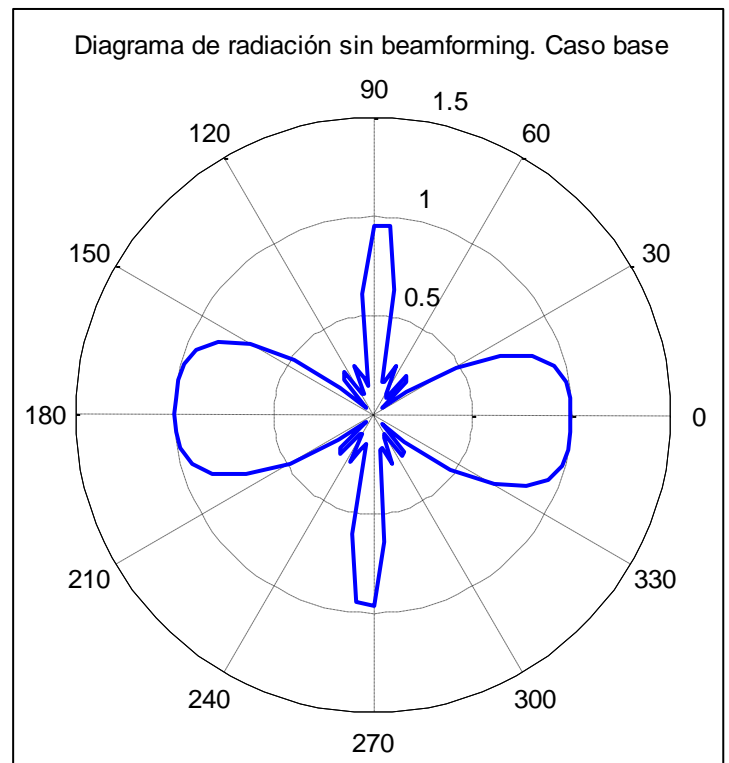
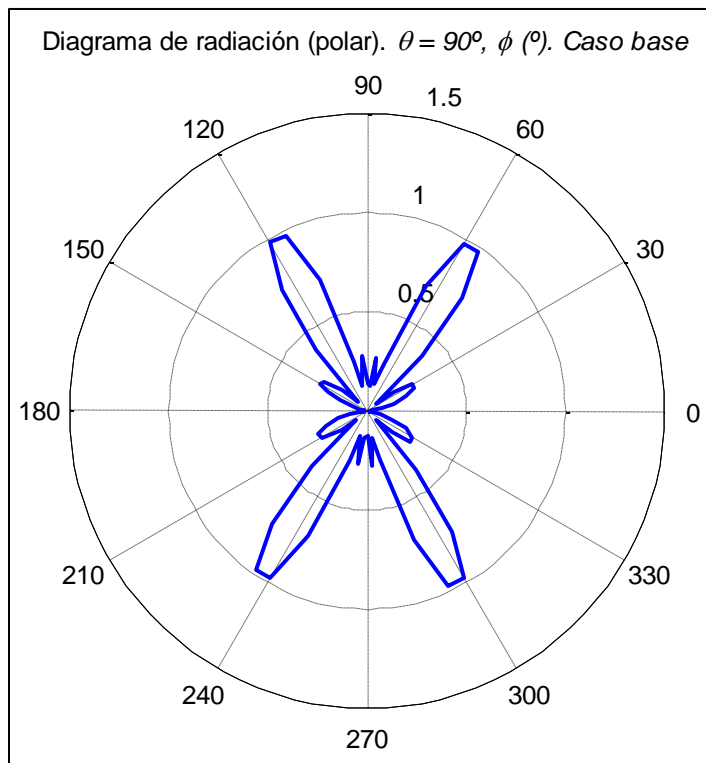


Fig. 4.2.3. Diagramas de radiación (polar). Dirección de radiación deseada:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 60^\circ$ .

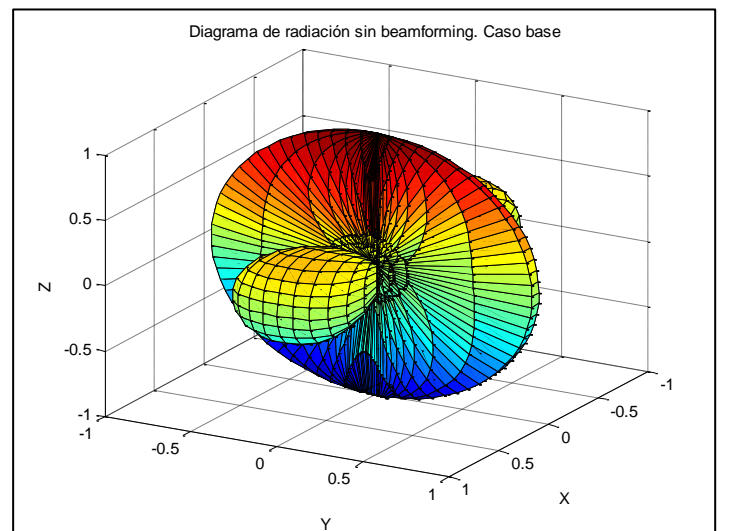
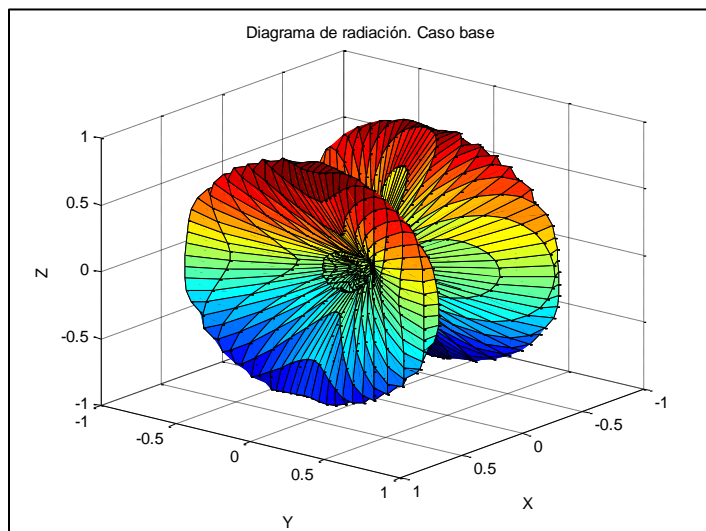


Fig. 4.2.4. Diagramas de radiación (tridimensional). Dirección de radiación deseada:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 60^\circ$ .

Como podemos ver, gracias al uso del beamforming, conseguimos que haya un máximo del diagrama de radiación en el ángulo que deseamos,  $\phi = 60^\circ$ , máximo que también se da para  $120^\circ$ ,  $240^\circ$  y  $300^\circ$ . Sin embargo, en caso de no usar beamforming, el diagrama de radiación de estas antenas tendrá prácticamente un nulo justo en esa dirección, con la consecuente reducción de potencia recibida con respecto al uso de beamforming. Mediante el estudio de los resultados obtenidos, se comprueba que el algoritmo de optimización ha considerado oportuno que todos los sensores pertenezcan al mismo cluster para alcanzar los resultados adecuados en todos los instantes de tiempo.

Tras haber analizado los diagramas de radiación, se presentan ahora las mejoras en lo que a eficiencia se refiere en el caso en el que se utilice beamforming. Para este caso concreto, se obtiene una eficiencia del  $2,175 \cdot 10^6$  %, es decir, usar beamforming hará que la vida útil de las baterías de los sensores sea 21.750 veces superior a la vida útil de los sensores que no utilicen beamforming.

De este modo, la gran diferencia entre los dos casos de estudio de este apartado reside en que en el primero, sin usar beamforming, teníamos un máximo del diagrama de radiación en la dirección de la estación base (con lo que la estación base recibirá una potencia elevada); en el segundo, tenemos prácticamente un nulo (con lo que la estación base recibirá una potencia muy reducida). Así, a pesar del coste energético del 14% que supone el sincronismo entre los sensores, se han alcanzado resultados muy positivos en cuanto al consumo de las baterías de los sensores usando beamforming.

Esto no quiere decir que para todas las ocasiones en las que usemos antenas con beamforming se obtengan estos resultados tan beneficiosos, sino solo en aquellos casos en los que para un uso de antenas sin beamforming, queramos que radien en una dirección en la que existe un nulo de radiación. Por tanto, se ha conseguido demostrar que el beamforming resulta ser muy favorable.

De esta manera, mediante estos dos casos de estudio, se ha pretendido presentar el peor y el mejor caso en el uso de sensores que empleen beamforming. En el peor caso, nos encontraremos con una reducción en la eficiencia energética igual al coste energético que supone el sincronismo entre los nodos. En el mejor de los casos, la eficiencia supone prolongar la vida de las baterías en un  $2,175 \cdot 10^6$  %.

Por este motivo, se pretende en el presente proyecto dar cabida a distintos casos que intenten abarcar un gran número de situaciones y, por supuesto, saber para cuáles de estas situaciones es más o menos conveniente el uso del beamforming.

#### **4.2.1 Cambio de comparación**

Es necesario tener en cuenta que en el caso estudiado en el apartado anterior se realiza una comparación con unos sensores que se sitúan en la misma posición que los que utilizan beamforming. Sin embargo, estos sensores que no utilizan beamforming, realmente sí están coordinados en amplitud (todos tienen la misma amplitud) y en fase (el desfase entre ellos es nulo). Por ello, resulta poco práctico y realista llevar a cabo este tipo de comparación. A pesar de todo, esta comparación nos ha servido para establecer un límite inferior y superior a la eficiencia que se puede llegar a alcanzar usando beamforming.

Por tanto, debido a que no es práctico comparar los sensores que usan beamforming con otros sensores que están coordinados en fase y amplitud, de ahora en adelante la comparación se llevará a cabo de la siguiente manera: se supondrán unos sensores situados en la misma posición y con el mismo tipo de antena que los que usan beamforming y se irá comparando el mínimo tiempo de vida de los sensores que usan beamforming con el tiempo de vida de los sensores que no lo usan, uno por uno. De esta manera, se comparará el sensor con menor tiempo de vida de los que usan

beamforming con aquel sensor que, individualmente, proporcione menor tiempo de vida de los que no usa beamforming. Además, la potencia de cada uno de estos sensores “comparativos” será la **media cuadrática** de la potencia de los sensores que usan beamforming, de forma que a diferencia de la comparación anterior, la potencia de los sensores comparativos no será la máxima. Esta comparación es más realista, pues en el caso anterior los sensores con beamforming reducían su potencia con el fin de ahorrar batería y los sensores comparativos radiaban al máximo de potencia, de manera que su tiempo de vida se reduciría.

Así pues, veamos tres ejemplos más en este caso que pretende asentar las bases de los siguientes casos de estudio. Para los dos ejemplos siguientes, se establecen las mismas condiciones que los dos ejemplos estudiados a lo largo del apartado anterior: la dirección deseada para el primer ejemplo será  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 90^\circ$ , con cuatro sensores; la del segundo ejemplo, será  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 60^\circ$ , también con cuatro sensores. A continuación, se presentan los diagramas de radiación para la dirección deseada  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 90^\circ$ , con antenas isotrópicas.

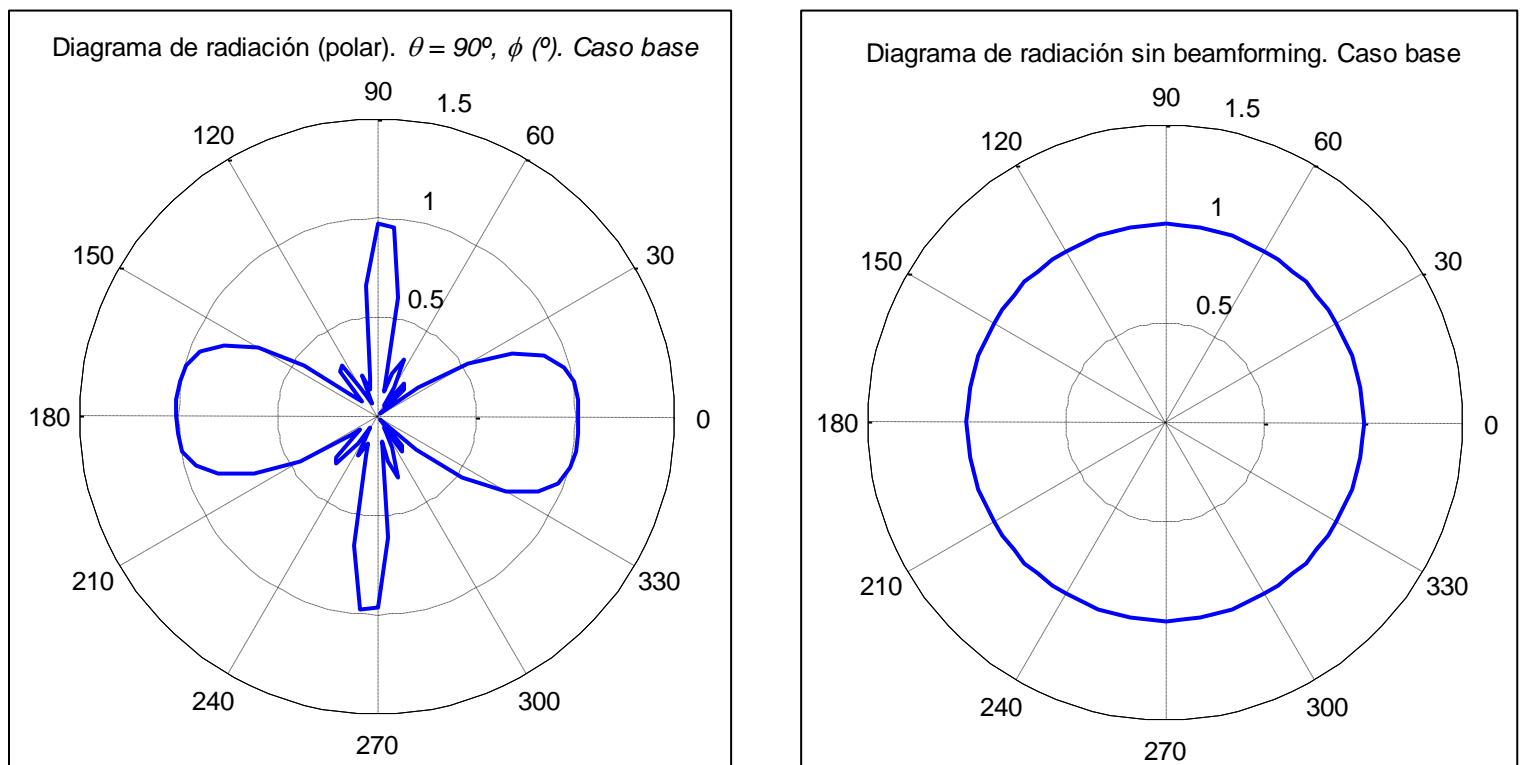


Fig. 4.2.5. Diagramas de radiación (polar). Dirección de radiación deseada:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ . Nuevo tipo de comparación

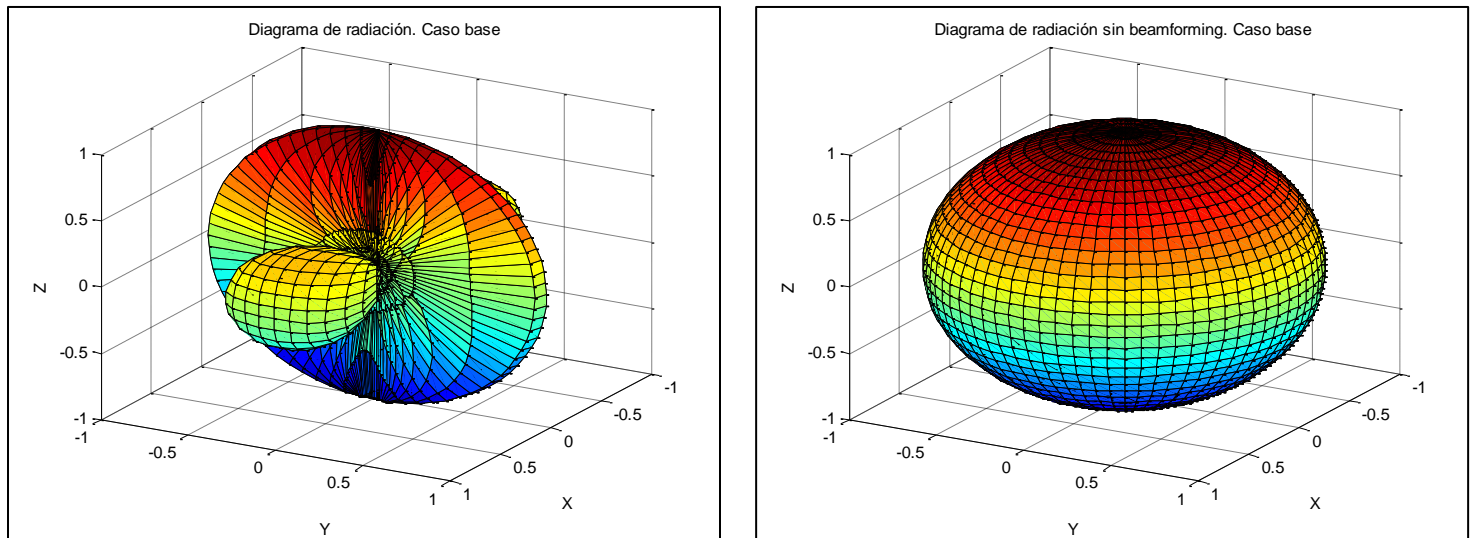


Fig. 4.2.5. Diagramas de radiación (tridimensional). Dirección de radiación deseada:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ . Nuevo tipo de comparación.

Dado que estamos trabajando con antenas isotrópicas, el diagrama de radiación de una sola de estas antenas es el que vemos en la figura 4.2.5, una esfera. En este nuevo modelo de comparación, que se mantendrá a lo largo de este trabajo, la eficiencia obtenida para este caso es de 3.421. Recordemos que con el anterior modelo de comparación, la eficiencia obtenida era de 0.866. Dado que la teórica estación a la que se desea radiar se encuentra muy alejada de nuestros sensores (recordemos que queremos radiar en direcciones genéricas y no a estaciones situadas en un lugar definido), el tiempo de vida de los sensores comparativos es el mismo para todos, pues todos radian con la misma potencia y en la misma dirección.

A continuación, se presenta el siguiente ejemplo:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 60^\circ$ . Carece de sentido mostrar de nuevo el diagrama de radiación de la antena que no usa beamforming, pues de nuevo es una esfera. El diagrama de radiación de los cuatro sensores que usan beamforming para apuntar a la dirección deseada es el mismo que el del caso estudiado anteriormente, el de la figura 4.2.2. La eficiencia alcanzada mediante este nuevo modelo de comparación es de 3.4345.

Antes de comparar estos dos resultados, se presenta un nuevo caso de estudio, usando antenas dipolo cuyo eje se encuentra en el plano XY, apuntando en la dirección del eje X. Con cuatro sensores, la dirección a la que se desea apuntar es distinta a las anteriores:  $\theta = 30^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ . Como vemos, en este caso se pretende ahora apuntar a estaciones base que estén elevadas ( $\theta \neq 90^\circ$ ). Se muestran ahora los diagramas de radiación en polar (con corte en  $\theta = 30^\circ$ ) y en tres dimensiones.

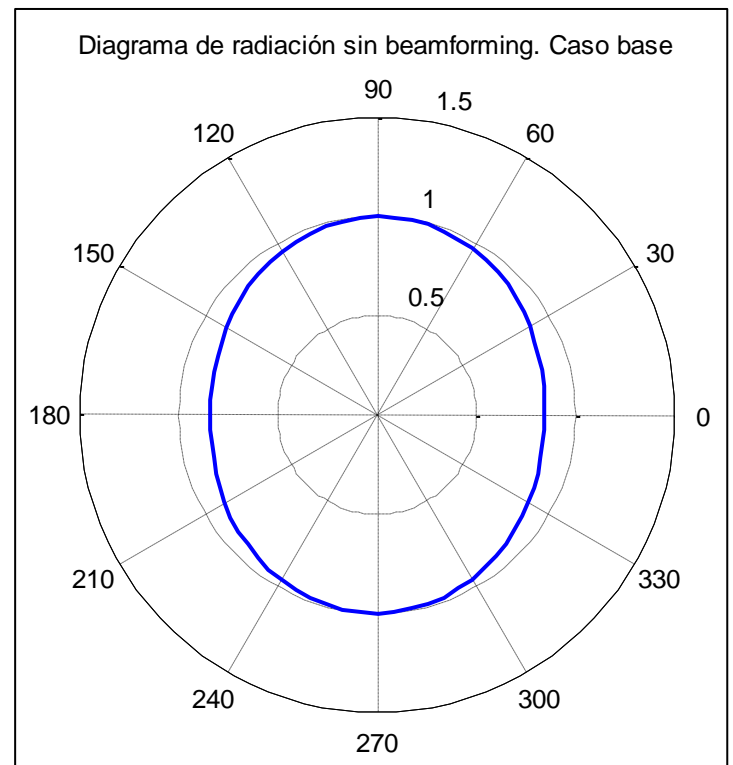
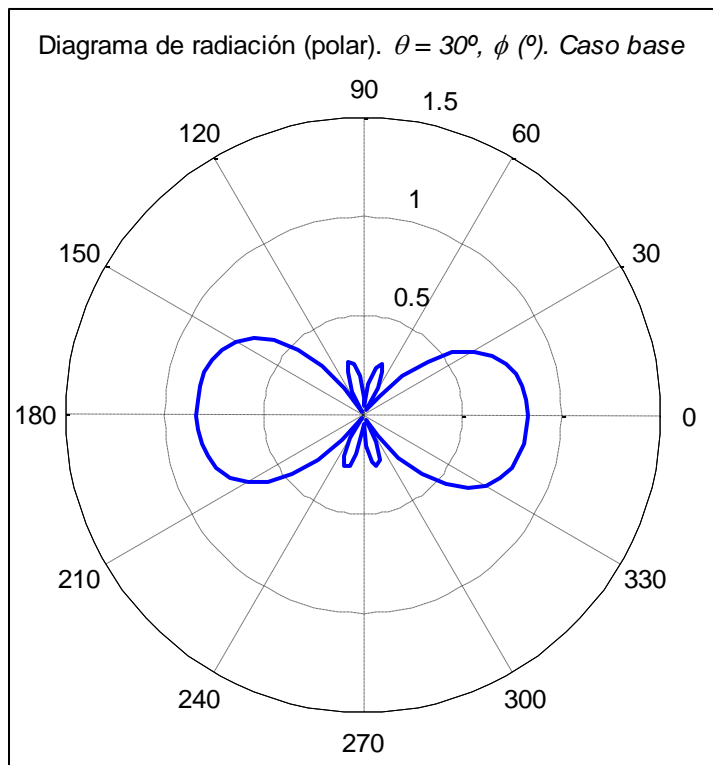


Fig. 4.2.6. Diagramas de radiación (polar). Dirección de radiación deseada:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ . Nuevo tipo de comparación, antenas dipolo.

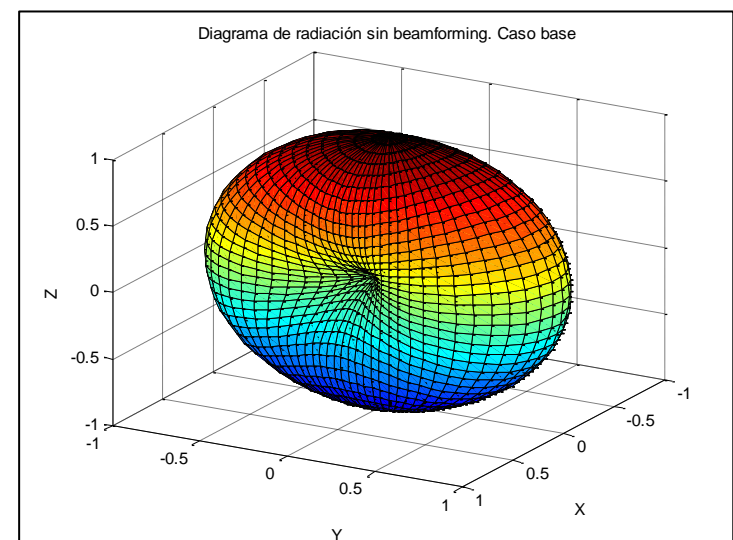
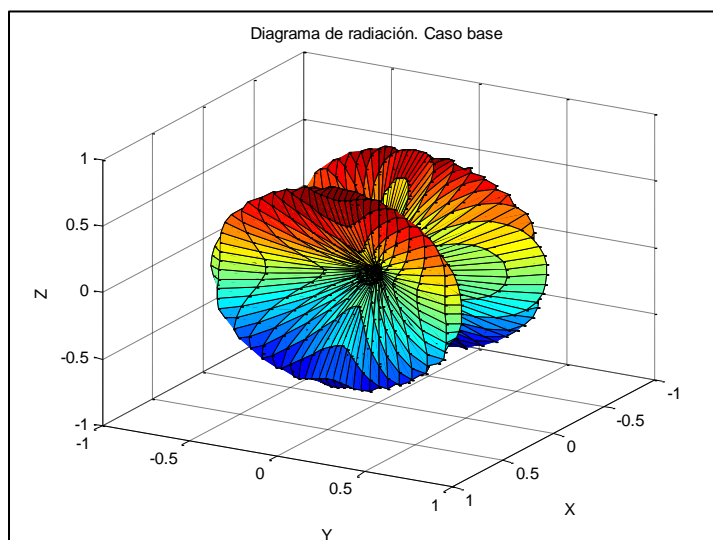


Fig. 4.2.7. Diagramas de radiación (tridimensional). Dirección de radiación deseada:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ . Nuevo tipo de comparación, antenas dipolo.

Como vemos, a pesar de haber introducido elevación en la dirección de apuntado, el beamforming consigue una importante directividad en la dirección deseada. En el diagrama de radiación en tres dimensiones sin beamforming, podemos ver perfectamente el diagrama de radiación de una antena dipolo. En este caso, usando antenas dipolo, la eficiencia obtenida es de 3.1617.

A modo de resumen de estos tres ejemplos, cabe mencionar la semejanza entre los resultados de eficiencia que se han obtenido, a pesar de las distintas direcciones de apuntado deseadas. Así, vemos que usando beamforming, siempre obtendremos una eficiencia superior a la unidad en casos similares a los estudiados en este apartado, en los que los sensores se encuentran fijos a lo largo del tiempo, sin importar la dirección



de apuntado. Es más, a la vista de estos resultados, podemos ver que usar beamforming prolonga el tiempo de vida de los sensores en más de un 300%, lo que significa que su batería puede llegar a durar tres veces más que la batería de unos sensores de iguales características que no utilicen beamforming.

### 4.3 Dirección de radiación genérica

En este apartado, se presentarán un total de 4 casos de estudio en los que se desea radiar en una dirección de radiación genérica, es decir, cada uno de los sensores que no usan beamforming radiarían en una misma dirección ( $\theta = 45^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ , por ejemplo). En el apartado siguiente, el apartado “4.4 Estaciones base”, se dará cabida a otros casos de estudio en los que los sensores han de radiar a una estación base con coordenadas específicas, por lo que la dirección de radiación será distinta para cada sensor, dependiendo de su posición.

Cabe destacar que para cada simulación se han llevado a cabo un total de 30 realizaciones. Para cada conjunto de 30 realizaciones, se calculará la media y la desviación típica. Cabe mencionar que no se compararán los resultados de la eficiencia obtenida entre unos casos y otros hasta el apartado “4.3.5 Comparativa de los distintos casos de estudio”. A continuación, se presentan todos los casos.

#### 4.3.1 Caso de estudio 1

En este primer caso de estudio, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Sensores con posiciones aleatorias fijas.
- Dos dimensiones, plano XY.
- Carga de batería al máximo para todos.
- Antenas isotrópicas. Antenas dipolo.
- $\phi = 0^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ .  $\theta = 45^\circ$ .
- Cantidad de sensores: 2, 5, 10, 20, 50.

En este caso, al contrario que en el caso base, los sensores están situados en un plano (XY, de 30x30) y no en un solo eje. Cabe mencionar que en este caso, las posiciones de los sensores son fijas y se han decidido aleatoriamente.

En primer lugar, se presentarán algunos de los diagramas de radiación. Veamos algunos de los diagramas obtenidos para 2 sensores. En las figuras siguientes, vemos los diagramas obtenidos para los dos tipos de antenas, haciendo un corte en el ángulo  $\phi = 0^\circ$  y para todo  $\theta$ . En rojo, queda representado el diagrama de radiación de la antena que no usa beamforming y en azul el diagrama de la antena que usa beamforming. La línea negra representa la dirección en la que se desea radiar. Cabe mencionar que dado que estamos representando para todo  $\theta$  y su rango es  $[0-180]^\circ$ , solo existe la mitad de arriba en esta representación.

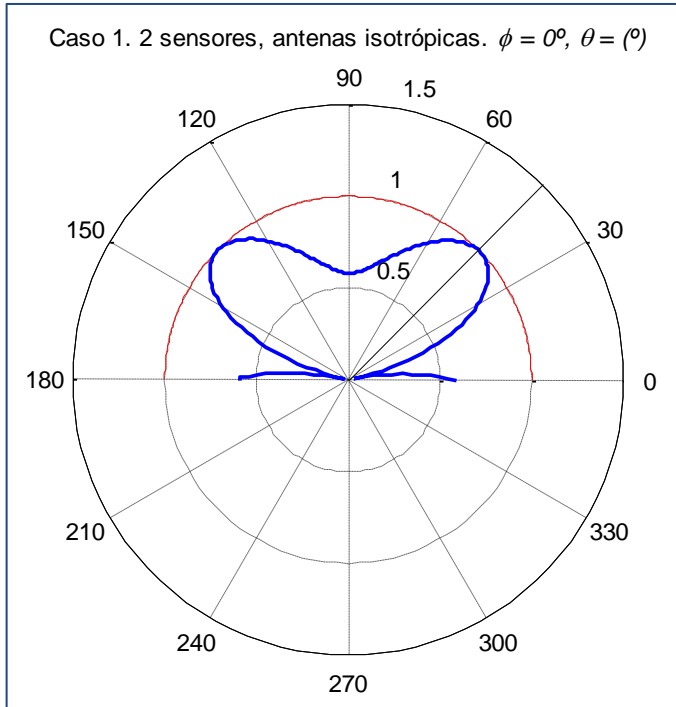


Fig. 4.3.1.1. Caso 1, 2 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

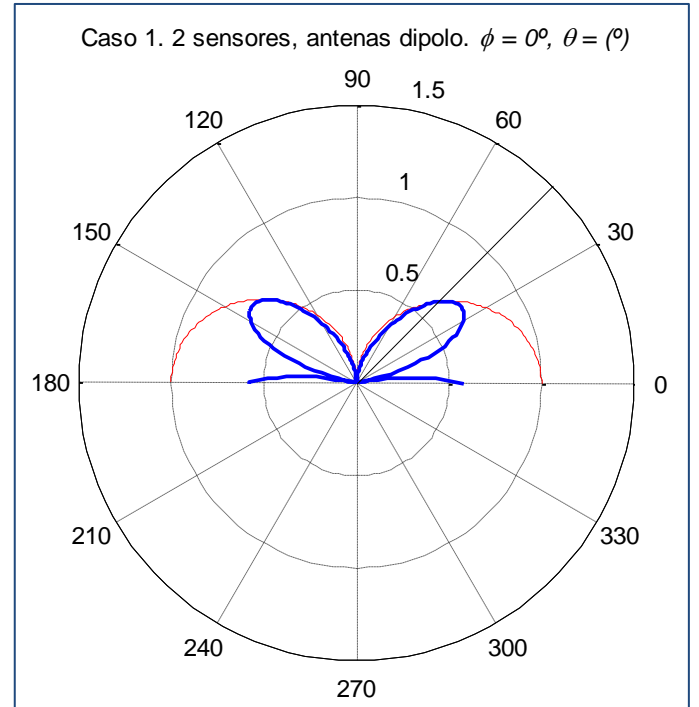


Fig. 4.3.1.2. Caso 1, 2 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

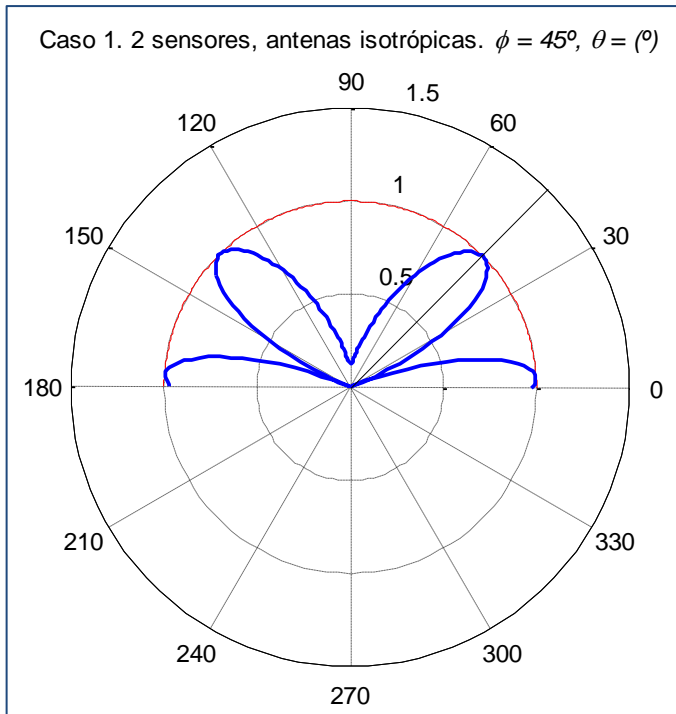


Fig. 4.3.1.3. Caso 1, 2 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 45^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

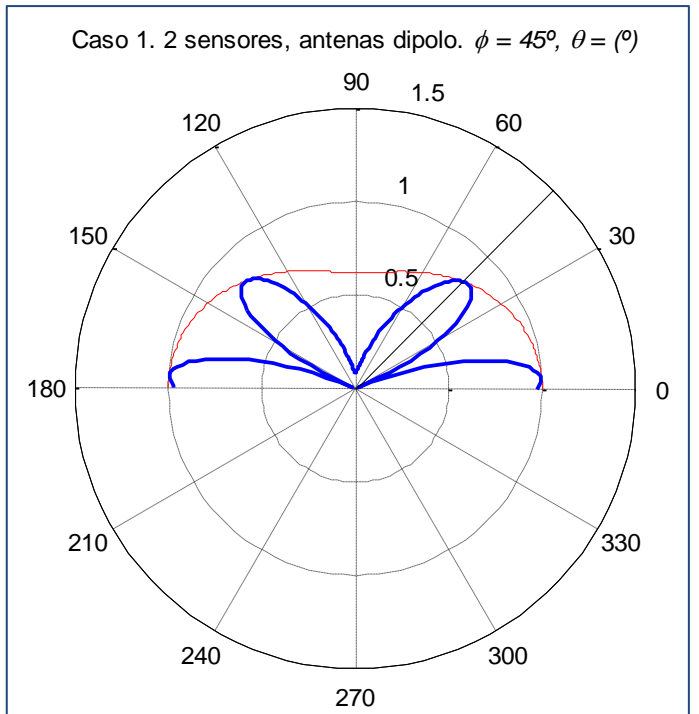


Fig. 4.3.1.4. Caso 1, 2 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 45^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

En cuanto a los dos diagramas de antenas isotrópicas, podemos apreciar que el diagrama de radiación de las antenas comparativas es una esfera, pues al hacer el corte en el ángulo phi podemos ver una circunferencia. En cuanto a los diagramas de antenas dipolo, en la figura 4.3.1.2, podemos apreciar perfectamente el diagrama de radiación de la antena dipolo.



En general, vemos que los diagramas de radiación usando beamforming se encuentran autocontenidos, pues los diagramas de radiación de las antenas que no usan beamforming siempre marcarán el límite máximo permitido. En todos los diagramas, vemos que justo en la dirección en la que se desea radiar, el diagrama de radiación presenta un máximo, de forma que podemos concluir que el algoritmo implementado ha funcionado a la perfección. Para estos cuatro casos representados en las figuras anteriores, la eficiencia media ha sido de 1.8171.

De este modo, podemos concluir que en caso de que el diagrama de radiación presente un máximo en la dirección en la que se desea radiar, obtendremos una eficiencia superior a 1. Sin embargo, estos solamente son los resultados de cuatro realizaciones para dos sensores en los que los lóbulos son bastante anchos.

Veamos, pues, qué ocurre cuando aumentamos la cantidad de sensores. A continuación, con el fin de reducir la cantidad de figuras, solamente se mostrará un diagrama de radiación para cada cantidad de sensores: 5, 10, 20 y 50 sensores, para radiar en el ángulo  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$ , con antenas isotrópicas y dipolo. En cuanto a las antenas dipolo, todos los ejes se encuentran en el plano XY, apuntando en la dirección del eje X.

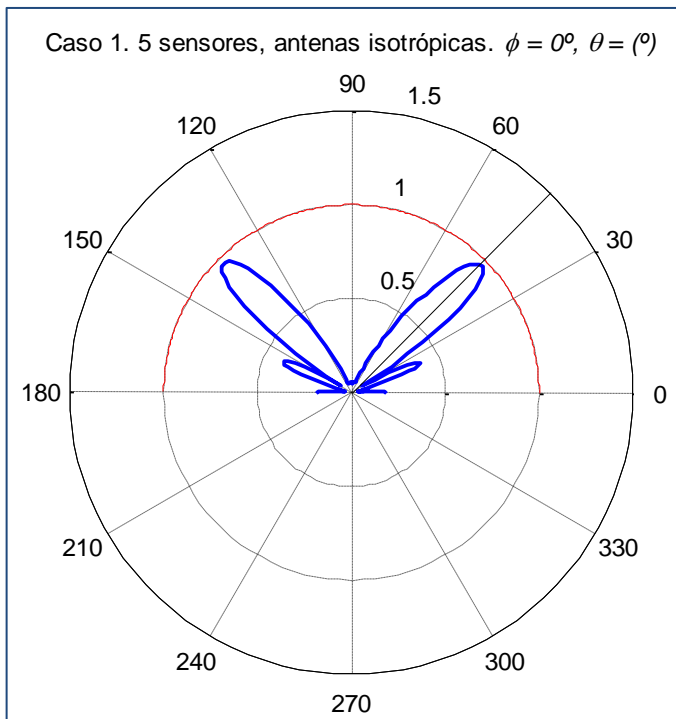


Fig. 4.3.1.5. Caso 1, 5 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

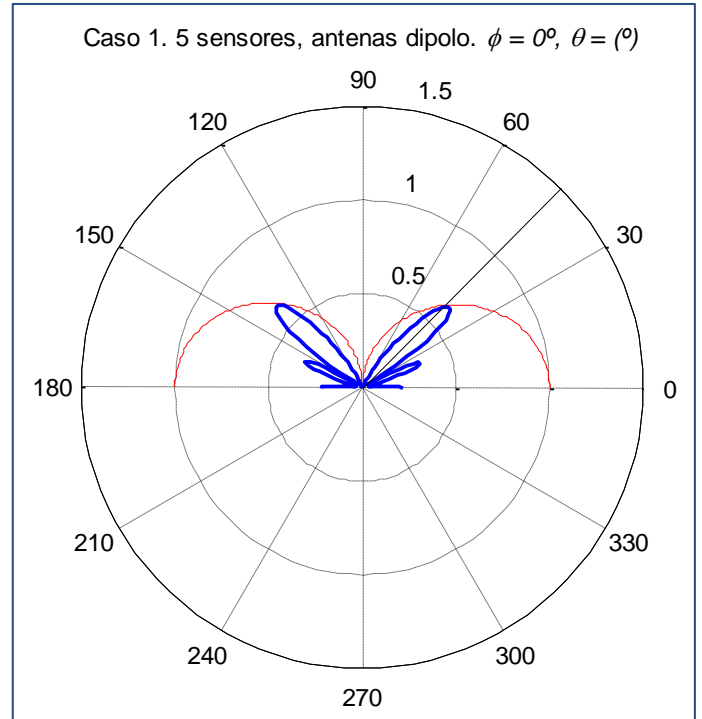


Fig. 4.3.1.6. Caso 1, 5 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

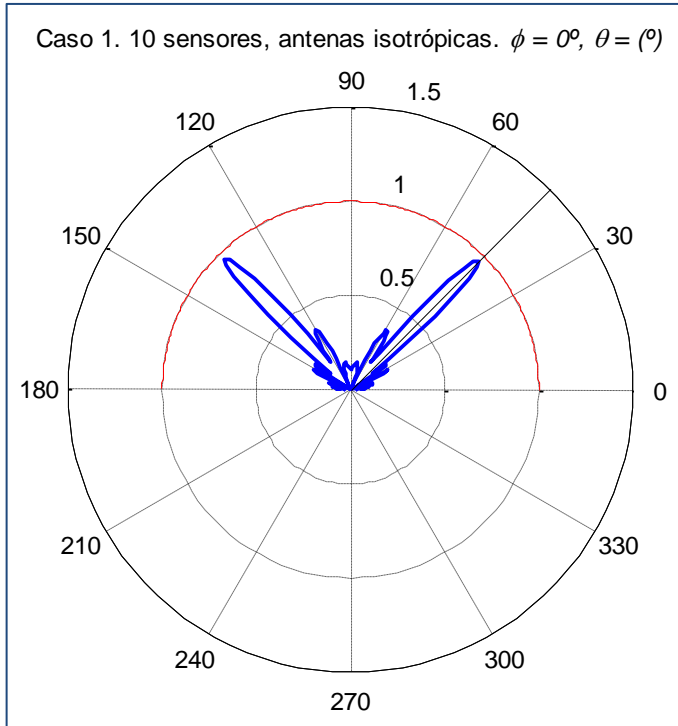


Fig. 4.3.1.7. Caso 1, 10 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

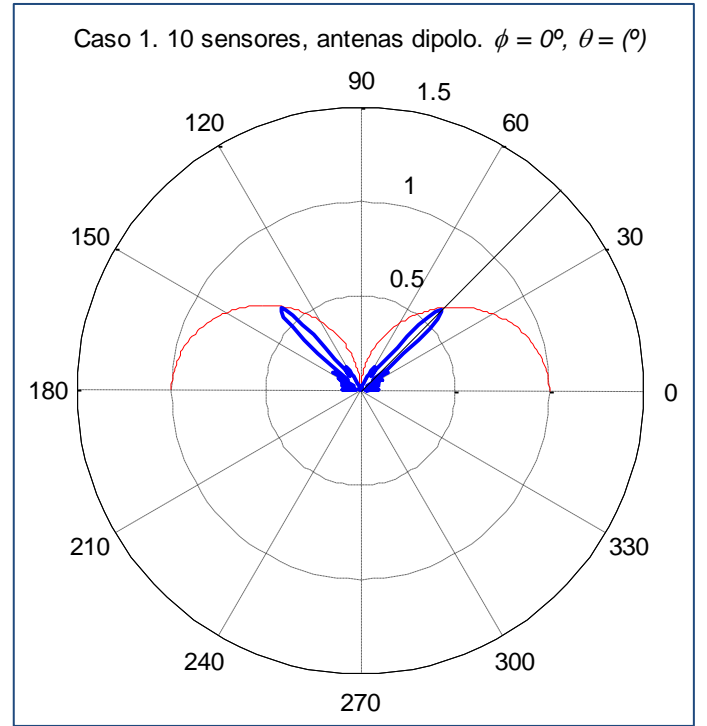


Fig. 4.3.1.8. Caso 1, 10 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

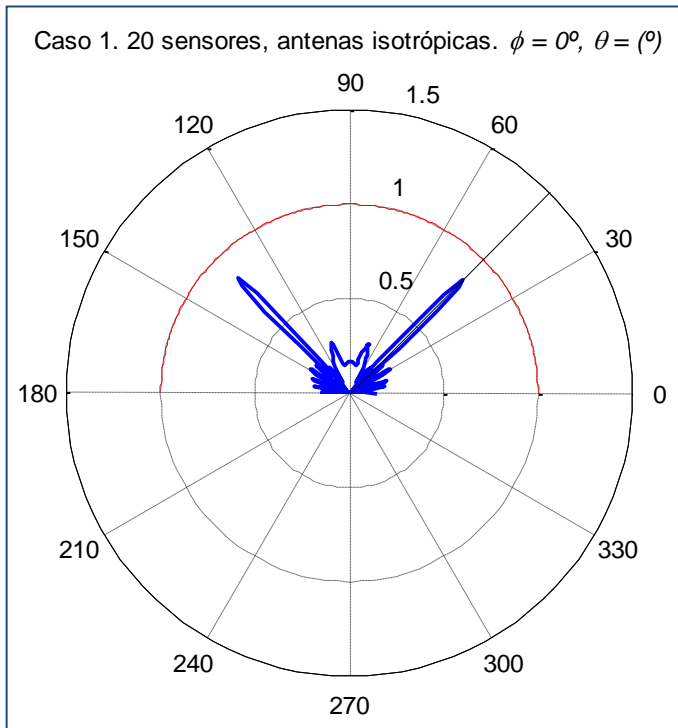


Fig. 4.3.1.9. Caso 1, 20 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

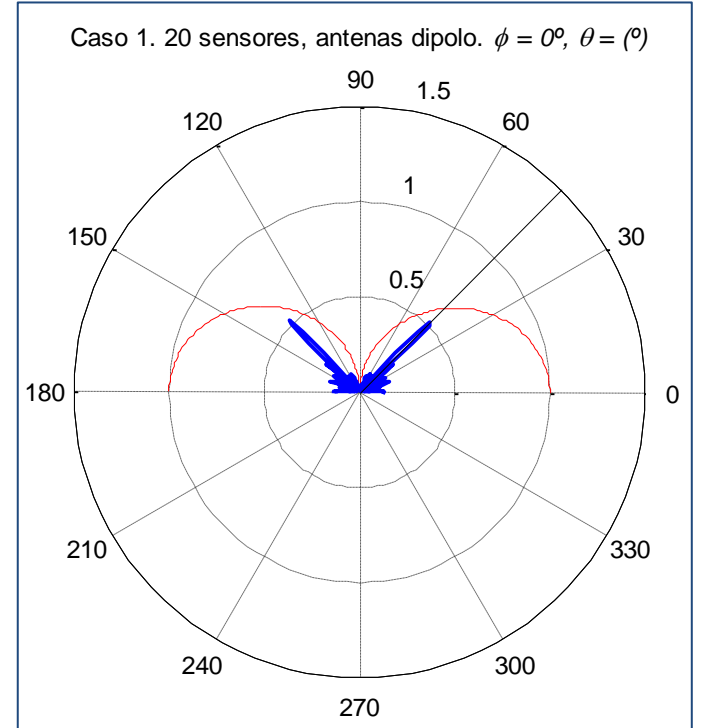


Fig. 4.3.1.10. Caso 1, 20 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

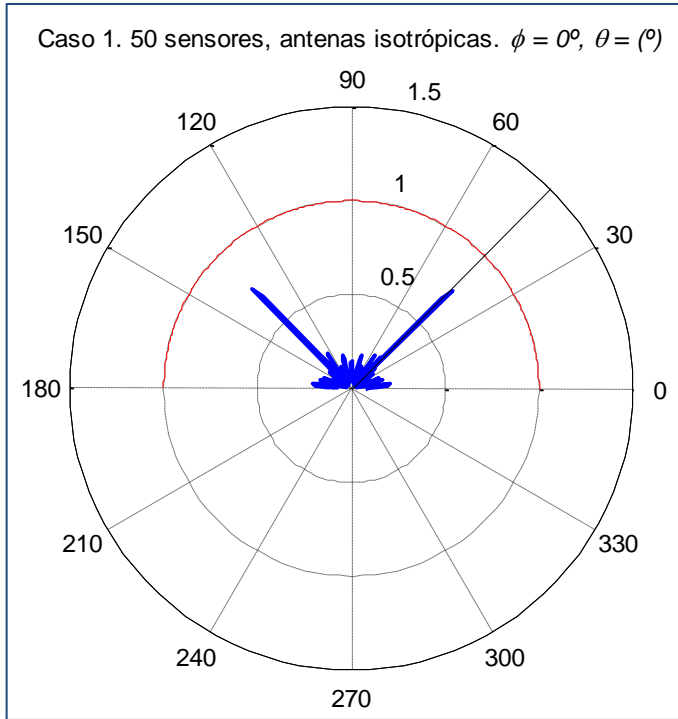


Fig. 4.3.1.11. Caso 1, 50 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

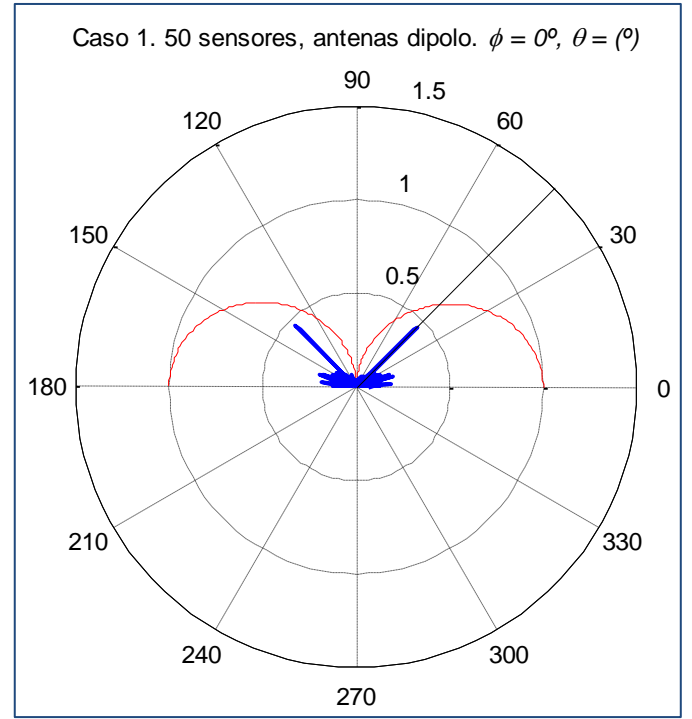


Fig. 4.3.1.12. Caso 1, 50 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

Analizando las figuras, podemos ver que conforme aumenta el número de sensores, los lóbulos principales se van estrechando, pues a mayor cantidad de antenas, más directivo será el diagrama de radiación. Además, vemos que en todos los casos, el diagrama de radiación presenta un lóbulo principal en la dirección en la que se desea radiar, de modo que se comprueba el correcto funcionamiento del algoritmo. Igualmente, no solo el diagrama apunta en la dirección deseada, sino que para todos los casos mostrados en las figuras arriba mostradas, la eficiencia es superior a 1, de modo que se consigue el objetivo perseguido en este proyecto.

Sin embargo, resultaría tedioso estudiar los diagramas de radiación de las 30 realizaciones de cada caso uno a uno, cuando lo que realmente nos interesa es saber si en la dirección deseada se consigue alcanzar una eficiencia superior a 1. Así, carece de sentido mostrar todos y cada uno de ellos, pues existe un diagrama de radiación por cada realización y hay un total de 600 realizaciones contando con ambas tablas. Por este motivo, a continuación, se presentan una serie de gráficas que muestran conjuntamente los resultados de eficiencia obtenida en cada una de las realizaciones.

#### 4.3.1.1 1 cluster

La primera de ellas muestra los resultados que se han obtenido cuando todos los sensores pertenecen al mismo cluster, es decir, se ha seleccionado la variable *clusters\_fijados* = 1. Como vemos, para este caso de estudio, se muestran la eficiencia de cada realización, dependiendo del tipo de antena, el ángulo en el que se desea radiar y la cantidad de sensores usados. La línea negra horizontal que se muestra en cada gráfica representa una eficiencia igual a 1. La línea roja de cada gráfica toma cuatro cinco valores distintos: la media de cada grupo de 30 realizaciones, dependiendo de la cantidad de sensores.

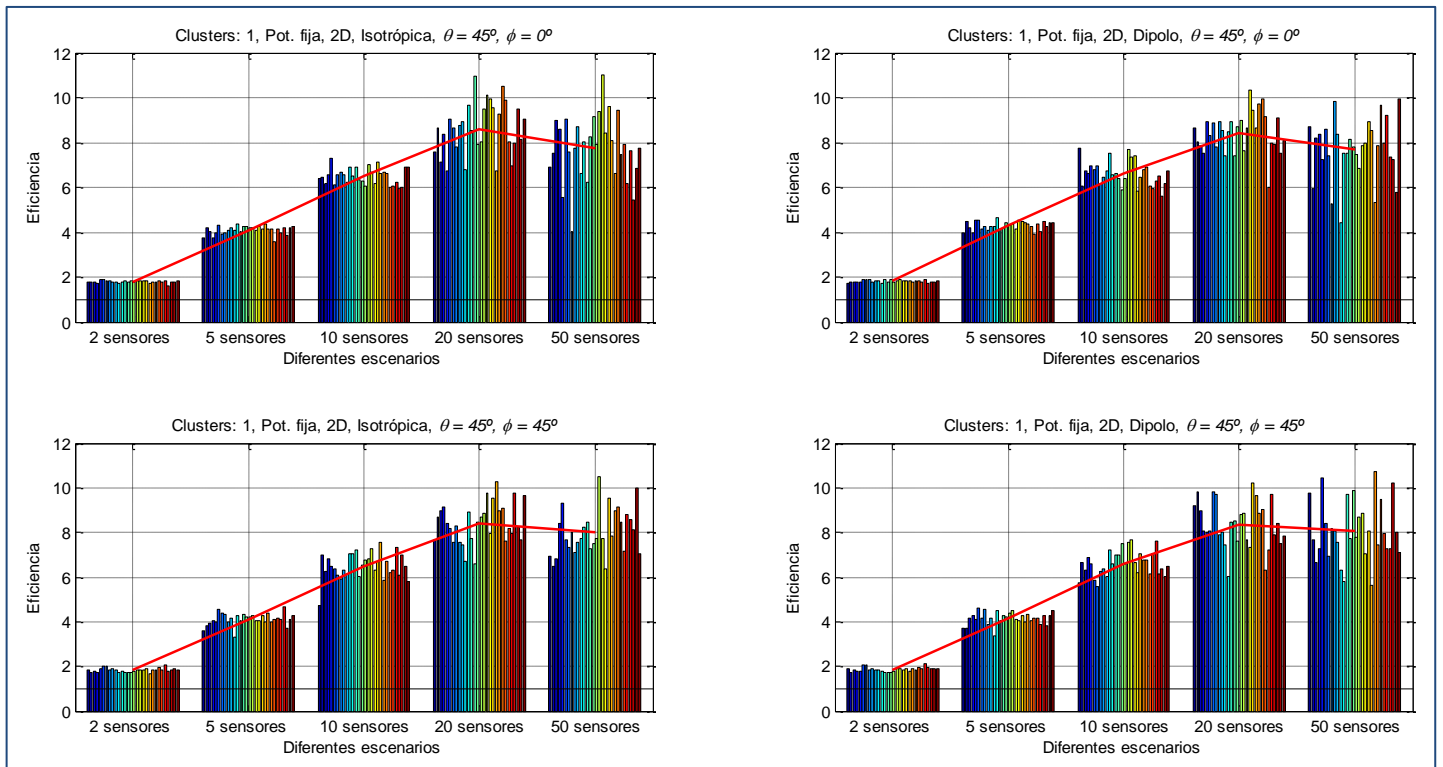


Fig. 4.3.1.13. Caso de estudio 1, clusters: 1. Eficiencia en función de la cantidad de sensores.

Como vemos, se ha realizado el mismo estudio para antenas isotrópicas que para antenas dipolo. En las tablas, por columnas, tenemos el número de sensores (2, 5, 10 y 50), además, del ángulo  $\phi$  para el que se realiza la optimización (en todos los casos el ángulo  $\theta$  es  $45^\circ$ ). En cada realización, la posición de los sensores es distinta.

Analizando las cuatro gráficas, vemos que el algoritmo implementado ha funcionado a la perfección, pues ninguno de los resultados de eficiencia se encuentra por debajo de la línea que representa una eficiencia igual a 1. De este modo, dadas las condiciones de este caso de estudio, se alcanza el objetivo de este proyecto con el algoritmo que se ha creado.

En líneas generales, vemos que apenas importa el ángulo en el que se desea radiar ni tampoco el tipo de antena usada, a simple vista. Resulta bastante significativo ver cómo aumenta la eficiencia conforme aumenta el número de sensores. Para el caso en que hay dos sensores, la eficiencia media no llega a alcanzar el valor 2, mientras que para 20 sensores, la media supera ligeramente el valor 8, llegando algunos casos a alcanzar un valor de 11. Esto significa que, usando este algoritmo, puede llegar a prolongarse el tiempo de vida de las baterías en un 1100%.

En la siguiente tabla, se presentan las medias de la eficiencia para cada grupo de 30 realizaciones, junto con su desviación típica  $\sigma$ . Tal y como se concluyó en el apartado anterior, la comparación con sensores que no usan beamforming se ha realizado uno por uno, escogiendo el que menor tiempo de vida ofrezca para realizar dicha comparación. De igual modo, se ha escogido en cada una de las 30 realizaciones el sensor que, usando beamforming, ofrezca el menor tiempo de vida.

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
2	1.795	0.063	1.838	0.091	1.810	0.051	1.865	0.099
5	4.095	0.187	4.111	0.268	4.292	0.194	4.151	0.277
10	6.501	0.363	6.509	0.577	6.614	0.548	6.618	0.552
20	8.619	1.143	8.421	0.896	8.448	0.892	8.357	1.032
50	7.750	1.444	8.025	1.016	7.703	1.332	8.068	1.332

Tabla 4.3.1.1. Caso de estudio 1. Clusters: 1.

Con el fin de resumir y simplificar esta tabla, se presenta esta otra, que recoge la media y la desviación típica en función del número de sensores, para todos los ángulos analizados y ambos tipos de antena:

Nº de sensores	Resultados globales	
	Media	$\sigma$
2	1.827	0.082
5	4.162	0.245
10	6.561	0.513
20	8.461	0.988
50	7.887	1.285

Tabla 4.3.1.2. Caso de estudio 1, resultados globales. Clusters: 1.

Analizando las tablas, en líneas generales podemos ver que los resultados obtenidos para antenas isotrópicas y antenas dipolo son muy parecidos. A pesar de que una antena dipolo presenta nullos en su eje, si vemos las figuras 4.3.1.2 y 4.3.1.4, poco ha importado que la potencia emitida en esa dirección no sea la máxima, pues la eficiencia obtenida en esa dirección es prácticamente igual que la obtenida para otras direcciones. La causa es que, a pesar de emitir menor potencia en esas direcciones con respecto a una antena isotrópica, la antena comparativa presenta esa misma característica; así, con el beamforming, se consigue un máximo en esa dirección, siendo el máximo límite permitido el que marca la antena comparativa. De esta manera, podemos afirmar que usar beamforming con antenas dipolo es una muy buena opción, puesto que se obtienen resultados muy parecidos con respecto a usar antenas isotrópicas (que son antenas ideales y no realizables, al contrario que las antenas dipolo).

En cuanto a las distintas direcciones, vemos que es indistinto el ángulo  $\varphi$  en el que se desee apuntar. Así, se pueda afirmar que el beamforming es útil cuando se desee apuntar en cualquier dirección, partiendo siempre de la premisa de los parámetros establecidos al comienzo de este caso de estudio (2D, carga de batería al máximo). En cuanto a la cantidad de sensores, podemos ver que se obtienen mejores resultados conforme aumenta la cantidad de sensores. Los resultados de eficiencia obtenidos para 2 sensores son significativamente inferiores, aunque en todos los casos la eficiencia es superior a la unidad, lo cual hace del beamforming una tecnología muy apropiada, frente a la utilización de una igual cantidad de sensores que no estén coordinados entre sí.

No ha de olvidarse que, a pesar de que aumentar la cantidad de sensores hará que se alcance una mayor directividad en la dirección deseada, un sensor que no use

beamforming tardará un tiempo  $T$  en emitir y luego pasará a estar en reposo, mientras que  $X$  sensores que usen beamforming deberán emitir durante un tiempo  $X \cdot T$  para transmitir la misma cantidad de información. Esto haría pensar que no es tan beneficioso aumentar la cantidad de sensores. Sin embargo, a la vista de los resultados mostrados, vemos que usar una gran cantidad de sensores hace que aumente la eficiencia.

Podemos ver, observando las gráficas de la figura 4.3.1.13, que esta tendencia se mantiene solamente hasta que la cantidad de sensores es igual a 20. En todos los casos, para una cantidad de sensores igual a 50, la eficiencia se encuentra por debajo de la eficiencia obtenida para 20 sensores. Este hecho podría deberse al tiempo que necesitan los 50 sensores para transmitir ( $50 \cdot T$ ), frente al tiempo que necesitan los 20 sensores para transmitir ( $20 \cdot T$ ), lo cual hará que las baterías del caso de 50 sensores se gasten más rápido. Otra posible razón podría ser el coste energético pro sincronismo, necesario para poder coordinar los sensores, que supondría un aumento del 30% para 20 sensores y un aumento del 60% para 50 sensores. Sin embargo, aún no contamos con suficientes casos como para poder sacar conclusiones para este efecto, con lo que se continuará hablando de él a medida que se presenten nuevos casos.

#### 4.3.1.2 2 clusters

Al lanzar las ejecuciones de este caso, se decide, además, hacer que la variable *clusters\_fijos* sea igual a 2. A continuación se presentan las mismas gráficas que las de la figura 4.3.1.13, pero solamente para 10, 20 y 50 sensores, pues carece de sentido tener dos clusters para solo 2 sensores y 5 sensores. En el caso de 2 sensores, por ejemplo, con dos clusters tendríamos dos sensores que radian de forma totalmente independiente.

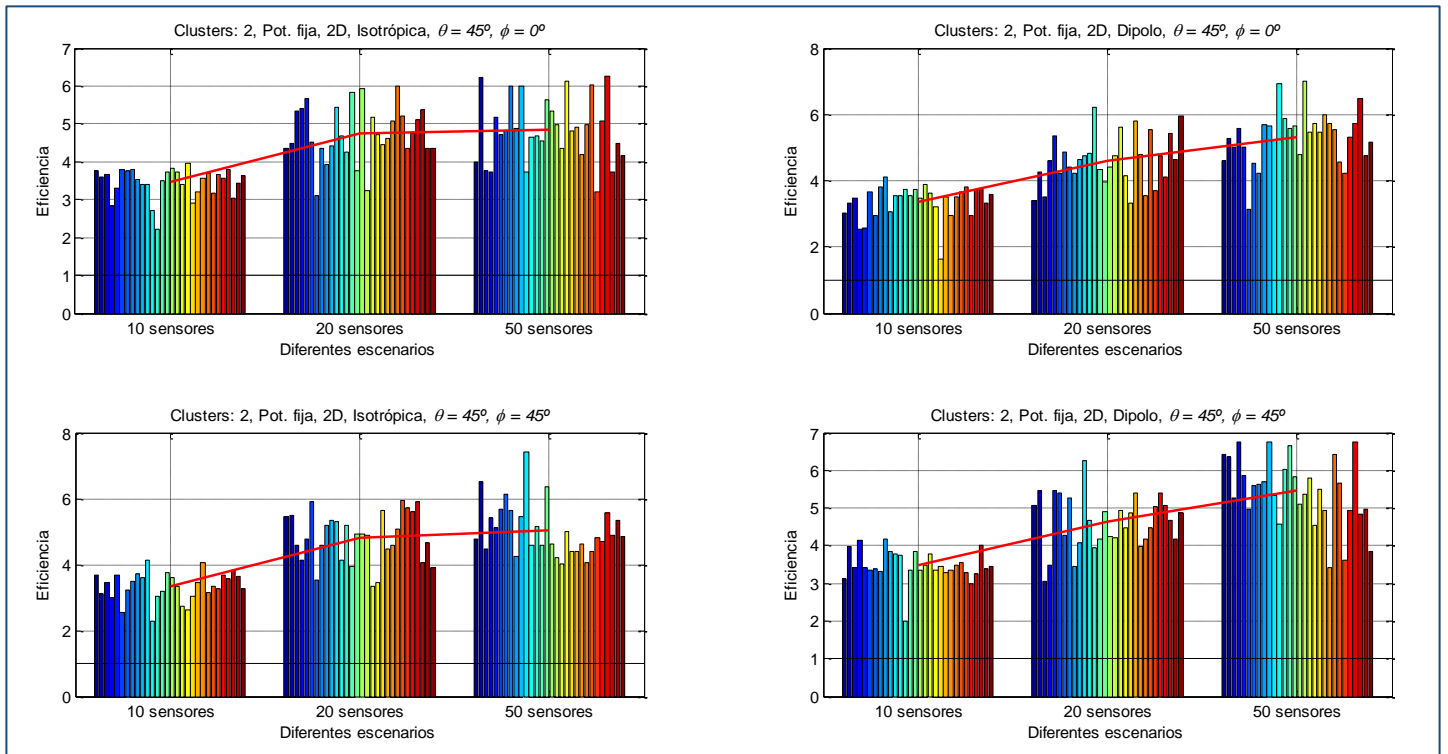


Fig. 4.3.1.14. Caso de estudio 1, clusters: 2. Eficiencia en función de la cantidad de sensores.

Se presentan ahora las tablas que resumen estas gráficas:

N° de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
10	3.454	0.389	3.351	0.432	3.373	0.503	3.478	0.405
20	4.742	0.724	4.821	0.759	4.603	0.763	4.630	0.708
50	4.839	0.841	5.049	0.793	5.329	0.796	5.450	0.902

Tabla 4.3.1.2. Caso de estudio 1. Clusters: 1.

Al igual que anteriormente, se presenta una tabla resumen de la tabla superior. Al contrario que las tablas anteriores, esta incluye la diferencia en cuanto a la media del caso de 2 clusters con respecto al caso de 1 cluster:

N° de sensores	Resultados globales 2 clusters		Respecto a 1 cluster	
	Media	$\sigma$	Media	%
10	3.414	0.432	-3.147	-47.961
20	4.699	0.735	-3.762	-44.466
50	5.167	0.858	-2.720	-34.489

Tabla 4.3.1.4. Caso de estudio 1, resultados globales. Clusters: 1.

Analizando esta última tabla, vemos claramente que utilizar dos clusters en lugar de uno, reduce la eficiencia en gran medida. Para 10 sensores, por ejemplo, la eficiencia se reduce de 6.561 a 3,414, lo cual supone que se reduce en un 47.961%. Para 20 sensores, la reducción es menor, pero también importante: 44.466%. Para 50, la reducción es del 34.489%. Así, podemos descartar usar dos clusters cuando se tenga un caso con las condiciones que se presentan para este.

Si observamos la figura 4.3.1.14 y la tabla 4.3.1.2, vemos que en todos los casos la eficiencia usando 50 sensores y 2 clusters es mayor que usando 20 sensores y dos clusters, en contraposición al caso en que se usaba un solo cluster. En ese caso, una razón para que la eficiencia con 20 sensores fuera superior a 50 podría ser el tiempo de transmisión que necesita el único cluster para transmitir ( $20 \cdot T$  frente a  $50 \cdot T$ ). Ahora vemos que al utilizar 2 clusters, la eficiencia para 50 sensores es mejor, y esto puede reforzar la teoría presentada anteriormente. Con 2 clusters (25 sensores aproximadamente para cada cluster), el tiempo de transmisión sería de  $25 \cdot T$  y el coste energético sería de un 35%, comparado con el coste energético que suponían los 50 sensores en un cluster, 60%.

Sin embargo, se presenta ahora una nueva cuestión: la eficiencia obtenida al utilizar dos clusters y  $X$  sensores no se aproxima a la eficiencia obtenida al agrupar los sensores en un solo cluster un total de  $X/2$  sensores. Esta cuestión queda ejemplificada en la siguiente figura.

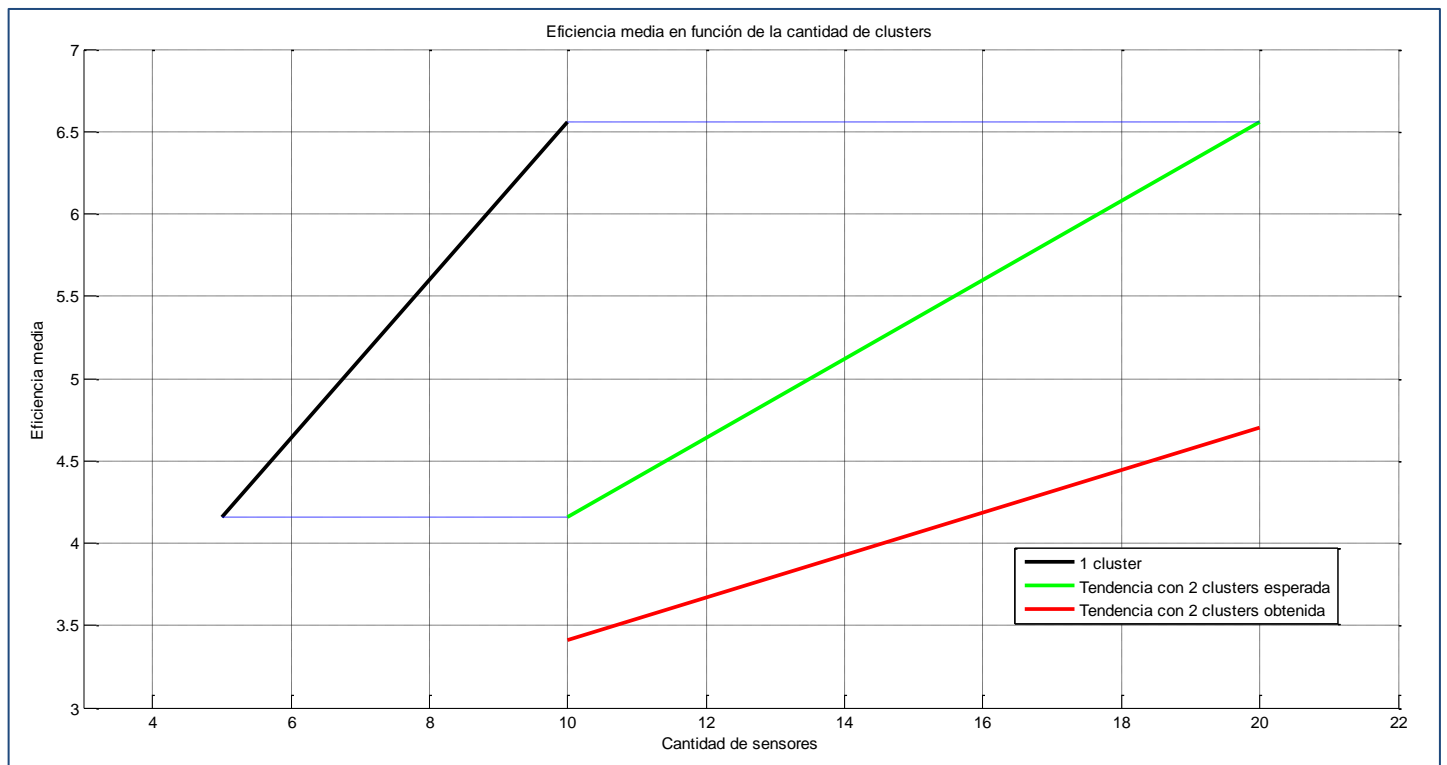


Fig. 4.3.1.15. Caso de estudio 1. Eficiencia media en función de la cantidad de clusters (comparativa).

La línea negra representa la eficiencia obtenida cuando los sensores se distribuyen en un solo cluster (para 5 y 10 sensores). La línea verde representa la tendencia que cabría esperar cuando los sensores se distribuyen en 2 clusters. Como vemos, cabría esperar que cuando distribuimos 10 sensores en 2 clusters, se obtenga la misma eficiencia que con un cluster de 5 sensores, al igual que ocurre con 20 sensores y 10 sensores. La línea roja representa la eficiencia obtenida con 2 clusters.

La eficiencia media para un cluster y 10 sensores era de 6.561 y la eficiencia media para dos clusters y 20 sensores es de 4.699. Antes de analizar los resultados, uno podría esperar que ambos resultados fueran iguales. Dejando de lado que el algoritmo que organiza los clusters puede que no agrupe en todas las realizaciones los nodos de 10 en 10 (a veces puede agrupar 9 en un cluster y 11 en otro) con el consiguiente incremento de gasto energético por sincronismo (el gasto de 11 nodos es mayor que el de 10), vemos que la eficiencia utilizando dos clusters se reduce en un 28.380% con respecto a 5 sensores y 1 cluster.

Busquemos una explicación a esta tendencia inesperada. En primer lugar, vemos que la desviación típica en caso de usar 2 clusters es mayor que en caso de usar 1 cluster (0.735 frente a 0.513, 43.275% mayor), lo cual significa que los datos en el caso de 2 clusters son más dispersos. En segundo lugar, una posible razón es la cantidad de generaciones establecidas para ambos casos. En el caso de 1 cluster y 10 nodos, el algoritmo de optimización de los algoritmos genéticos toma un total de 20 variables (10 de amplitud y 10 de fase) y se le asignan 200 generaciones para que sean optimizadas. En cambio, en el caso de 2 clusters y 20 nodos, el mismo algoritmo toma un total de 40 variables y se le asigna la misma cantidad de generaciones. Probablemente, esta sea la causa de obtener una menor eficiencia con dos clusters de 10 sensores cada uno que con un cluster de 10 sensores, pues se le da la misma capacidad de cómputo a la optimización con 10 sensores a la optimización de 20 sensores, de modo que el caso de



10 sensores llegará antes a la solución óptima, mientras que el caso de 20 sensores puede no haber alcanzado la solución óptima en tan solo 200 generaciones.

Otra posible causa podría ser el algoritmo de división en clusters. Se trata de un algoritmo basado en distancia que no tiene en cuenta nada sobre el beamforming. Este algoritmo solamente agrupa basándose en si los sensores se encuentran más o menos alejados. Así, es posible que esta sea otra causa por la cual no sea conveniente agrupar los sensores en clusters con el algoritmo implementado.

#### 4.3.1.3 3 clusters

Veamos a continuación qué ocurre cuando fijamos la variable *clusters\_fijos* = 3. En este caso, solo tendremos en cuenta una cantidad de 20 y 50 sensores, pues en caso de considerar 10 sensores, tendríamos un par de clusters con solo 3 sensores y otro con cuatro sensores (en el mejor de los casos).

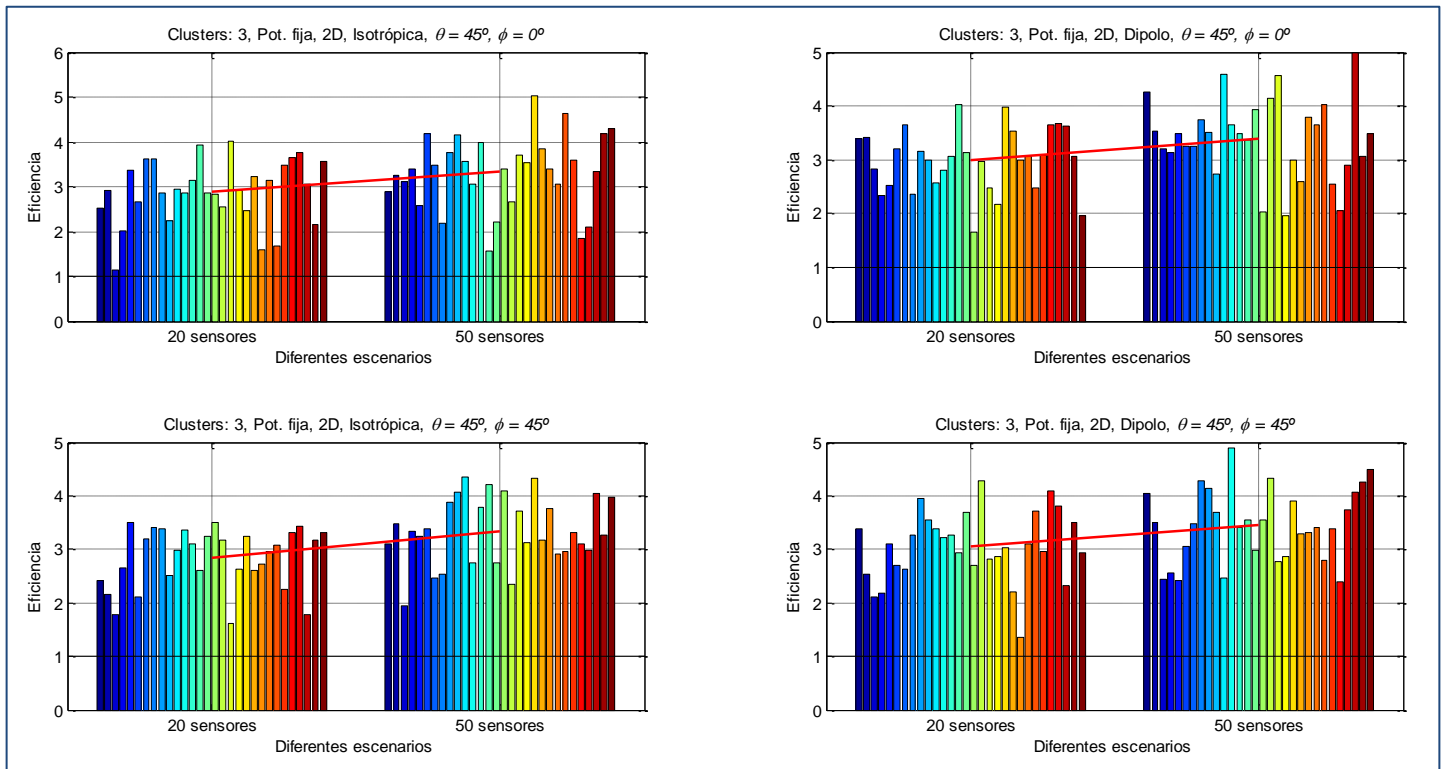


Fig. 4.3.1.16. Caso de estudio 1, clusters: 3. Eficiencia en función de la cantidad de sensores.

Las tablas obtenidas son:

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
20	2.889	0.708	2.838	0.555	2.993	0.583	3.052	0.648
50	3.333	0.823	3.345	0.622	3.398	0.741	3.449	0.681

Tabla 4.3.1.5. Caso de estudio 1. Clusters: 3.

Resultados globales

Respecto a 1 cluster

Nº de sensores	3 clusters			
	Media	$\sigma$	Media	%
20	2.943	0.624	-5.518	-65.218
50	3.381	0.713	-4.505	-57.125

Tabla 4.3.1.6. Caso de estudio 1, resultados globales. Clusters: 3.

Analizando la tabla 4.3.1.6, podemos comprobar que usar 3 clusters no resulta ser una buena opción en absoluto. La eficiencia en caso de usar 20 sensores se ha reducido en un 65% con respecto a usar 1 cluster. En caso de usar 50 sensores, se ha reducido en un 57%.

#### 4.3.1.4 Cantidad de clusters optimizada

Por último, en lugar de fijar nosotros mismos la cantidad de clusters, lo que haremos será permitir que los algoritmos genéticos la optimicen, seleccionando la variables *clusters\_fijados* = 0. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para una cantidad de sensores igual a 10, 20 y 50, pues para 2 y 5 sensores, la cantidad de clusters óptima siempre será igual a 1.

En las gráficas superiores se muestran gráficas parecidas a las de figuras anteriores, mostrando la eficiencia en función de la cantidad de sensores. En las gráficas inferiores, en cambio, se muestra la cantidad de clusters que ha optimizado el algoritmo por cada realización. En primer lugar se muestran las gráficas para el ángulo deseado de radiación  $\theta = 45^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ ; en segundo lugar, el ángulo  $\theta = 45^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ .

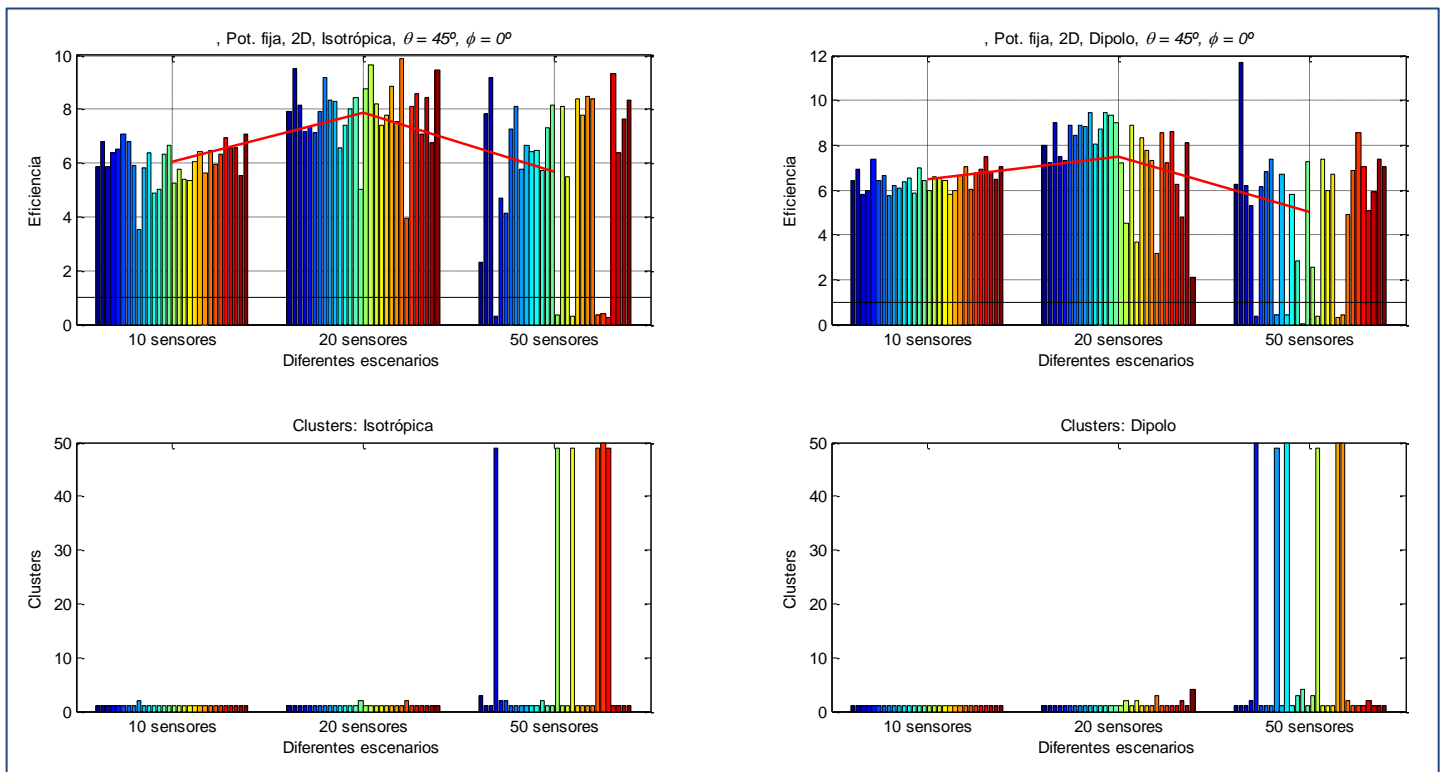


Fig. 4.3.1.17. Caso de estudio 1, clusters: optimizados. Eficiencia en función de la cantidad de sensores (1).

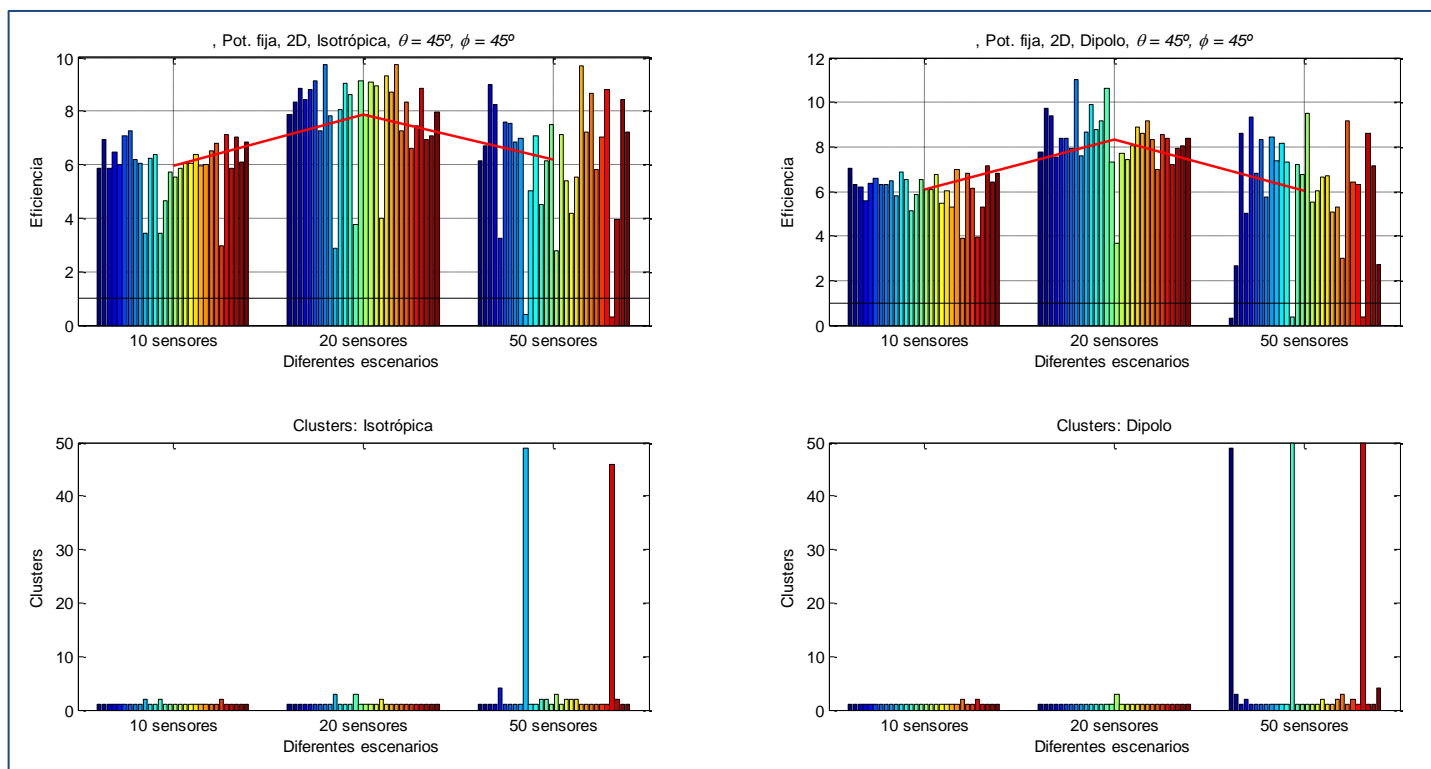


Fig. 4.3.1.18. Caso de estudio 1, clusters: optimizados. Eficiencia en función de la cantidad de sensores (2).

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
10	6.037	0.763	5.957	1.065	6.479	0.472	6.103	0.796
20	7.896	1.270	7.867	1.677	7.483	1.952	8.311	1.300
50	5.678	3.108	6.173	2.326	5.000	3.056	6.032	2.632

Tabla 4.3.1.7. Caso de estudio 1. Clusters: optimizados.

Nº de sensores	Resultados globales clusters optimizados		Respecto a 1 cluster			
	Media	$\sigma$	Media	% (media)	$\sigma$	% ( $\sigma$ )
10	6.144	0.817	-0.417	-6.350	+0.304	+59.1
20	7.889	1.583	-0.572	-6.756	+0.594	+60.1
50	5.721	2.801	-2.166	-27.460	+1.516	+118.0

Tabla 4.3.1.8. Caso de estudio 1, resultados globales. Clusters: optimizados.

Analicemos las gráficas en primer lugar. De nuevo, en cuanto a ángulo de radiación y en cuanto a tipo de antena, ambas son muy parecidas. Cuando la cantidad de sensores es igual a 10 sensores, en la mayoría de los casos, la cantidad de clusters óptima elegida por el algoritmo es igual a 1 cluster; igual ocurre cuando la cantidad de sensores es 20. Sin embargo, cuando se tienen 50 sensores, en muchos de los casos, el algoritmo considera conveniente dividirlos, en algunos casos, hasta en más de 45 clusters. La consecuencia directa de tener tantos clusters es una clara reducción en eficiencia. Como vemos, cuando la cantidad de clusters se eleva en más de 2, la eficiencia se reduce drásticamente, siendo a veces inferior a 1. En cualquier caso, vemos que los datos son bastante más dispersos que el caso en que solo existe 1 cluster fijado.

Analicemos ahora la tabla 4.3.1.8. El dato más destacable de dicha tabla es el incremento de la desviación típica en cada uno de los casos. Para 10 y 20 sensores, el incremento es de aproximadamente el 60%, mientras que para 50 sensores, la desviación típica aumenta en un 118%. De este modo, verificamos el análisis realizado de las gráficas: los datos son muy dispersos. Además, la eficiencia se reduce en un 6% para 10 y 20 sensores y se reduce en un 27% para 50 sensores. Como ya vimos en la tabla de análisis de 2 clusters fijados (tabla 4.3.1.4), la eficiencia con respecto a un cluster se reducía en todos los casos. Así, volviendo a las gráficas, vemos que en las realizaciones en las que los clusters optimizados son mayores a 1, la eficiencia se reduce.

Por ello, se plantea la cuestión de por qué el algoritmo de optimización ha hecho que la cantidad de clusters no sea 1, pues eso hace que se reduzca la eficiencia. Una posible razón podría ser que esto haya sido necesario debido a las posiciones relativas entre los sensores que se han adoptado aleatoriamente en esa realización específicamente: dichas posiciones no permitiría llevar a cabo el beamforming en un solo cluster. Sin embargo, esta hipótesis choca con que, en algunas realizaciones, para 50 sensores la cantidad de clusters sea tan elevada.

La razón por la que esto ocurriría es que el algoritmo no realiza la optimización de los clusters adecuadamente. En el apartado “4.3.1.2 2 clusters”, en el que se estudiaba el caso en que se fijaban dos clusters, ya se comentó el problema con que la cantidad de generaciones sea igual para todos los casos, sin importar la cantidad de sensores a tener en cuenta. En este caso en que se optimiza la cantidad de clusters, las variables que se introducen en el algoritmo para 10 sensores son un total de 21 (10 de amplitud, 10 de fase y 1 de cantidad de clusters). Dado que todas las variables tienen el mismo peso (importancia) en el algoritmo, la variable que controla la cantidad de clusters tendrá un peso de  $1/21$ . Para 20 sensores, este peso es de  $1/41$ . Para 50, el peso es de  $1/101$ . Por ello, cuando se tienen 50 sensores, la cantidad de clusters optimizados es tan dispersa: la variable que controla los clusters apenas tiene importancia en el algoritmo. Esta hipótesis gana más peso que la de las posiciones, pues es cierta para todas las cantidades de sensores. Debido a que el peso de esta variable para 10 y 20 sensores es de más del doble, en la mayoría de los casos, la optimización se realiza adecuadamente y la cantidad de clusters óptima es igual a 1.

En conclusión, dado que en algunos casos el algoritmo de optimización para la cantidad de clusters puede fallar, podemos concluir que los algoritmos genéticos con 200 generaciones y 100 de población no pueden optimizar la cantidad de clusters adecuadamente. Además, por lo que hemos visto hasta ahora, siempre resulta más favorable, en términos de eficiencia, fijar la cantidad de clusters a 1 y que todos trabajen conjuntamente, en lugar de seleccionar más de 1 cluster. En los siguientes apartados comprobaremos si en algún caso resulta favorable cambiar la cantidad de clusters o no.

#### **4.3.1.5 Comparativa en función de la cantidad de clusters**

En este apartado se llevará a cabo una comparativa de la eficiencia obtenida en función de la cantidad de clusters y la cantidad de sensores, según los experimentos de este caso de estudio. En la figura siguiente, podemos ver la eficiencia obtenida según la

cantidad de sensores. La línea azul representa la eficiencia cuando todos los sensores se agrupan en un solo cluster; la línea roja representará la eficiencia en caso de que los sensores se hayan distribuido en 2 clusters; la verde, 3 clusters; la negra representa la eficiencia obtenida cuando la cantidad de clusters ha sido optimizada.

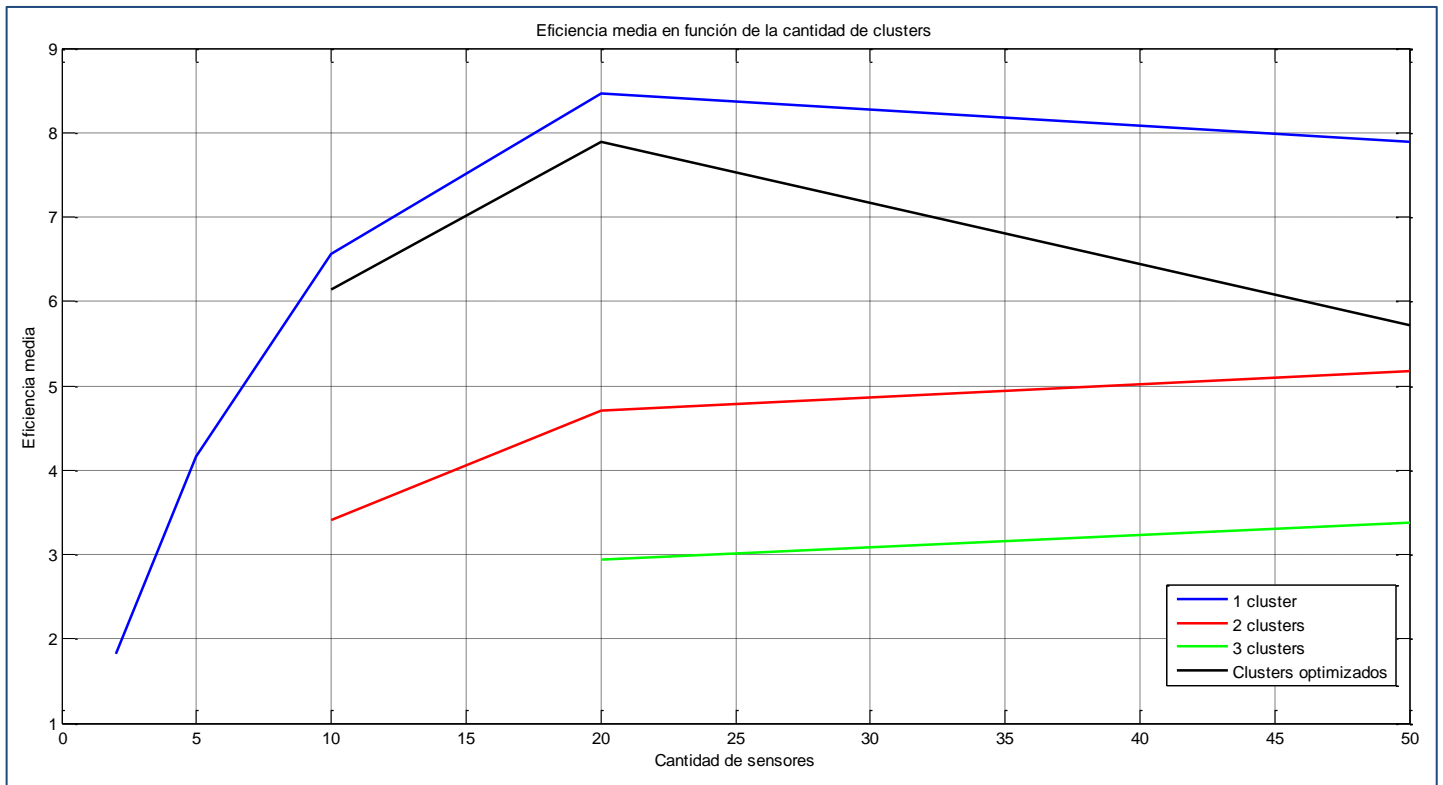


Fig. 4.3.1.19. Caso de estudio 1. Eficiencia para 1, 2, 3 clusters y clusters optimizados (comparativa).

Analizando las gráficas, vemos que la mejor opción es agrupar los sensores en único cluster, pues en todos los casos se obtiene una mayor eficiencia. En cuanto a usar 2 clusters, vemos cómo la eficiencia se reduce significativamente, como ya hemos estudiado en los apartados anteriores. Usar 3 clusters no es una opción recomendable, pues reduce la eficiencia a más de la mitad.

En cuanto a optar por la opción de usar clusters optimizados, vemos que se obtienen resultados ligeramente inferiores a utilizar 1 cluster, aunque superiores a utilizar 2 clusters. En cualquier caso, esta tampoco es una buena opción, pues la eficiencia se reduce.

Como ya se ha comentado en el apartado “4.3.1.1 1 cluster”, la eficiencia para 50 sensores se reduce con respecto a la eficiencia para 20 sensores, contrario a lo que cabría esperar, pues el uso del beamforming mejora a medida que aumenta el número de antenas. En el apartado “4.3.7 Explicación al efecto observado en los casos de estudio en 2D”, se mostrará una posible explicación a este efecto.

Así, como conclusión a este apartado, podemos afirmar que en un escenario como el que se presenta en este caso de estudio, la opción óptima será distribuir los sensores en un solo cluster, de manera que todos funcionen de forma conjunta para llevar a cabo el beamforming. De este modo, se puede conseguir prolongar la vida de los sensores hasta

en 8.5 veces en caso de usar 20 sensores, con respecto a aquellos que no usen beamforming.

### 4.3.2 Caso de estudio 2

En este segundo caso de estudio, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Sensores con posiciones aleatorias fijas.
- Tres dimensiones.
- Carga de al máximo para todos los sensores.
- Antenas isotrópicas. Antenas dipolo.
- $\varphi = 0^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ .  $\theta = 45^\circ$ .
- Cantidad de sensores: 2, 5, 10, 20, 50.

Este caso difiere con el caso 1 en que el escenario será distinto. Ahora, en lugar de disponer los sensores en un plano (XY de 30x30), sino que se dispondrán en tres dimensiones (3D, 30x30x30). Este caso es similar a un escenario que se puede dar en la realidad, pues difícilmente encontraríamos un caso real en que los sensores se encuentren perfectamente alineados en un plano. De este modo, se desea comprobar si el beamforming es capaz de funcionar y optimizar la vida de sensores que se encuentren distribuidos en tres dimensiones con cargas de batería al máximo e iguales entre sí, para antenas isotrópicas y antenas dipolo.

A continuación, al igual que en el apartado anterior, este apartado se dividirá en distintas secciones correspondientes a las distintas cantidades de clusters.

#### 4.3.2.1 1 cluster

Con la variable *clusters\_fijos* = 1, se representan algunos de los diagramas de radiación de este caso, para 2, 5 y 20 sensores. Dado que el motivo de presentar estos diagramas es mostrar cómo de bien funciona el beamforming para apuntar a una dirección deseada, carece de sentido hacer la representación cuando se tiene más de 1 cluster (se debería representar un diagrama de radiación para cada cluster), pues para el caso de 2 sensores no sería posible y para el caso de 20 sensores, dadas las conclusiones del apartado anterior, se espera que el resultado sea peor (en términos de eficiencia). Además, si se representara el diagrama de radiación con 2 clusters de 20 sensores, realmente estaríamos representando el diagrama de radiación de solo 10 sensores de uno de los clusters.

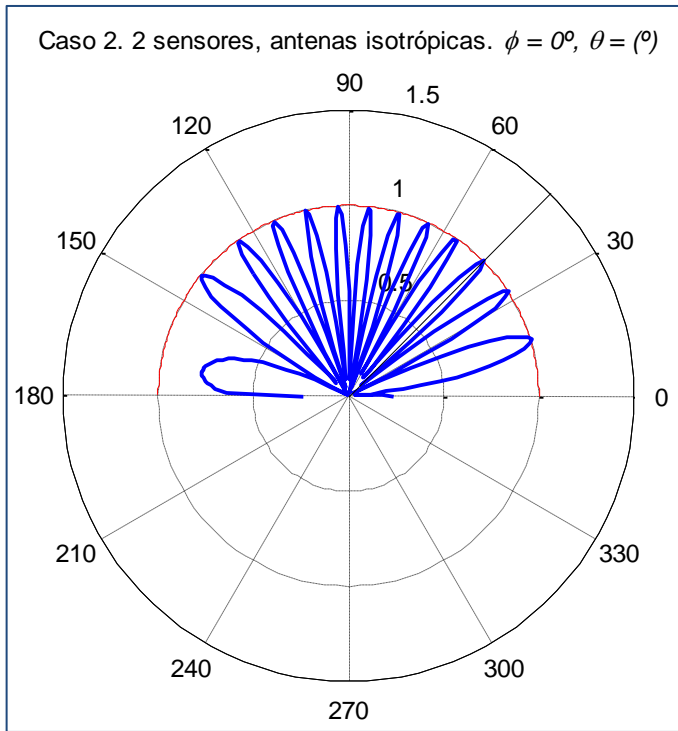


Fig. 4.3.2.1. Caso 2, 2 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

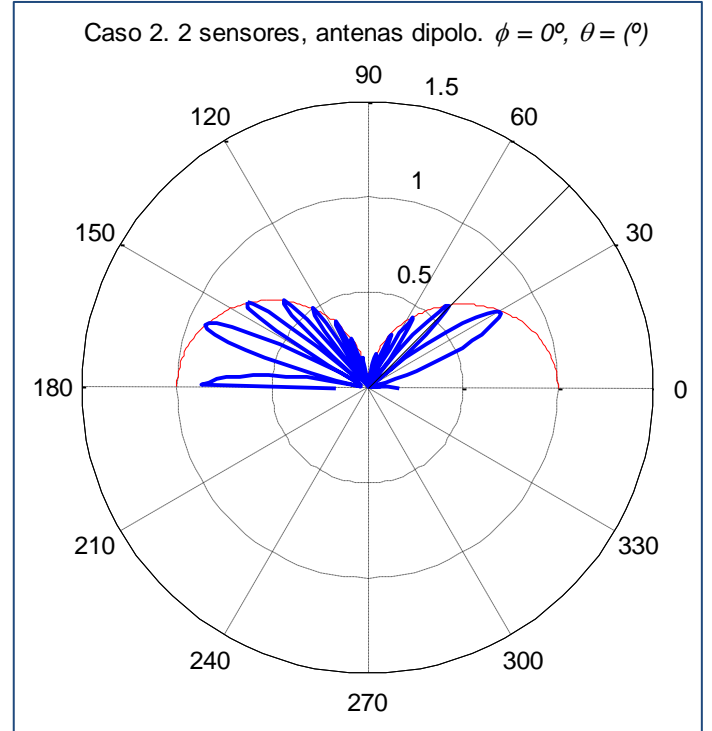


Fig. 4.3.2.2. Caso 2, 2 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

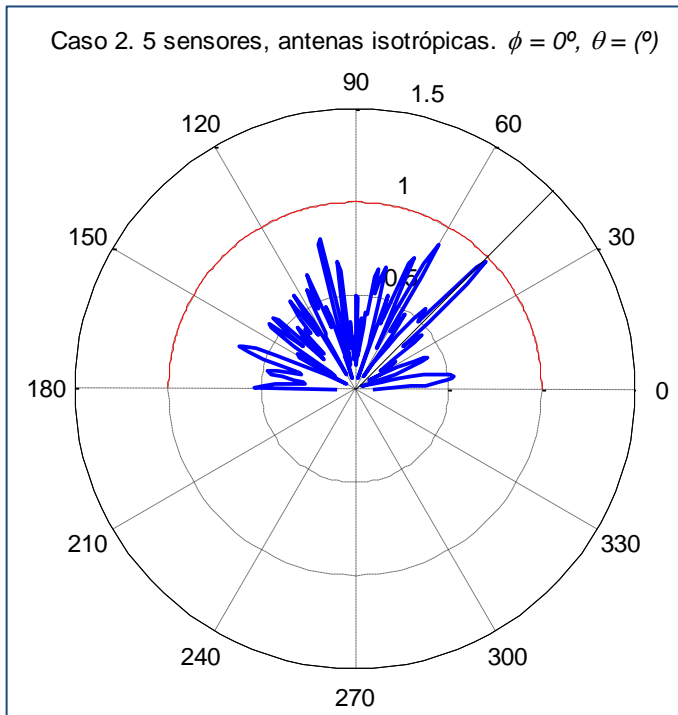


Fig. 4.3.2.3. Caso 2, 5 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

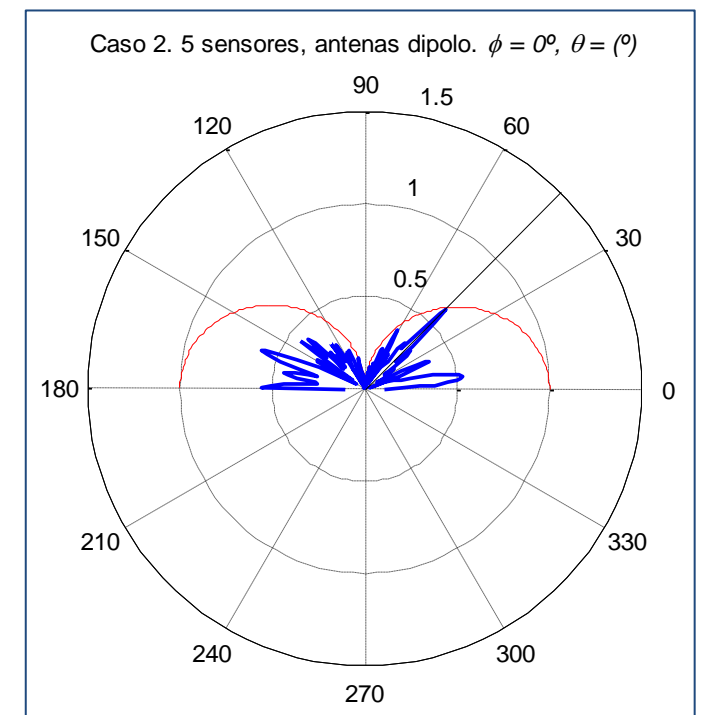


Fig. 4.3.2.4. Caso 2, 5 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

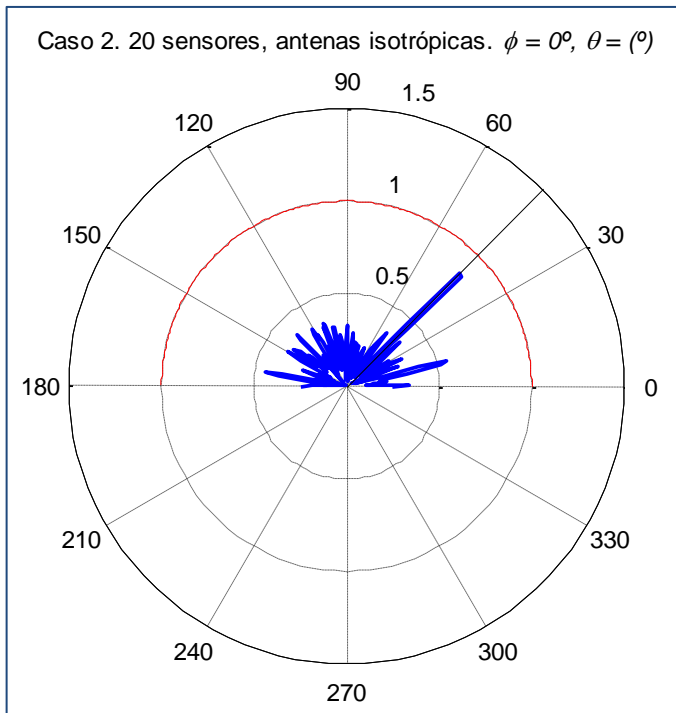


Fig. 4.3.2.5. Caso 2, 20 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

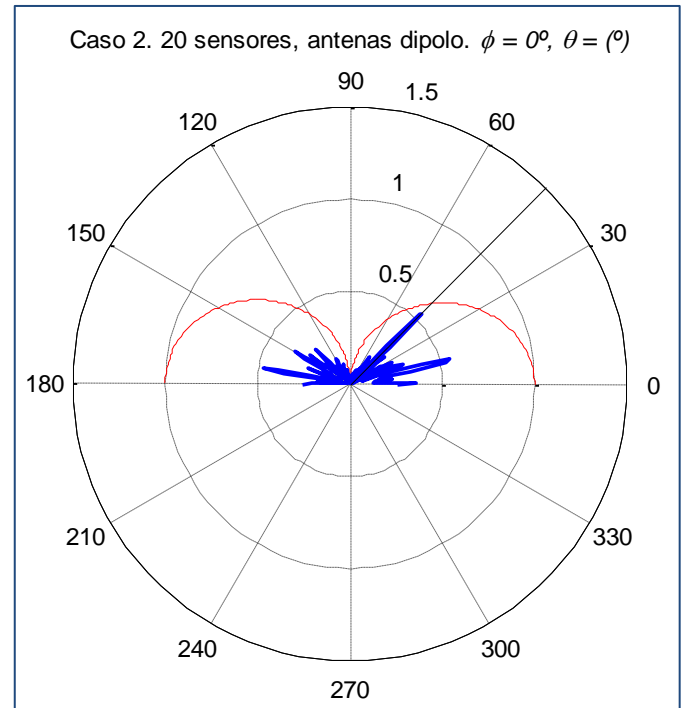


Fig. 4.3.2.6. Caso 2, 20 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

Comparando estos diagramas de radiación con los de las figuras 4.3.1.1-4.3.1.6 del caso de estudio anterior, vemos que ha aumentado la cantidad de lóbulos. En aquel caso, solo existían lóbulos principales muy anchos. Sin embargo, en este caso, para 2 sensores, vemos que existen hasta 13 lóbulos principales estrechos para la antena isotrópica y unos 10 lóbulos para la antena dipolo. En referencia al caso en que hay 5 sensores, también ha aumentado la cantidad de lóbulos. En cuanto al caso de 20 sensores, vemos tan solo un lóbulo principal para la antena isotrópica y dos lóbulos principales para la antena dipolo. La posible causa de este aumento de lóbulos es la distribución de los sensores de manera tridimensional, en contraposición al caso anterior, en la que la distribución era bidimensional. Esto hace que los nodos no estén tan idealmente situados y, por tanto, el algoritmo que lleva a cabo el beamforming no pueda hacer que exista un único lóbulo principal.

Sin embargo, analizando las seis figuras (figuras 4.3.2.1 - 4.3.2.6), vemos que en todos los casos uno de los lóbulos principales apunta en la dirección de radiación deseada. No solo eso, sino que además dicho lóbulo es el de mayor potencia en todos los casos. De este modo, podemos afirmar que es posible que el beamforming se lleve a cabo adecuadamente cuando los nodos se encuentran distribuidos en un escenario tridimensional.

A pesar de ello, aún no hemos visto si la eficiencia supera el valor unidad, lo cual es indicativo de que se cumple el objetivo de este proyecto. A continuación, se presentan los resultados que se han obtenido tras ejecutar 600 realizaciones de los distintos experimentos pertenecientes a este caso.



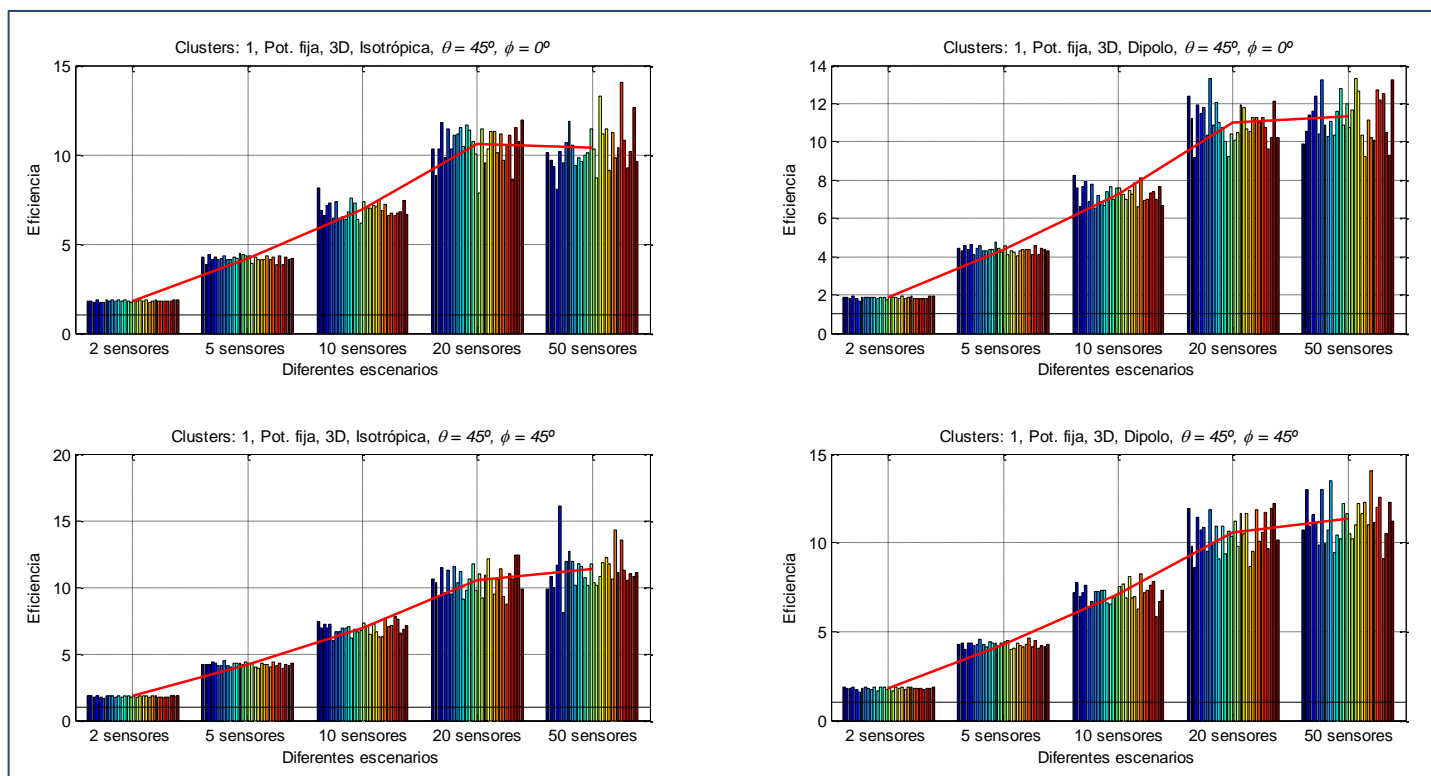


Fig. 4.3.2.7. Caso de estudio 2, clusters: 1. Eficiencia en función de la cantidad de sensores.

Analizando las gráficas, podemos ver que en todas y cada una de las realizaciones, la eficiencia es superior a la unidad. De este modo, se consigue el objetivo de este proyecto, pues se consigue prolongar la vida de las baterías usando el beamforming para escenarios en los que los sensores se encuentran distribuidos en un espacio tridimensional y con la carga de las baterías al máximo.

Por lo general, al igual que en el caso anterior, vemos que no importa el ángulo en que se desea radiar ni el tipo de antena usada, pues para cada cantidad de sensores se obtienen prácticamente los mismos resultados.

A continuación, se muestran unas tablas similares a las presentadas en el apartado anterior, que pretenden resumir la figura 4.3.2.7.

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
2	1.809	0.046	1.798	0.062	1.848	0.057	1.811	0.079
5	4.186	0.163	4.208	0.141	4.357	0.169	4.285	0.158
10	6.937	0.441	6.910	0.438	7.294	0.470	7.146	0.538
20	10.597	0.980	10.521	1.023	10.978	0.950	10.572	1.027
50	10.413	1.307	11.340	1.472	11.307	1.174	11.325	1.193

Tabla 4.3.2.1. Caso de estudio 2. Clusters: 1.

Nº de sensores	Resultados globales	
	Media	$\sigma$
2	1.817	0.064
5	4.259	0.170

<b>10</b>	7.072	0.493
<b>20</b>	10.667	0.999
<b>50</b>	11.096	1.336

Tabla 4.3.2.2. Caso de estudio 2, resultados globales. Clusters: 1.

Analizando las tablas, vemos que los valores medios de eficiencia que se han obtenido son mejores para antenas dipolo que para antenas isotrópicas, con respecto al mismo ángulo en que se desea radiar. Probablemente, la causa es que una antena dipolo que no usa beamforming tendrá menor tiempo de vida si desea radiar en un ángulo que no es el máximo permitido por su diagrama de radiación. De esta forma, podemos afirmar que usar el algoritmo implementado con antenas tipo dipolo (que son bastante comunes) es incluso más beneficioso que usar antenas isotrópicas (que son ideales).

En cuanto a este tipo de escenario, se podría presentar alguna duda en cuanto a si sería posible conseguir que el algoritmo funcionara en cualquier ángulo, pues los sensores ya no están dispuestos en un plano. Sin embargo, vemos que el algoritmo funciona independientemente del ángulo en que se desea radiar. De este modo, es posible afirmar que el algoritmo funcionará con independencia del ángulo en el que deseemos radiar.

En cuanto a los valores de eficiencia obtenidos, todos superan la unidad con creces, incluso cuando usamos tan solo dos sensores. En todos los casos, el algoritmo es capaz de superar la barrera que supone que al usar el beamforming los sensores tengan que radiar durante un tiempo  $X \cdot T$ , siendo  $X$  la cantidad de sensores y  $T$  el tiempo que tendría que radiar un sensor que no usa beamforming para transmitir la información. Esto ya ocurría en el apartado anterior y, dado que en algunos casos la eficiencia supera el 1000%, podemos concluir que con este tipo de escenario (carga de las baterías al máximo y 3D) y el tipo de escenario del caso anterior (carga de las baterías al máximo y 2D) se conseguirá el objetivo de este proyecto, pues con una cantidad de 20 sensores (por ejemplo), se consigue prolongar el tiempo de vida de los sensores (como mínimo) más de 10 veces.

Con respecto a la tendencia observada en el caso anterior, en el que la eficiencia para 50 sensores se reducía frente a la eficiencia de 20 sensores, esa tendencia parece no estar presente en este caso. Solamente aparece para antenas isotrópicas y para el ángulo  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$ . Para ese experimento, la eficiencia para 50 sensores se reduce ligeramente con respecto a la de 20 sensores. Para el resto de experimentos, la eficiencia es claramente superior. Así pues, no podemos sacar más conclusiones con respecto a este efecto con los experimentos presentados en este caso. En futuros casos, veremos si se presenta o no.

#### 4.3.2.2 2 clusters

Al igual que en el apartado anterior, se decide comprobar si es conveniente o no dividir los sensores en dos clusters que radien de forma independiente en la misma dirección. Para ello, hacemos que la variable *clusters\_fijados* sea igual a 2. De nuevo, se decide hacerlo solo para los experimentos en los que se tienen 10, 20 y 50 sensores.

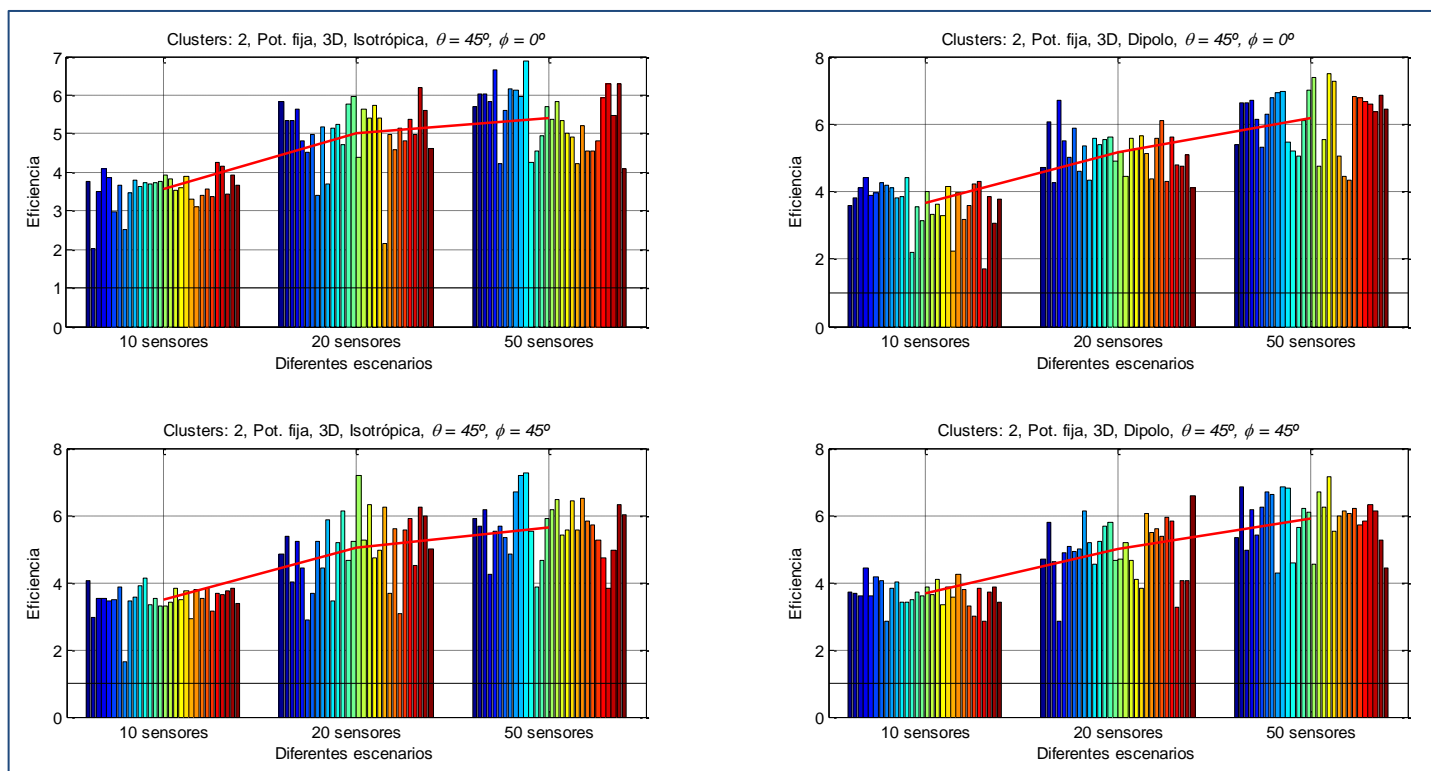


Fig. 4.3.2.8. Caso de estudio 2, clusters: 2. Eficiencia en función de la cantidad de sensores.

Se presentan ahora las tablas que resumen estas gráficas:

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
10	3.568	0.456	3.501	0.451	3.651	0.662	3.666	0.380
20	5.019	0.821	5.033	1.027	5.179	0.629	4.993	0.859
50	5.420	0.775	5.650	0.853	6.178	0.897	5.900	0.770

Tabla 4.3.2.3. Caso de estudio 2. Clusters: 2.

Nº de sensores	Resultados globales 2 clusters		Respecto a 1 cluster	
	Media	$\sigma$	Media	%
10	3.597	0.497	-3.475	-49.140
20	5.056	0.838	-5.611	-52.603
50	5.787	0.863	-5.309	-47.848

Tabla 4.3.2.4. Caso de estudio 2, resultados globales. Clusters: 2.

Si analizamos la tabla 4.3.2.4, comparando los resultados con 2 clusters y los resultados con 1 cluster, vemos que claramente es mejor usar un solo cluster, pues la eficiencia se reduce en un 50%, aproximadamente. De este modo, es aconsejable evitar usar dos clusters cuando se tenga un caso con un escenario similar al de estos experimentos.

De nuevo, la eficiencia cuando se tienen 50 sensores divididos en dos clusters es mayor que la eficiencia cuando se tienen 20 sensores divididos en dos clusters, de forma que no se da el efecto que se presentaba en el caso de estudio anterior.

En el apartado anterior se observó el siguiente efecto. La eficiencia obtenida al usar 2 clusters y 10 sensores no era parecida a la eficiencia al usar 1 cluster y 5 sensores, cuando cabría esperar justo lo contrario. Veamos si ese efecto se da en este caso de estudio. En la siguiente figura se muestra una gráfica semejante a la mostrada en la figura 4.3.1.15.

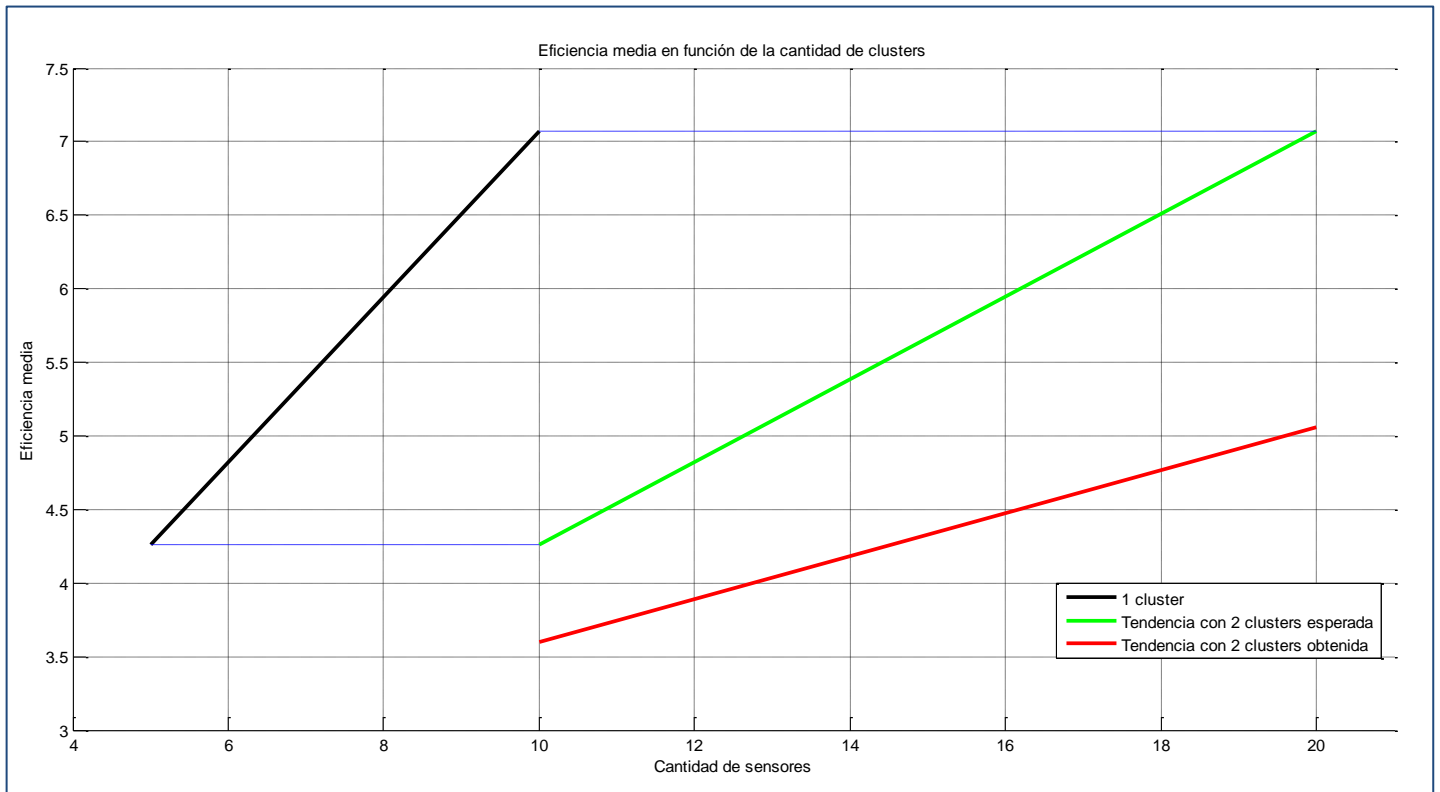


Fig. 4.3.2.9. Caso de estudio 2. Eficiencia media en función de la cantidad de clusters (comparativa).

De nuevo, se reproduce el mismo efecto: la eficiencia obtenida con 10 sensores y 2 clusters se encuentra por debajo de la eficiencia obtenida con 5 sensores y 1 cluster, igual que con 20 sensores y 10 sensores. Las causas, al igual que en el caso anterior, podrían ser la cantidad de generaciones y que el algoritmo que organiza los vectores según la distancia no sea el más apropiado.

### 4.3.2.3 3 clusters

A continuación, se estudiarán los resultados obtenidos para las condiciones de este caso de estudio, dividiendo los sensores en 3 clusters, fijando la variable *clusters\_fijos* = 3. En la siguiente figura, se muestran los resultados de eficiencia obtenidos, tan solo para 20 y 50 sensores, pues carece de sentido dividir 10 sensores en 3 clusters.

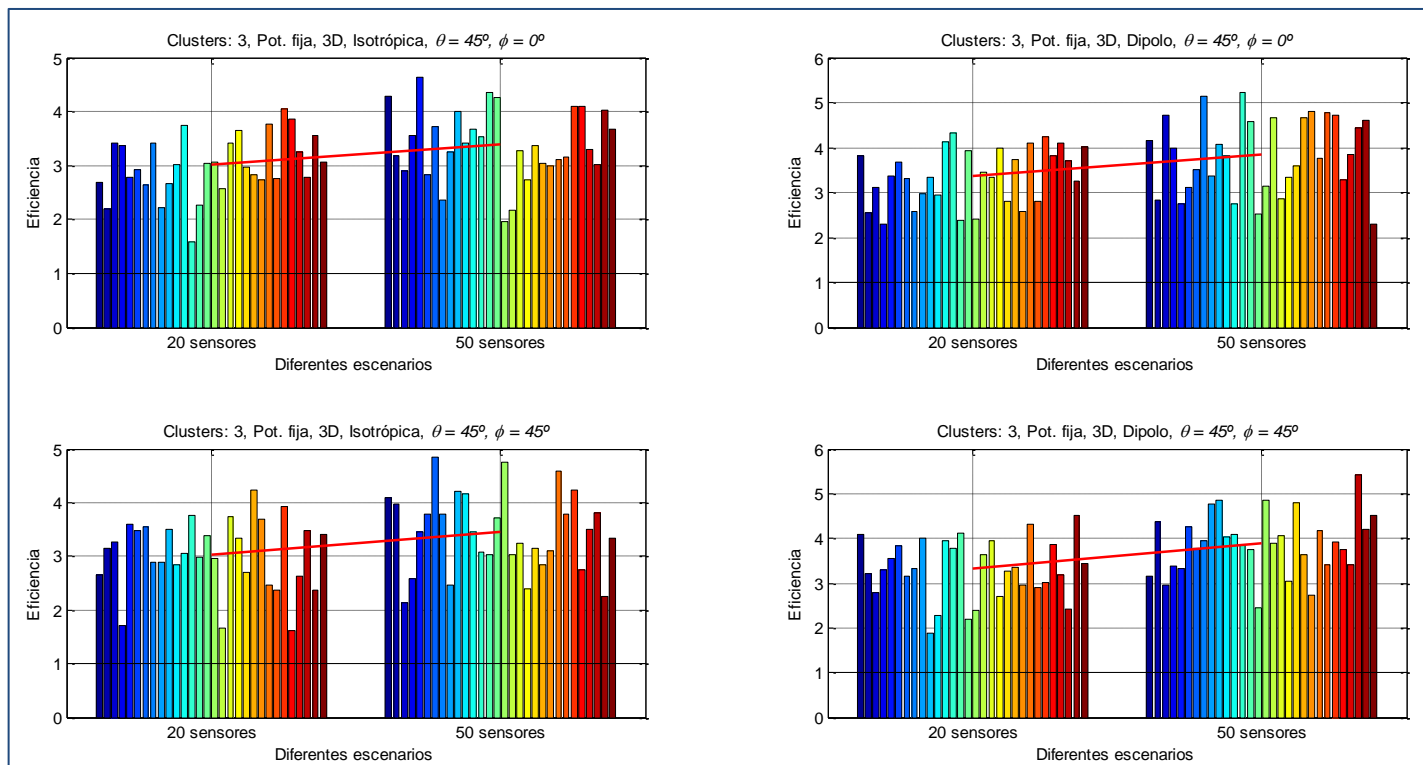


Fig. 4.3.2.10. Caso de estudio 2, clusters: 1. Eficiencia en función de la cantidad de sensores.

Las tablas resumen para las gráficas de la figura 4.3.2.10 son:

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
20	3.008	0.559	3.042	0.662	3.369	0.621	3.314	0.668
50	3.398	0.654	3.451	0.730	3.843	0.837	3.895	0.682

Tabla 4.3.2.5. Caso de estudio 2. Clusters: 3.

Nº de sensores	Resultados globales 3 clusters		Respecto a 1 cluster	
	Media	$\sigma$	Media	%
20	3.184	0.641	-7.484	-70.156
50	3.647	0.754	-7.450	-67.135

Tabla 4.3.2.6. Caso de estudio 2, resultados globales. Clusters: 3.

Analizando esta última tabla (4.3.2.6), vemos que no es nada beneficioso dividir los sensores en 3 clusters. Comparando los valores obtenidos con respecto a los valores que se obtienen al utilizar solo 1 cluster, vemos que dividiendo los sensores en 3 clusters, la eficiencia llega a reducirse en más de un 65%.

#### 4.3.2.4 Cantidad de clusters optimizada

Por último, al igual que en el apartado anterior, dejaremos que el algoritmo optimice la cantidad de clusters, ajustando la variable *clusters\_fijos* = 0. Solo se han tenido en cuenta las cantidades de sensores 10, 20 y 50. Los resultados obtenidos se muestran en

las siguientes figuras. La primera de ella muestra los valores de eficiencia para el ángulo  $\theta = 45^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ ; la segunda, para el ángulo  $\theta = 45^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ .

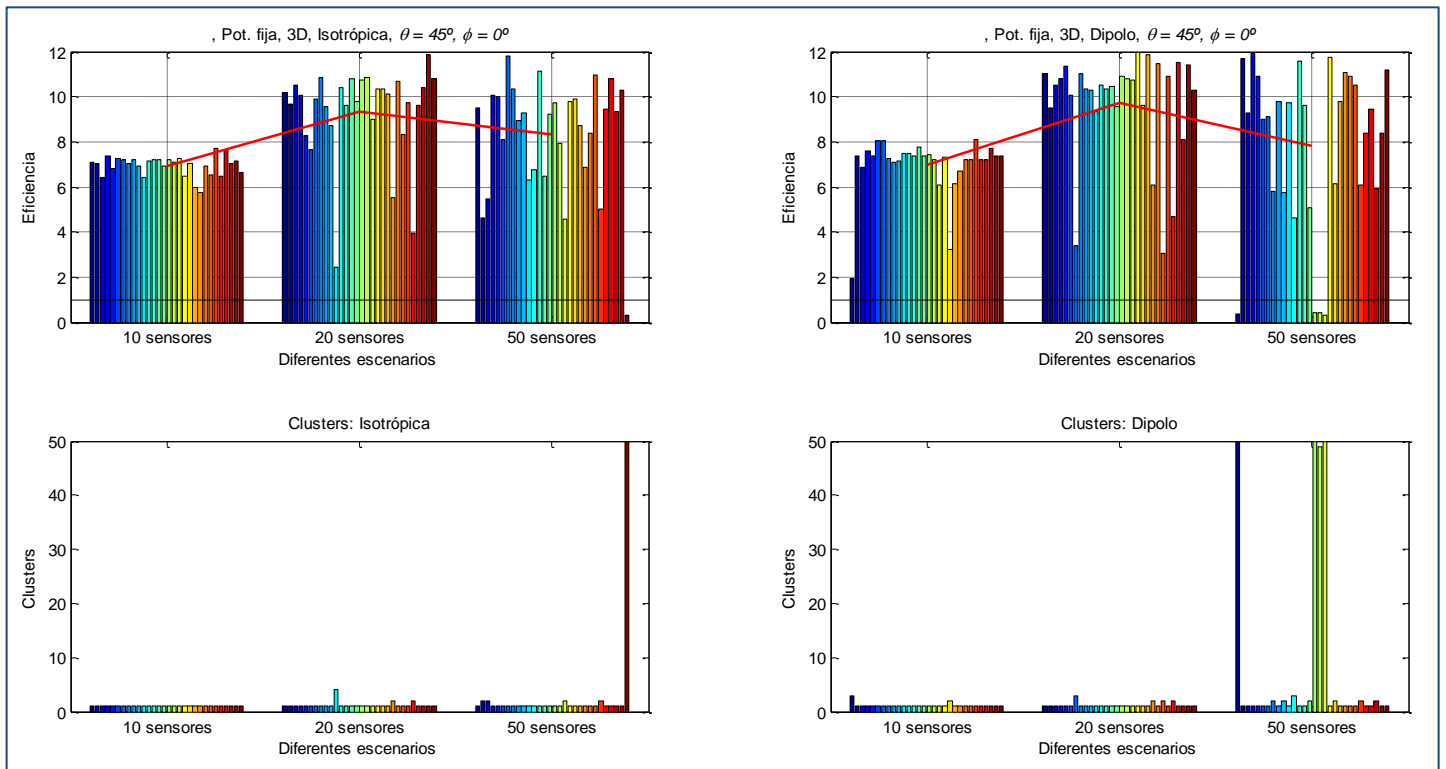


Fig. 4.3.2.11. Caso de estudio 2, clusters: optimizados. Eficiencia en función de la cantidad de sensores (1).

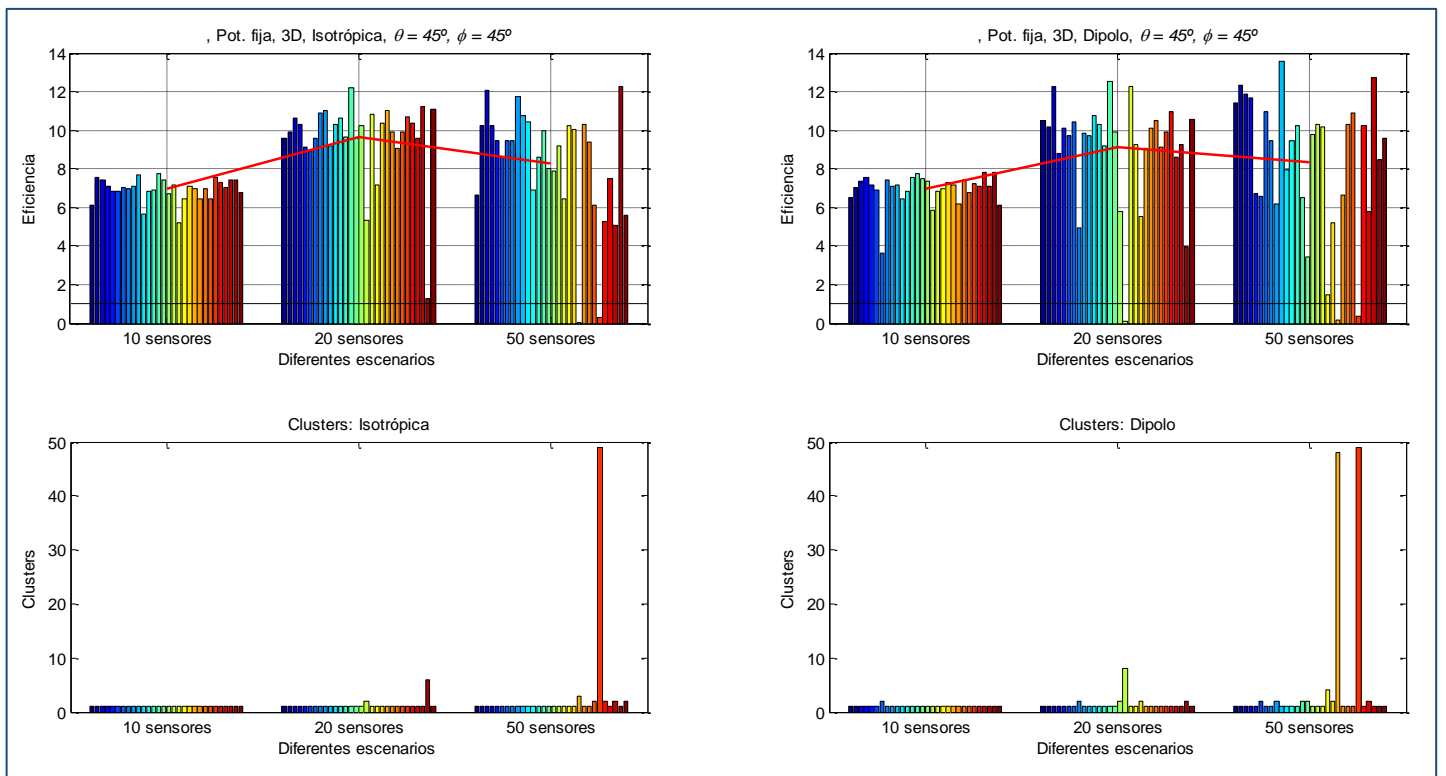


Fig. 4.3.2.12. Caso de estudio 2, clusters: optimizados. Eficiencia en función de la cantidad de sensores (2).

Las tablas que resumen las gráficas son:

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
10	6.942	0.443	6.936	0.569	6.990	1.292	6.964	0.800
20	9.356	2.067	9.651	2.031	9.726	2.348	9.142	2.635
50	8.335	2.509	8.271	2.950	7.839	3.666	8.346	3.560

Tabla 4.3.2.7. Caso de estudio 2. Clusters: optimizados.

Nº de sensores	Resultados globales clusters optimizados		Respecto a 1 cluster			
	Media	$\sigma$	Media	% (media)	$\sigma$	% ( $\sigma$ )
10	6.958	0.831	-0.114	-1.611	+0.337	+68.3
20	9.469	2.267	-1.198	-11.232	+1.267	+126.8
50	8.198	3.172	-2.899	-26.122	+1.837	+137.5

Tabla 4.3.2.8. Caso de estudio 2, resultados globales. Clusters: optimizados.

Si analizamos las gráficas 4.3.2.11 y 4.3.2.12, vemos que para el caso de 10 sensores y antenas isotrópicas, el algoritmo de optimización de clusters ha funcionado correctamente, pues ha situado a todos los sensores en el mismo cluster. Sin embargo, en algunas de las realizaciones, el algoritmo ha dividido esos 10 sensores en más de 1 cluster para antenas dipolo. A pesar de ello, la eficiencia media se reduce ligeramente con respecto a cuando fijamos la variable *clusters\_fijos* = 1 (-1.6%).

Observando de nuevo las gráficas para 20 y 50 sensores, vemos que el algoritmo falla, pues en múltiples realizaciones divide los sensores en más de un cluster. La diferencia con respecto a los resultados obtenidos para un solo cluster es notable: la eficiencia se reduce en un 11.2% para 20 sensores y se reduce en un 26% para 50 sensores. En ambos casos, la dispersión de los datos es muy destacable: la desviación típica aumenta un 126% para 20 sensores y un 137% para 50 sensores. El mal funcionamiento del algoritmo de división en clusters hace incluso que la eficiencia para 50 sensores sea inferior a la eficiencia de 20 sensores.

De este modo, concluimos que es siempre mejor no dividir los sensores en clusters, pues ello hará que se reduzca la eficiencia notablemente. La causa por la cual algoritmo de optimización de los clusters puede no funcionar adecuadamente ya se comentó en el caso de estudio anterior: el peso de la variable que controla la cantidad de clusters se reduce conforme aumenta el número de sensores. Esto se comprueba viendo las gráficas obtenidas para 50 sensores: existen casos en los que la cantidad de clusters alcanza los 50 clusters, haciendo que la eficiencia se reduzca incluso por debajo de la unidad, pues existen clusters con un solo sensor.

La conclusión de este caso de estudio es semejante a la del apartado anterior. El algoritmo implementado no funciona adecuadamente con 200 generaciones 100 de población para los algoritmos genéticos para todas las cantidades de sensores, pues funciona adecuadamente para una cantidad reducida de sensores y no funciona correctamente para cantidades elevadas de sensores.

#### 4.3.2.5 Comparativa en función de la cantidad de clusters

Del mismo modo que en el caso de estudio anterior, en este apartado se realizará una comparativa entre los resultados de eficiencia obtenidos para los distintos clusters. En la figura siguiente se muestra dicha comparativa.

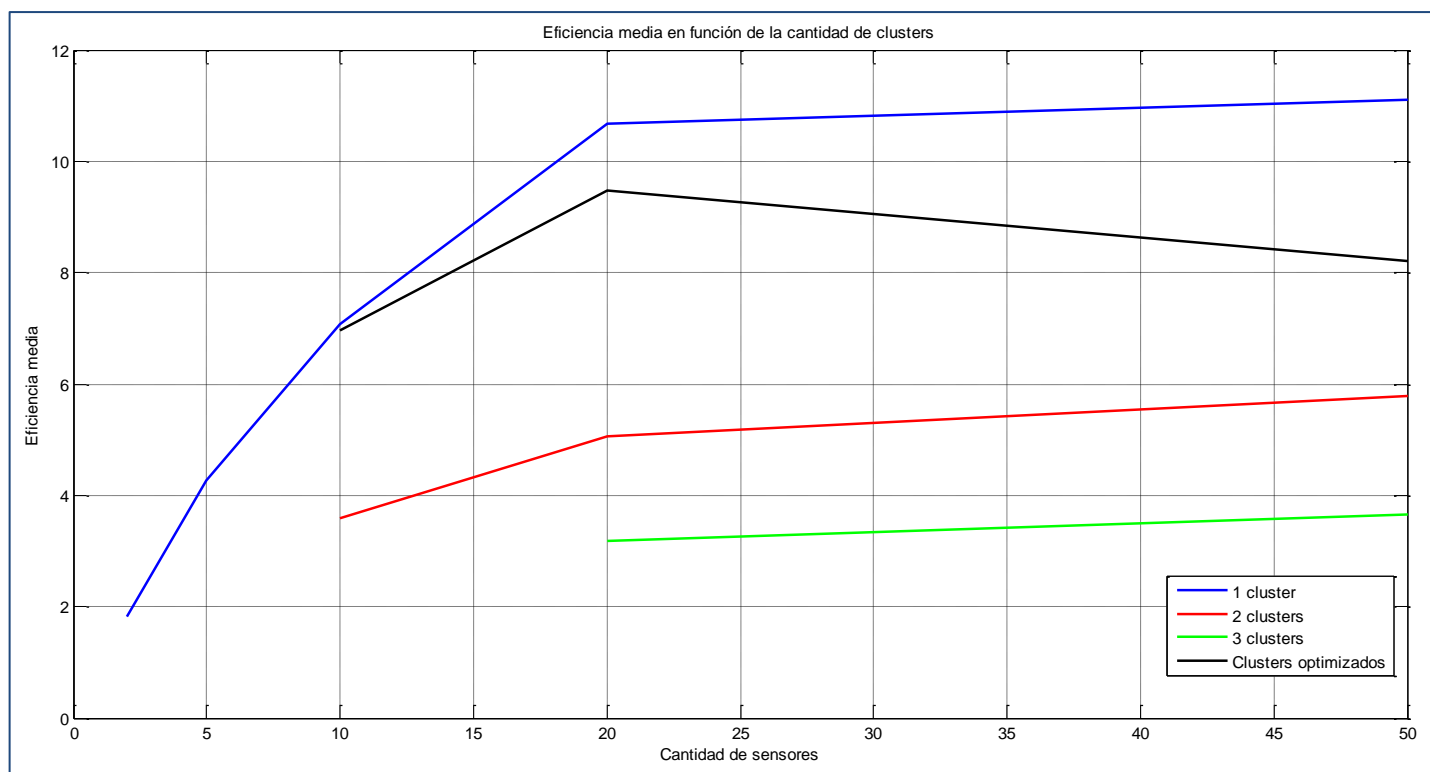


Fig. 13. Caso de estudio 2. Eficiencia para 1, 2, 3 clusters y clusters optimizados (comparativa).

De nuevo, al igual que en el caso de estudio anterior, la eficiencia obtenida al agrupar los sensores en 1 cluster es superior al resto. Al agrupar los sensores en 2 y 3 clusters, la eficiencia se reduce apreciablemente. Al seleccionar que se optimice la cantidad de clusters, la eficiencia también se reduce, de modo que esta opción es descartable.

Al contrario que en el caso de estudio anterior, vemos que la eficiencia para 50 sensores es superior a la eficiencia obtenida con 20 sensores. La diferencia entre ambos es que en el caso de estudio anterior se consideraba un escenario en 2D y en este caso de estudio el escenario es en 3D. Sin embargo, se analizará este efecto en el apartado “4.3.7 Explicación al efecto observado en los casos de estudio en 2D”.

Para concluir este caso de estudio, en caso de considerar un escenario como el que aquí se presenta (carga de batería igual para todos los sensores y 3D), la mejor opción es no dividir los sensores en clusters, pues para ese experimento la eficiencia es la mayor. Con 50 sensores, el tiempo de vida de los sensores puede llegar a prolongarse hasta 11 veces más que aquellos que no usen beamforming.



### 4.3.3 Caso de estudio 3

En este tercer caso de estudio, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Sensores con posiciones aleatorias fijas.
- Dos dimensiones, plano XY.
- Carga de batería aleatoria para todos los sensores.
- Antenas isotrópicas. Antenas dipolo.
- $\phi = 0^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ .  $\theta = 45^\circ$ .
- Cantidad de sensores: 2, 5, 10, 20, 50.

Este caso difiere con el caso 1 en la distinta carga de batería de los sensores. En este caso, la carga de la batería de cada nodo se decidirá aleatoriamente (variable aleatoria uniforme) en el intervalo  $[0.2, 1]$ , con media igual a 0.6. Este escenario es mucho más realista que el del caso 1, pues es muy difícil garantizar en un caso real que la batería de todos los sensores esté cargada al máximo y que ese máximo sea el mismo para todas las baterías. De este modo, en este caso se quiere hacer un estudio de la eficiencia cuando las baterías tienen cargas distintas.

Veamos algunos de los diagramas de radiación que se obtienen para 2, 5 y 20 sensores y comprobemos si se aprecian diferencias notables con respecto a los anteriores casos.

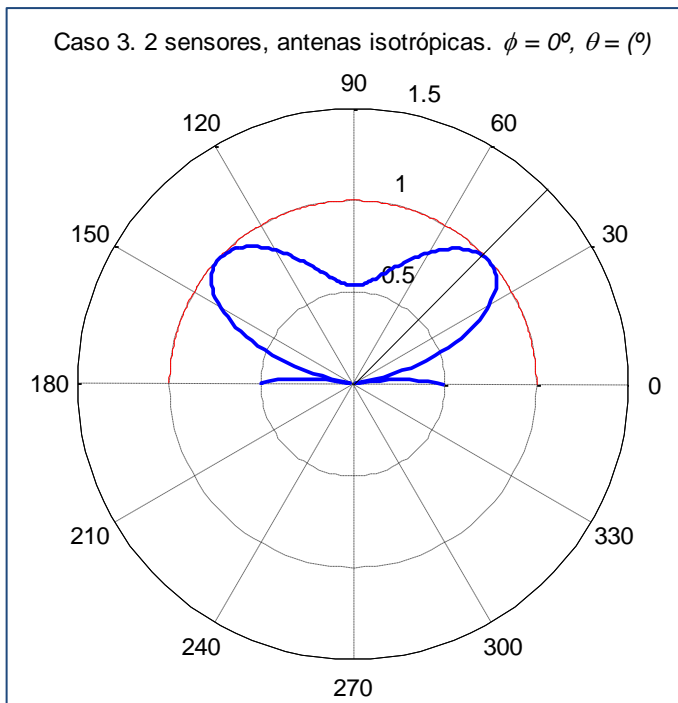


Fig. 4.3.3.1. Caso 3, 2 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

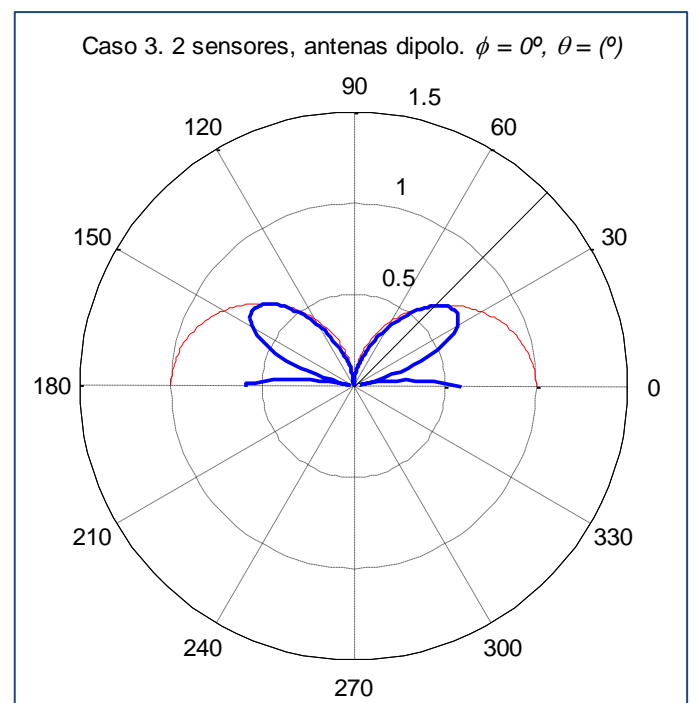


Fig. 4.3.3.2. Caso 3, 2 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

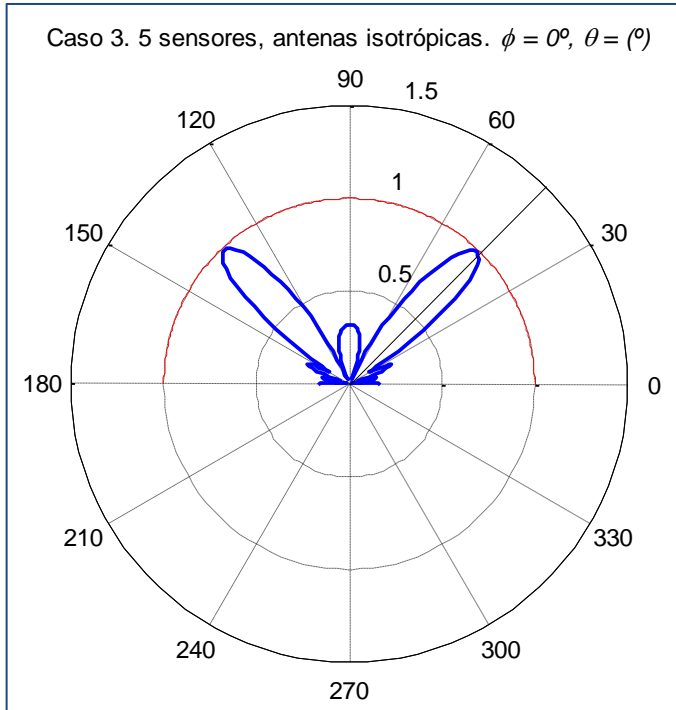


Fig. 4.3.3.3. Caso 3, 5 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

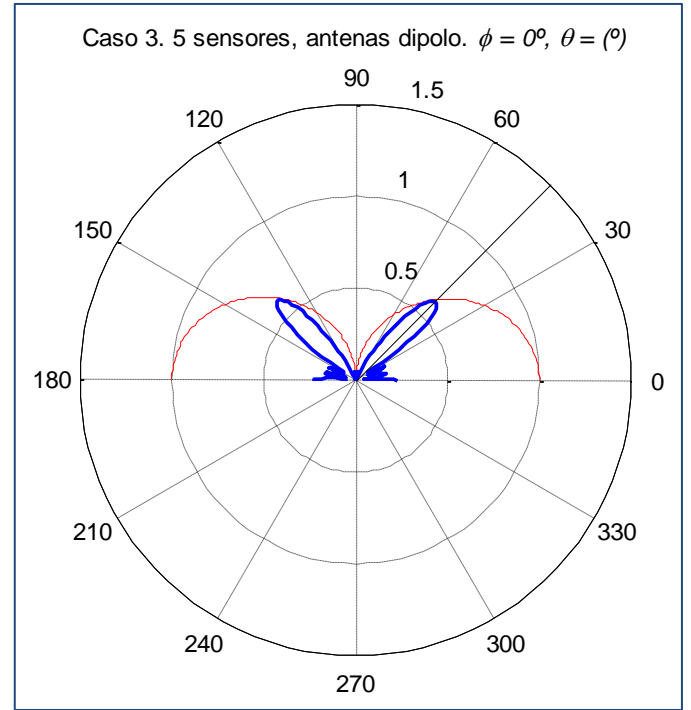


Fig. 4.3.3.4. Caso 3, 5 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

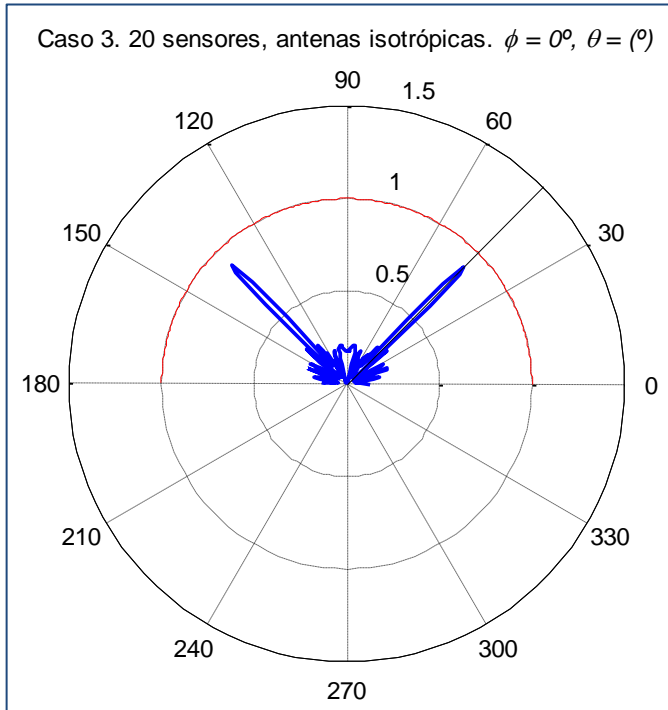


Fig. 4.3.3.5. Caso 3, 20 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

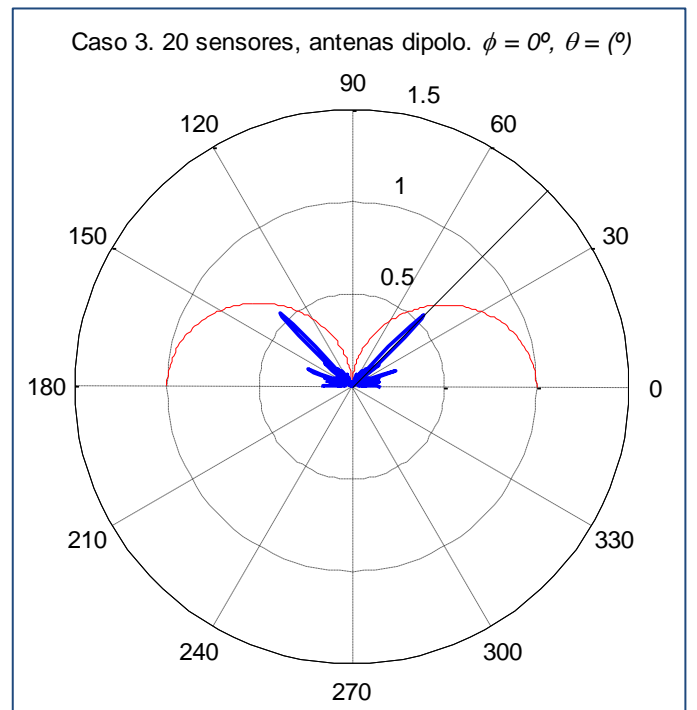


Fig. 4.3.3.6. Caso 3, 20 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

Comparando estos diagramas de radiación obtenidos en el caso de estudio 1 (sensores con carga al máximo en 2D), es decir, las figuras 4.3.1.1 y 4.3.1.2 para el caso de 2 sensores, las figuras 4.3.1.5 y 4.3.1.6 para el caso de 5 sensores y las figuras 4.3.1.9 y 4.3.1.10 para el caso de 20 sensores, podemos ver que son bastante parecidos. Para el caso en que se tienen dos sensores y antenas isotrópicas, los diagramas son iguales; del mismo modo ocurre con antenas dipolo. Para el caso en que se tienen 5 sensores y antenas isotrópicas, ha aparecido en este caso un lóbulo para  $\theta = 90^\circ$ , pero los demás

lóbulos principales son muy parecidos; con antenas dipolo, los diagramas son prácticamente iguales. Para 20 sensores, ambos diagramas son muy similares.

Sin embargo, si comparamos los diagramas con los del caso de estudio 2 (sensores con carga al máximo en 3D), es decir, figuras 4.3.2.1 - 4.3.2.6 para 2, 5 y 20 sensores, los diagramas de radiación son muy distintos. En aquel caso, vimos que también eran muy distintos a los diagramas del caso 1 y se concluyó que la causa principal era que los sensores no estaban tan idealmente distribuidos en el espacio, pues pasaban de estar situados en un plano a estar situados en un volumen. Este argumento parece ganar peso a la vista de los resultados de este caso de estudio. Dado que vuelven a estar en 2D y los diagramas son parecidos a los del caso 1 y muy distinto a los del caso 2, que están en 3D, podemos concluir que la posición relativa entre sensores puede llegar a influir mucho en su diagrama de radiación, pues pasar de dos a tres dimensiones hace que aparezcan numerosos lóbulos.

A pesar de todo, vemos que el diagrama de radiación presenta lóbulos principales en la dirección deseada, de modo que el beamforming está actuando adecuadamente.

#### 4.3.3.1 1 cluster

Del mismo modo que en apartados anteriores, se representarán las gráficas que muestran los resultados de eficiencia para distintas cantidades de sensores, antenas y ángulo en los que se desea radiar. La primera de estas gráficas mostrará los resultados para el caso en que los sensores se agrupen en 1 cluster.

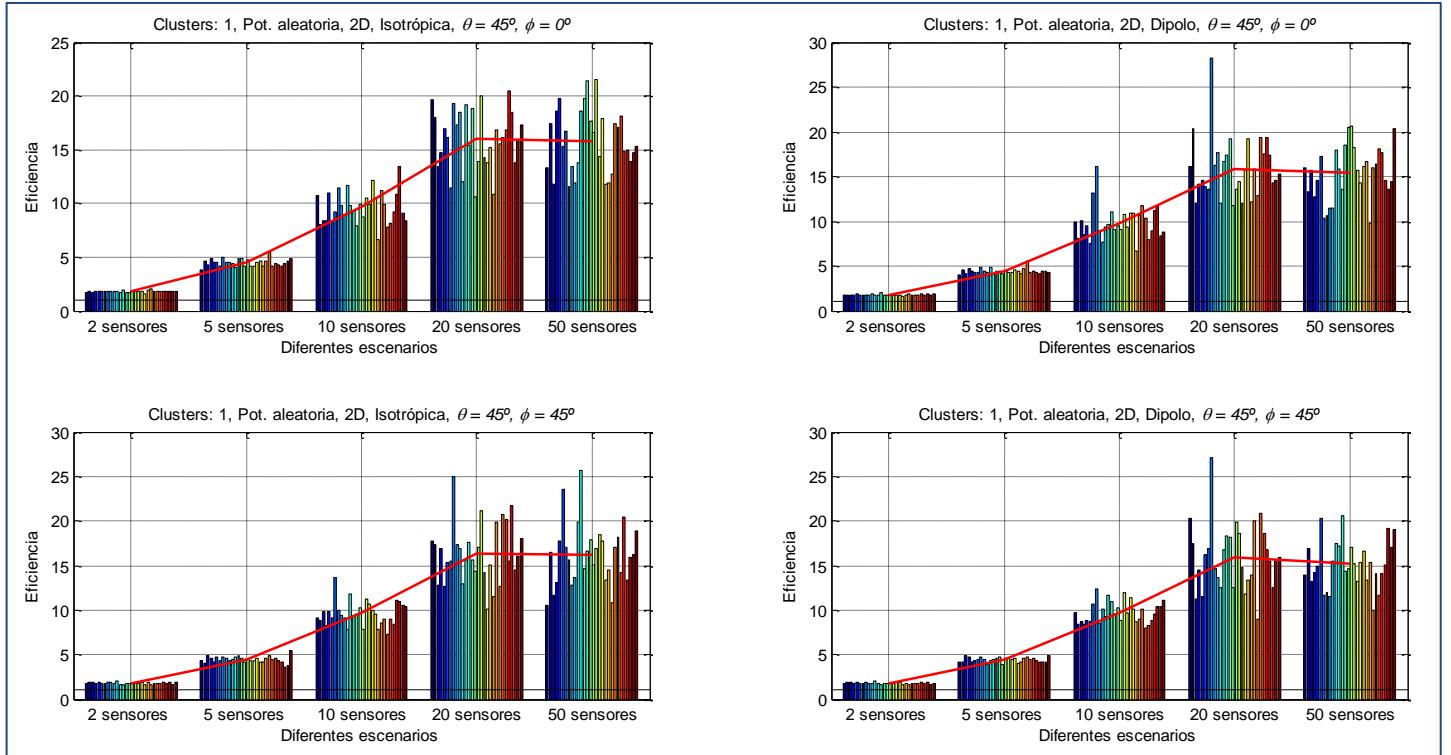


Fig. 4.3.3.7. Caso de estudio 3, clusters: 1. Eficiencia en función de la cantidad de sensores.

Analizando las distintas gráficas, vemos que resulta indistinto el ángulo en que se desee radiar o el tipo de antena usada, pues se obtienen los mismos valores medios en

todos los casos. Vemos que, dado este escenario, conseguimos el objetivo perseguido en este proyecto, es decir, que la eficiencia sea superior a 1. En todos los casos se da este hecho. Así, podemos afirmar que es posible prolongar la vida de los sensores en escenarios en los que los sensores estén situados en un plano y la carga de sus baterías sea distinta.

Para resumir las gráficas, se presentan las mismas tablas que en apartados anteriores.

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
2	1.797	0.082	1.802	0.095	1.803	0.059	1.812	0.096
5	4.477	0.337	4.439	0.357	4.437	0.303	4.429	0.282
10	9.640	1.499	9.637	1.347	9.857	1.862	9.747	1.176
20	16.027	2.745	16.406	3.276	15.913	3.440	15.976	3.673
50	15.813	2.924	16.265	3.415	15.435	2.957	15.158	2.620

Tabla 4.3.3.1. Caso de estudio 3. Clusters: 1.

Nº de sensores	Resultados globales	
	Media	$\sigma$
2	1.803	0.084
5	4.446	0.318
10	9.720	1.476
20	16.080	3.265
50	15.668	2.984

Tabla 4.3.3.2. Caso de estudio 3, resultados globales. Clusters: 1.

Si analizamos las tablas, vemos que en la mayoría de los casos la eficiencia media obtenida con antenas isotrópicas es ligeramente superior que la obtenida con antenas dipolo. Sin embargo, esta diferencia es muy pequeña y los resultados son muy parecidos. Algo destacable es que la dispersión de los datos es bastante elevada con respecto a la de los casos anteriores, incluso la desviación típica para 20 sensores es mayor que para 50 sensores. Este aumento de dispersión probablemente esté debido a que exista gran diferencia entre unas realizaciones y otras, lo cual estará causado por la distinta carga de las baterías (aleatoria en todas las realizaciones).

Al igual que en el primer caso de estudio en el que la eficiencia de 20 sensores se encontraba por encima de la eficiencia de 50 sensores, en este caso este hecho vuelve a ocurrir. La causa probable sería el tiempo que necesitan los sensores para transmitir ( $X \cdot T$ ), que aumenta con la cantidad de sensores pertenecientes al cluster. Las condiciones de aquel caso eran parecidas a este en cuanto a la disposición de los sensores: en ambos casos los sensores están en un plano. Sin embargo, en el caso 2, en el que los sensores estaban distribuidos tridimensionalmente, la eficiencia aumentaba conforme aumentaba la cantidad de sensores. De esta forma, a la espera del análisis del caso de estudio 4, podemos decir que la eficiencia con 20 sensores será mayor que la eficiencia con 50 sensores para aquellos casos en los que estén distribuidos en un plano.

### 4.3.3.2 2 clusters

A continuación, del mismo modo que en apartados anteriores, se estudiarán los resultados obtenidos cuando tengamos un total de 2 clusters, mediante la variable *clusters\_fijos* = 2. Tan solo se realizará el experimento para 10, 20 y 50 sensores, pues carece de sentido fijar 2 clusters para 2 o 5 sensores.

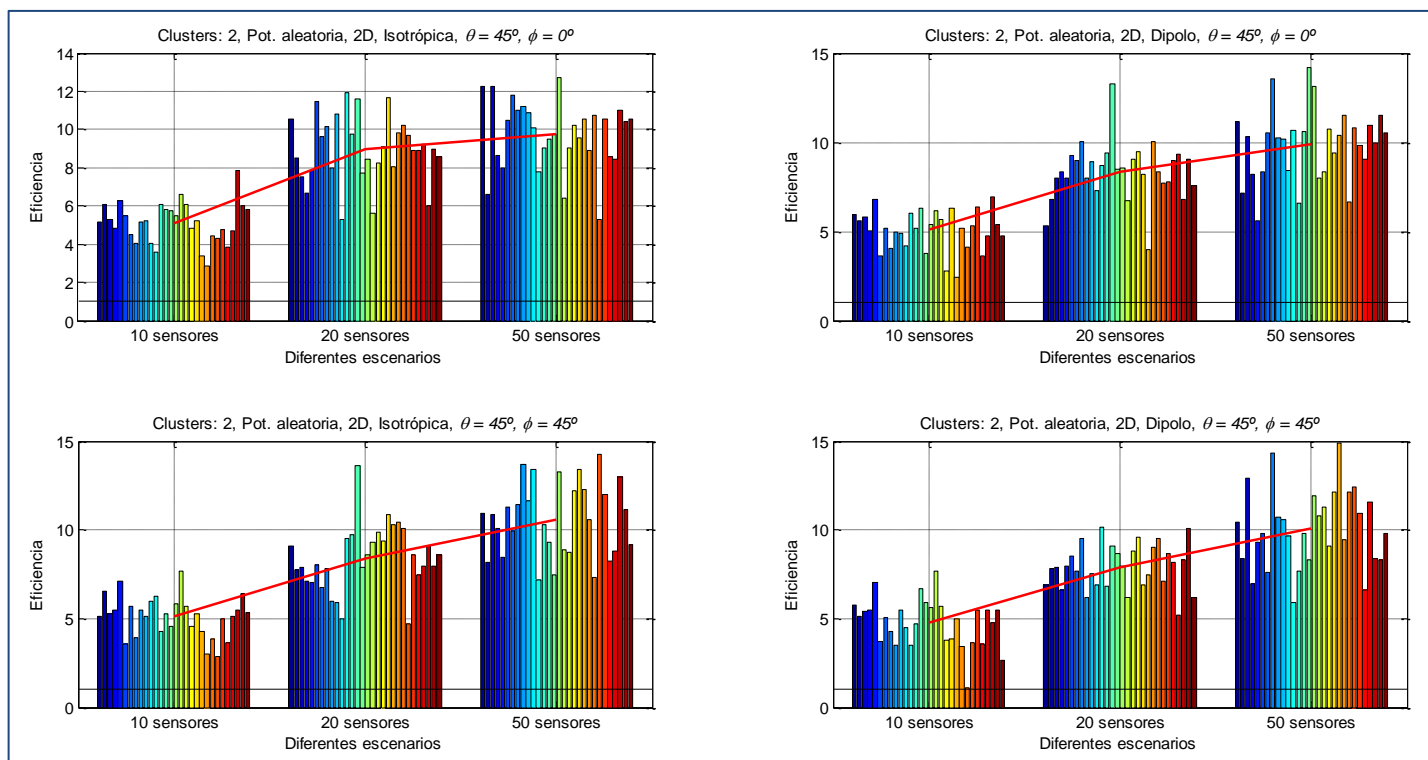


Fig. 4.3.3.8. Caso de estudio 3, clusters: 2. Eficiencia en función de la cantidad de sensores.

Observando las gráficas, vemos que la eficiencia aumenta a medida que aumenta la cantidad de sensores. Veamos las tablas que resumen las gráficas.

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
10	5.117	1.069	5.122	1.124	5.085	1.121	4.776	1.351
20	8.960	1.734	8.412	1.842	8.345	1.601	7.917	1.258
50	9.740	1.763	10.581	2.067	9.887	2.003	10.073	2.178

Tabla 4.3.3.3. Caso de estudio 3. Clusters: 2.

Nº de sensores	Resultados globales 2 clusters		Respecto a 1 cluster	
	Media	$\sigma$	Media	%
10	5.025	1.166	-4.695	-48.303
20	8.409	1.646	-7.672	-47.709
50	10.070	2.009	-5.597	-35.724

Tabla 4.3.3.4. Caso de estudio 3. Clusters: 2.

Al igual que con 1 cluster, en la mayoría de casos, la eficiencia para antenas isotrópicas es algo mayor que para antenas dipolo, aunque la diferencia es bastante reducida.

Con 1 cluster, la eficiencia para 50 sensores se encontraba por debajo de la eficiencia obtenida para 20 sensores. Sin embargo, al dividir los sensores en 2 clusters distintos, la eficiencia obtenida con 50 sensores se encuentra por encima de la de 20 sensores. A pesar de todo, con 2 clusters, la eficiencia para 10 y 20 sensores se ha reducido en más del 45% y la eficiencia para 50 sensores se ha reducido en un 50%. De este modo, resulta inviable dividir los sensores en 2 clusters mediante el algoritmo implementado, pues la eficiencia se reduce mucho.

De la misma forma que en apartados anteriores, cabría esperar que la eficiencia con 20 sensores y 2 clusters sea parecida a la eficiencia con 10 sensores y 1 cluster. En la siguiente figura, se representa el efecto que cabría esperar y el resultado obtenido.

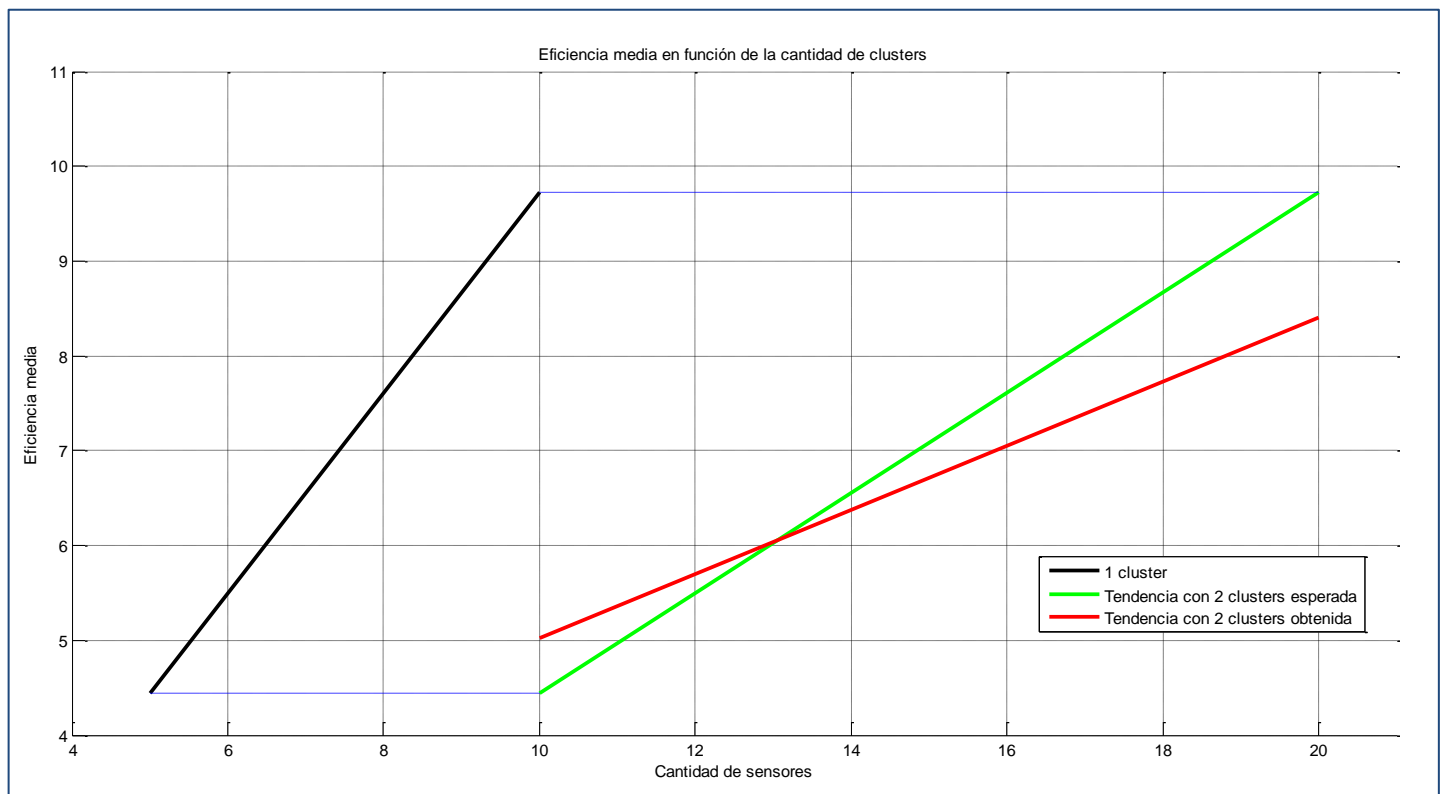


Fig. 4.3.3.9. Caso de estudio 3. Eficiencia media en función de la cantidad de clusters (comparativa).

De manera contraria a la de los apartados anteriores, vemos que la tendencia con 2 clusters obtenida (línea roja) supera para el caso de 10 sensores a la tendencia con 2 clusters esperada (línea verde), lo cual indicaría que el algoritmo de división en clusters funciona correctamente. Sin embargo, para 20 sensores, se reproduce el mismo efecto que en los casos anteriores.

La causa más probable de este hecho es que la carga de los sensores es distinta y esto hace que la eficiencia pueda aumentar. En el siguiente caso de estudio, veremos si ocurre lo mismo.

### 4.3.3.3 3 clusters

A continuación, se establece la variable *clusters\_fijos* = 3, de modo que ahora tendremos 3 clusters, y se analizan los resultados obtenidos.

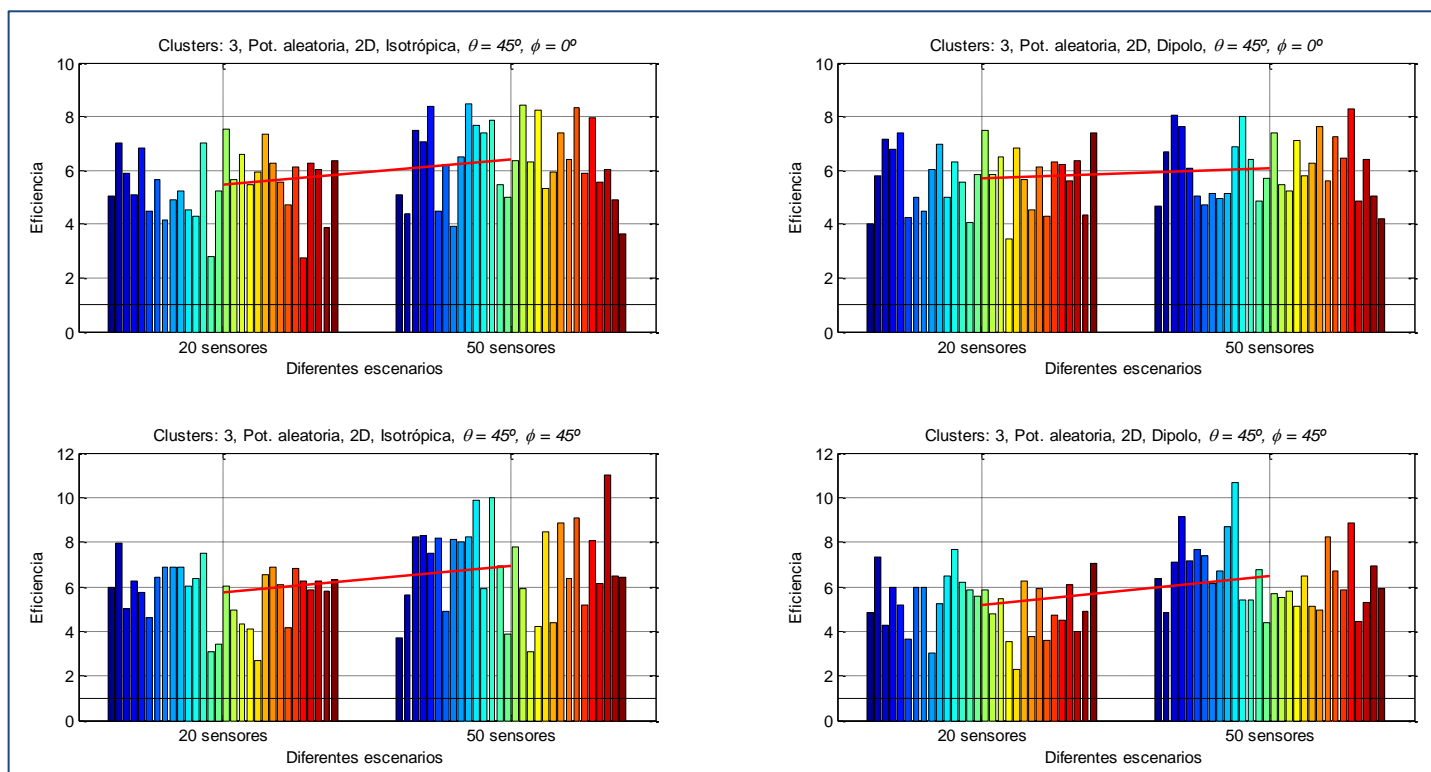


Fig. 4.3.3.10. Caso de estudio 3, clusters: 3. Eficiencia en función de la cantidad de sensores.

Ahora, se presentarán las tablas que resumen estas gráficas.

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
20	5.489	1.207	5.738	1.297	5.721	1.145	5.196	1.294
50	6.409	1.432	6.960	2.013	6.099	1.174	6.487	1.502

Tabla 4.3.3.5. Caso de estudio 3. Clusters: 3.

Nº de sensores	Resultados globales 3 clusters		Respecto a 1 cluster	
	Media	$\sigma$	Media	%
	Media	$\sigma$	Media	%
20	5.536	1.242	-10.545	-65.574
50	6.489	1.571	-9.179	-58.584

Tabla 4.3.3.6. Caso de estudio 3, resultados globales. Clusters: 3.

A la vista de estas tablas, cabe destacar lo mucho que se reduce la eficiencia con respecto a los resultados obtenidos para 1 cluster: un 58% para 50 sensores y un 65% para 20 sensores. A pesar de ello, la eficiencia con 50 sensores vuelve a ser superior que con 20 sensores. De este modo, vemos que no es una buena alternativa dividir los sensores en 3 clusters.

#### 4.3.3.4 Cantidad de clusters optimizada

Finalmente, a continuación se estudiará qué ocurre si permitimos que el algoritmo decida la cantidad de clusters óptima para obtener los mejores resultados en términos de eficiencia. Al igual que en apartados anteriores, se mostrarán dos figuras con las gráficas obtenidas, una para  $\theta = 45^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$  y otra para  $\theta = 45^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ , para 10, 20 y 50 sensores, dado que no tendría sentido dividir en clusters 2 y 5 sensores.

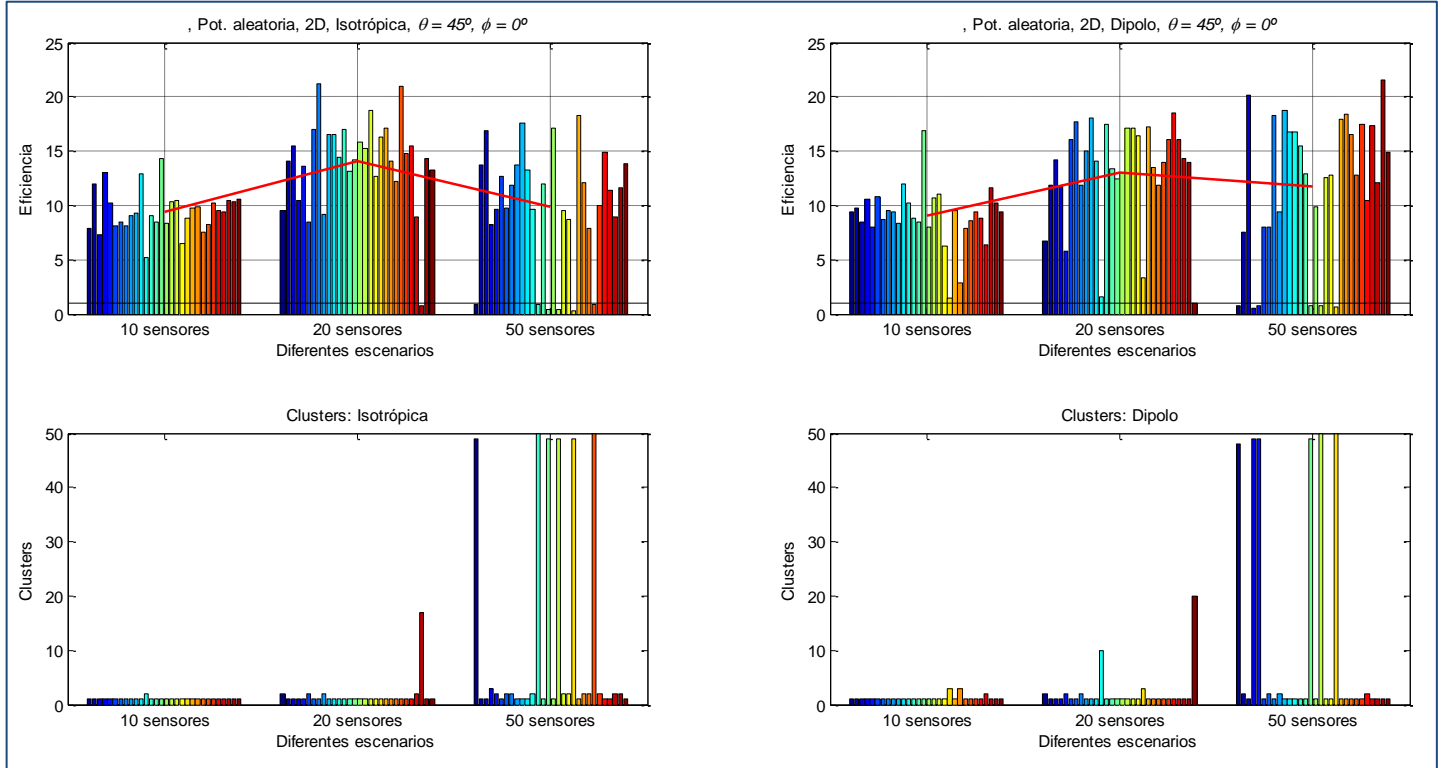


Fig. 4.3.3.11. Caso de estudio 3, clusters: optimizados. Eficiencia en función de la cantidad de sensores (1).



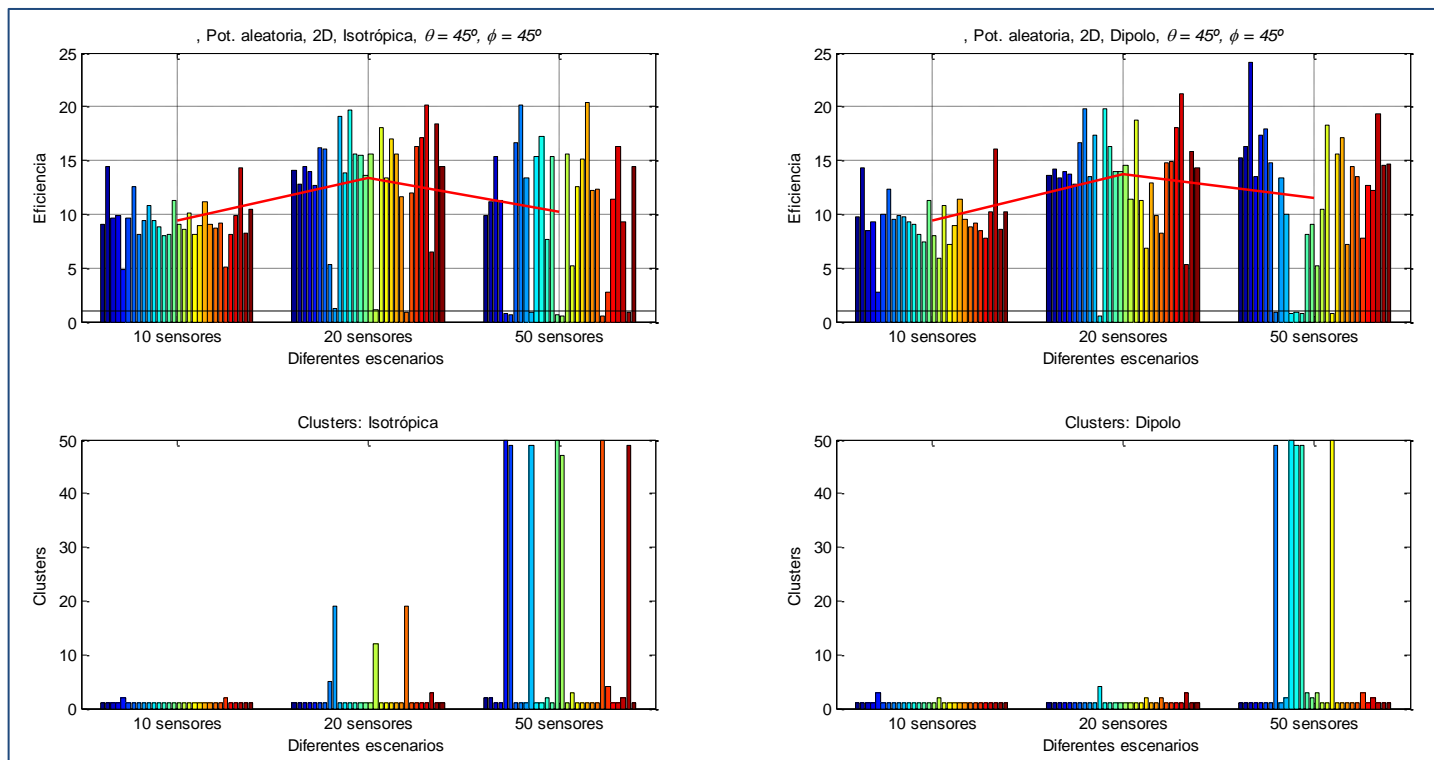


Fig. 4.3.3.12. Caso de estudio 3, clusters: optimizados. Eficiencia en función de la cantidad de sensores (1).

Las tablas obtenidas a partir de las gráficas se muestran a continuación.

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
10	9.456	1.933	9.432	2.048	9.040	2.692	9.396	2.376
20	14.041	4.041	13.404	5.299	13.041	4.785	13.720	4.397
50	9.892	5.467	10.193	6.516	11.699	6.679	11.561	6.289

Tabla 4.3.3.7. Caso de estudio 3. Clusters: optimizados.

Nº de sensores	Resultados globales clusters optimizados		Respecto a 1 cluster			
	Media	$\sigma$	Media	% (media)	$\sigma$	% ( $\sigma$ )
10	9.331	2.259	-0.389	-4.001	+0.783	+53.0
20	13.551	4.610	-2.529	-15.727	+1.345	+41.2
50	10.836	6.228	-4.831	-30.837	+3.244	+108.7

Tabla 4.3.3.8. Caso de estudio 3, resultados globales. Clusters: optimizados.

Analizando las gráficas 4.3.3.11 y 4.3.3.12, vemos que la cantidad de clusters óptima que el algoritmo considera conveniente es 1 solo cluster en la mayoría de los casos. En algunos de ellos, considera más de uno. Viendo la tabla 4.3.3.8, podemos darnos cuenta de que lo óptimo sería dejar esos 10 sensores en un cluster, pues la eficiencia se reduce en un 4%. De hecho, vemos que justo en las realizaciones en las que la cantidad de clusters no es 1, la eficiencia se reduce.

En cuanto a 20 y 50 sensores, en algunas de las realizaciones, el algoritmo optimiza la cantidad de clusters hasta tener prácticamente la misma cantidad de sensores que de clusters. Obviamente, esto hace que la eficiencia se reduzca, incluso por debajo de la unidad. Este mismo hecho se producía también en los casos de estudio anteriores.

La causa por la cual el algoritmo no divide correctamente los sensores en los clusters más apropiados ya se comentó en apartados anteriores: el peso de la variable que controla la cantidad de clusters en la optimización se reduce conforme aumenta la cantidad de sensores.

#### 4.3.3.5 Comparativa en función de la cantidad de clusters

De nuevo, al igual que en los casos de estudio 1 y 2, se llevará a cabo una comparativa de la eficiencia en función del número de clusters y la cantidad de sensores. Los resultados se muestran en la siguiente figura.

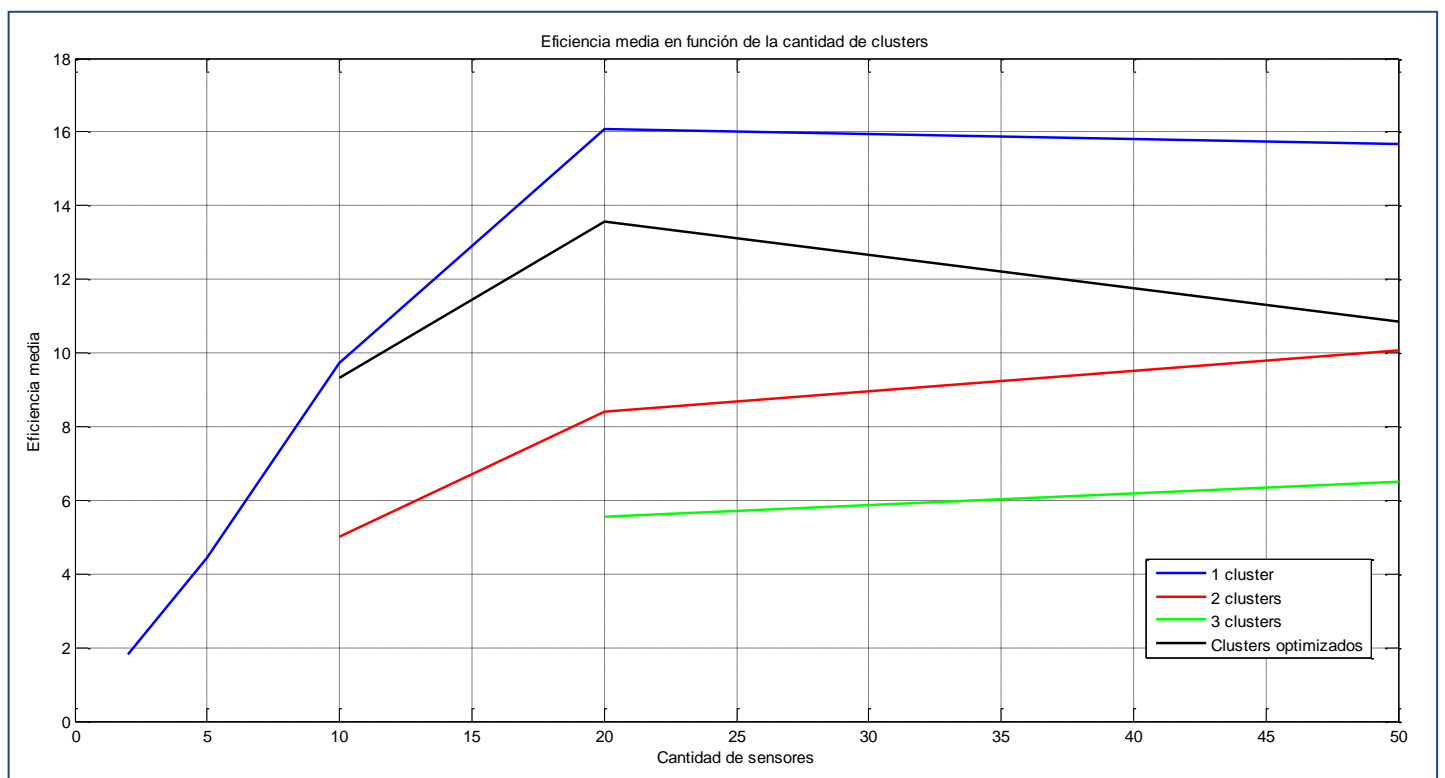


Fig. 4.3.3.13. Caso de estudio 3. Eficiencia para 1, 2, 3 clusters y clusters optimizados (comparativa).

Como vemos, la eficiencia obtenida cuando se agrupan todos los sensores en 1 cluster es claramente superior a la obtenida a cuando se divide en varios clusters. Cuando se dividen en 2 y 3 clusters, la eficiencia se ve reducida significativamente. Usar clusters optimizados hace que se reduzca la eficiencia, de modo que podemos afirmar que el algoritmo no actúa adecuadamente a la hora de optimizar la cantidad de clusters. En los distintos casos de estudio se ha comentado la causa de este problema es que el peso de la variable que controla la cantidad de clusters se reduce a medida que aumenta la cantidad de sensores. Por ello, para 10 sensores, por ejemplo, la eficiencia se reduce ligeramente, mientras que para 20 y 50 sensores esta reducción es mucho mayor.

Al igual que en el caso de estudio 1, la eficiencia para 50 sensores se ha reducido con respecto a la de 20 sensores. La principal similitud con respecto a ese caso es que los escenarios están en 2D. En el caso de estudio 2, el escenario está en 3D y la eficiencia para 50 sensores era mayor que para 20 sensores.

En conclusión, en este caso de estudio en el que se considera que la carga de la batería de los sensores es distinta para cada uno de ellos y se encuentran colocados aleatoriamente en un plano, el tiempo de vida de las baterías cuando se distribuyen todos los sensores en un solo cluster se puede llegar a prolongar hasta 16 veces más que los tiempos de vida de los sensores que no usen la tecnología presentada en este proyecto.

#### 4.3.4 Caso de estudio 4

En este cuarto caso de estudio, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Sensores con posiciones aleatorias fijas.
- Tres dimensiones.
- Carga de batería aleatoria para todos los sensores.
- Antenas isotrópicas. Antenas dipolo.
- $\varphi = 0^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ .  $\theta = 45^\circ$ .
- Cantidad de sensores: 2, 5, 10, 20, 50.

En este caso, al contrario que en los demás, se considera un escenario tridimensional y carga de las baterías aleatoria para todos los sensores. Recordemos que en los dos primeros casos se consideraba un escenario en el cual la carga de la batería de los sensores era la máxima y era la misma para todos, para dos y tres dimensiones, y el tercer caso de estudio era un escenario bidimensional con carga de la batería aleatoria.

Al igual que en el apartado anterior, la carga de la batería será aleatoria (variable aleatoria uniforme) en el intervalo  $[0.2, 1]$ , con media igual a 0.6. Este escenario pretende presentar el caso más realista que se encuentra en la realidad, con todos los sensores distribuidos en un espacio tridimensional, con cargas de la batería que no tienen por qué ser todas iguales ni estar al máximo.

En los casos en los que se tenían escenarios en 2D, los diagramas de radiación tenían pocos lóbulos y muy anchos. En el diagrama de radiación del escenario en 3D, vimos que aparecían múltiples lóbulos secundarios, aunque el lóbulo principal siempre apuntaba en la dirección en la que se deseaba radiar. Veamos los diagramas de radiación de este caso para 2, 5 y 20 sensores.

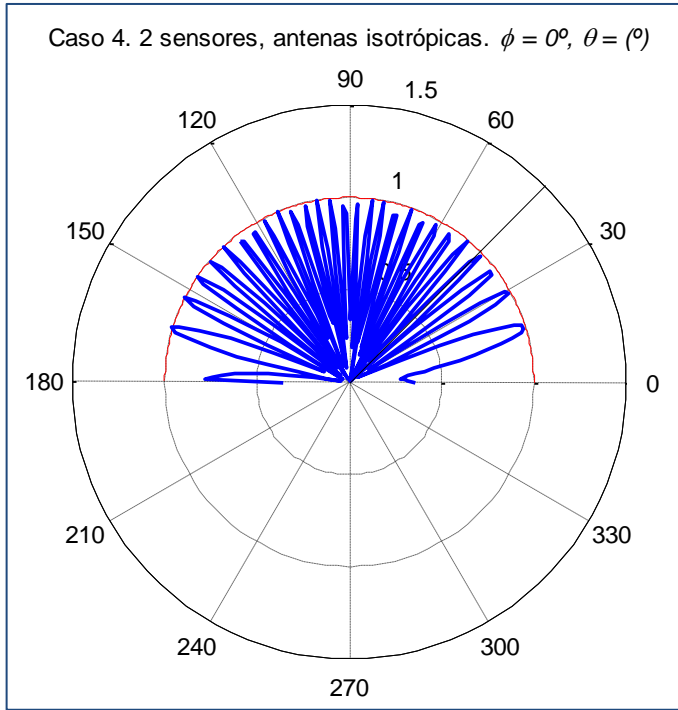


Fig. 4.3.4.1. Caso 4, 2 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

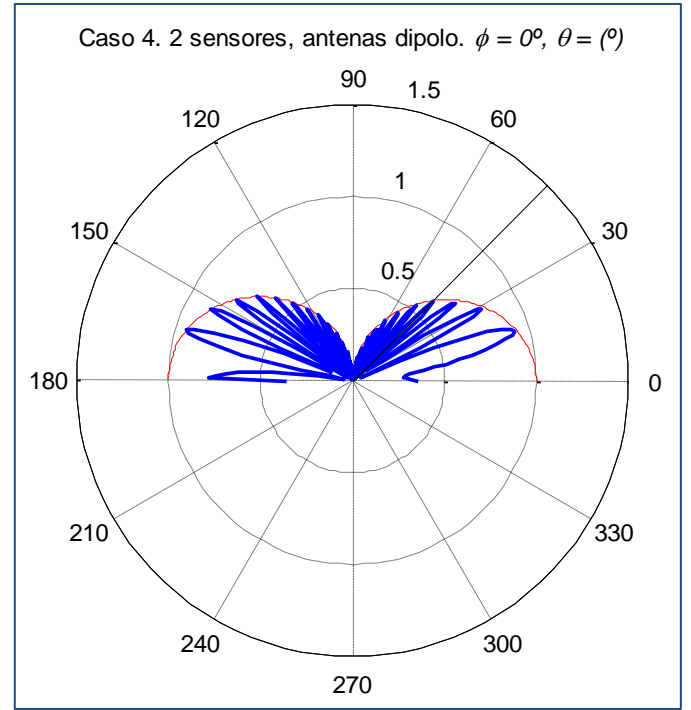


Fig. 4.3.4.2. Caso 4, 2 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

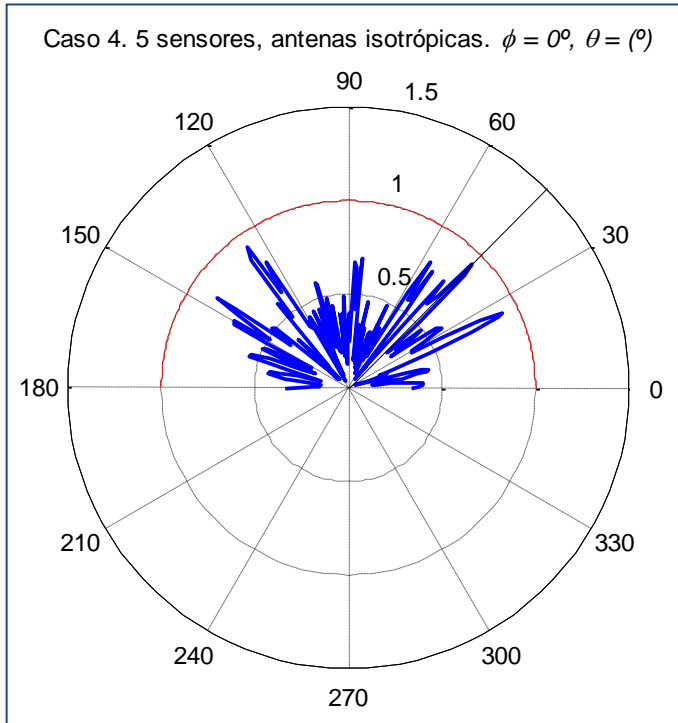


Fig. 4.3.4.3. Caso 4, 5 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

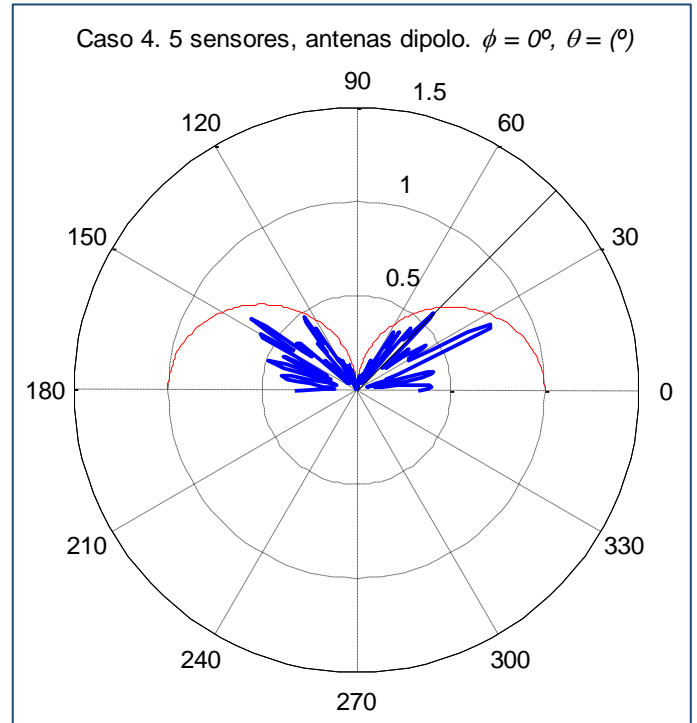


Fig. 4.3.4.4. Caso 4, 5 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

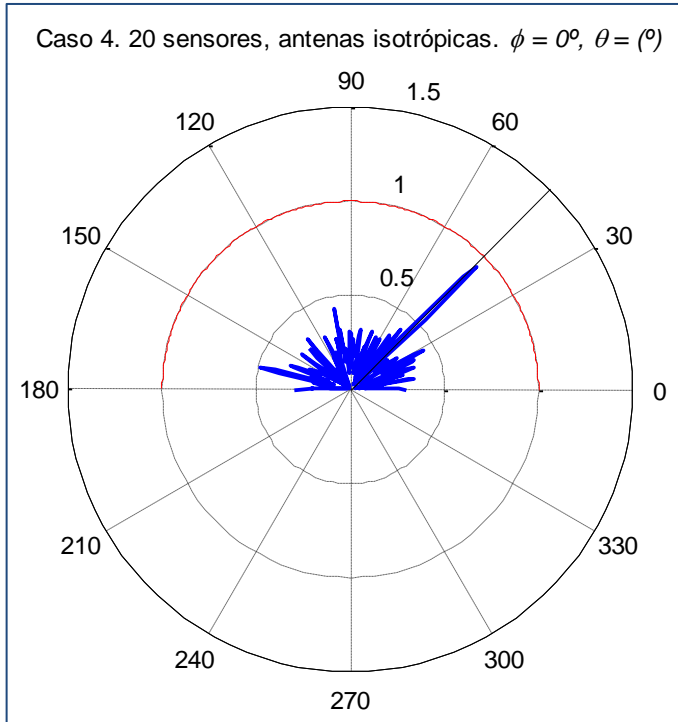


Fig. 4.3.4.3. Caso 4, 20 sensores, antenas isotrópicas.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

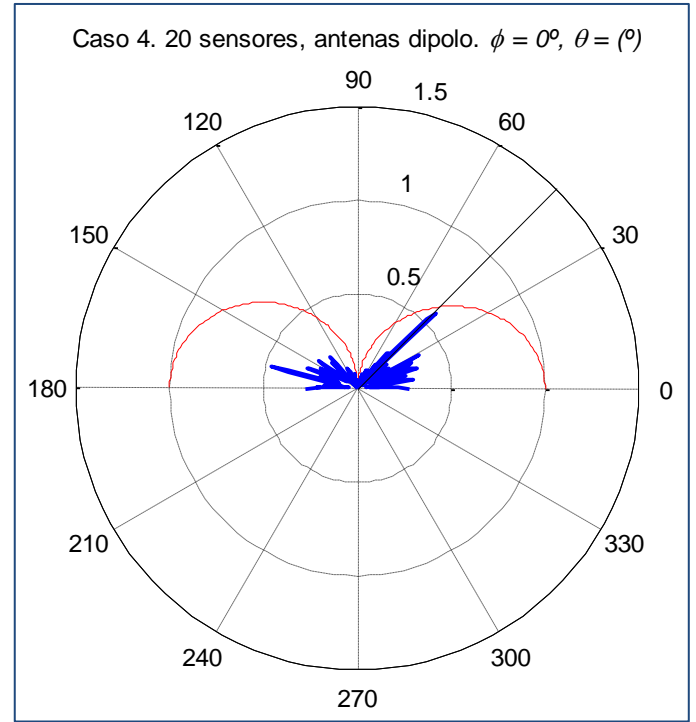
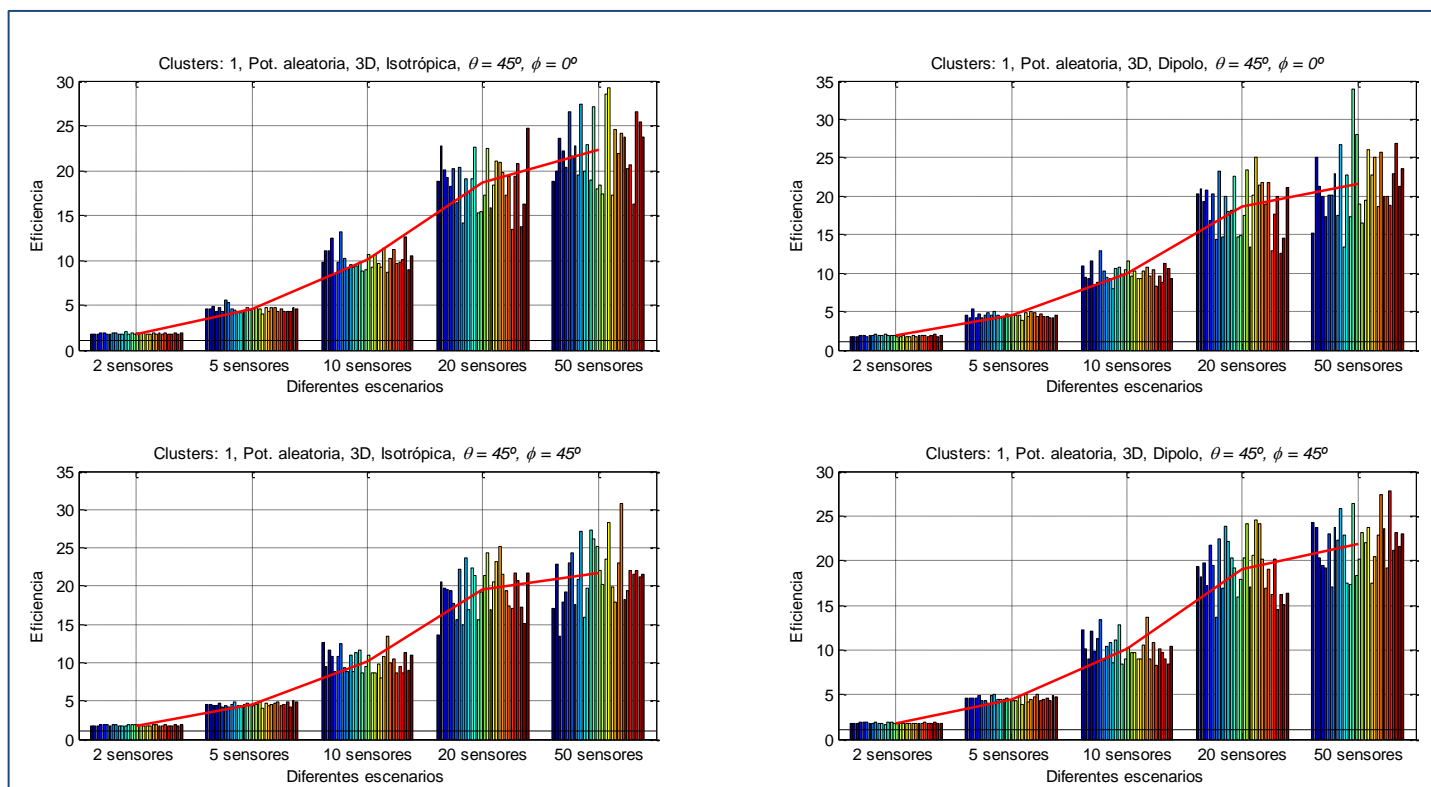


Fig. 4.3.4.4. Caso 4, 20 sensores, antenas dipolo.  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = (^\circ)$

Como vemos, vuelve a suceder que en los diagramas de radiación aparezcan muchos lóbulos. De este modo, afirmamos la conclusión extraída en el tercer caso de estudio, es decir: si los sensores se sitúan en un plano, el diagrama de radiación tendrá pocos lóbulos y muy anchos, mientras que se sitúan en un espacio tridimensional, el diagrama de radiación presentará muchos lóbulos estrechos. Sin embargo, a modo de resumen, hemos visto que a pesar de las diferencias que existen entre los diagramas de radiación, se ha conseguido mediante el algoritmo implementado que todos apunten en la dirección deseada, lo cual es bastante destacable, pues nos podrá permitir conseguir el objetivo del proyecto.

#### 4.3.4.1 1 cluster

Al igual que en apartados anteriores, se representarán las gráficas que muestran los resultados obtenidos al llevar a cabo las 600 realizaciones del experimento cuando se fija la variable *clusters\_fijados* = 1. La figura siguiente muestra dichas gráficas.



Como vemos, en todas las realizaciones se ha conseguido superar el valor de eficiencia unidad, de forma que se consigue el objetivo de este proyecto. Veamos las tablas que resumen estas gráficas.

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
2	1.823	0.054	1.808	0.056	1.832	0.099	1.809	0.067
5	4.550	0.302	4.518	0.245	4.516	0.314	4.525	0.279
10	10.098	1.175	10.155	1.412	9.952	1.087	10.176	1.471
20	18.669	2.794	19.540	3.020	18.706	3.410	19.104	2.988
50	22.254	3.572	21.657	3.888	21.605	4.340	21.931	2.942

Tabla 4.3.4.1. Caso de estudio 4. Clusters: 1.

Nº de sensores	Resultados globales	
	Media	$\sigma$
2	1.818	0.071
5	4.527	0.283
10	10.095	1.283
20	19.005	3.043
50	21.862	3.682

Tabla 4.3.4.2. Caso de estudio 4, resultados globales. Clusters: 1.

Analizando la tabla 4.3.4.1, vemos que las eficiencias obtenidas para antenas isotrópicas y para antenas dipolo son bastante semejantes. Si analizamos la tabla 4.3.4.2, vemos que la eficiencia obtenida para 50 sensores es superior a la obtenida para 20 sensores, al igual que en el caso de estudio 2 y al contrario de lo que ocurría en los casos

de estudio 1 y 3. En esos dos casos, los sensores se encontraban en un plano y en los casos 2 y 4 los sensores se encuentran en un espacio tridimensional. Como ya se ha comentado en apartados anteriores, lo lógico es que la eficiencia aumentara a medida que aumenta la cantidad de sensores que usan beamforming; sin embargo, vemos que cuando los sensores se sitúan en un plano, parece existir algún límite en el que la eficiencia deja de crecer en función del número de sensores. Este hecho se comentará en profundidad en el apartado “4.3.7 Explicación al efecto observado en los casos de estudio en 2D”.

Del mismo modo, parece no existir límite alguno (a la vista de los resultados obtenidos hasta ahora) en la eficiencia cuando se tienen gran cantidad de sensores en 3D, pues según los casos estudiados con escenarios tridimensionales, la eficiencia para 50 sensores es siempre la mayor y la eficiencia ha aumentado a medida que aumentaba la cantidad de sensores.

#### 4.3.4.2 2 clusters

A continuación, se desea estudiar el efecto que producirá en la eficiencia dividir los sensores en 2 clusters independientes, con la variable *clusters\_fijados* = 2, tan solo para 10, 20 y 50 sensores.

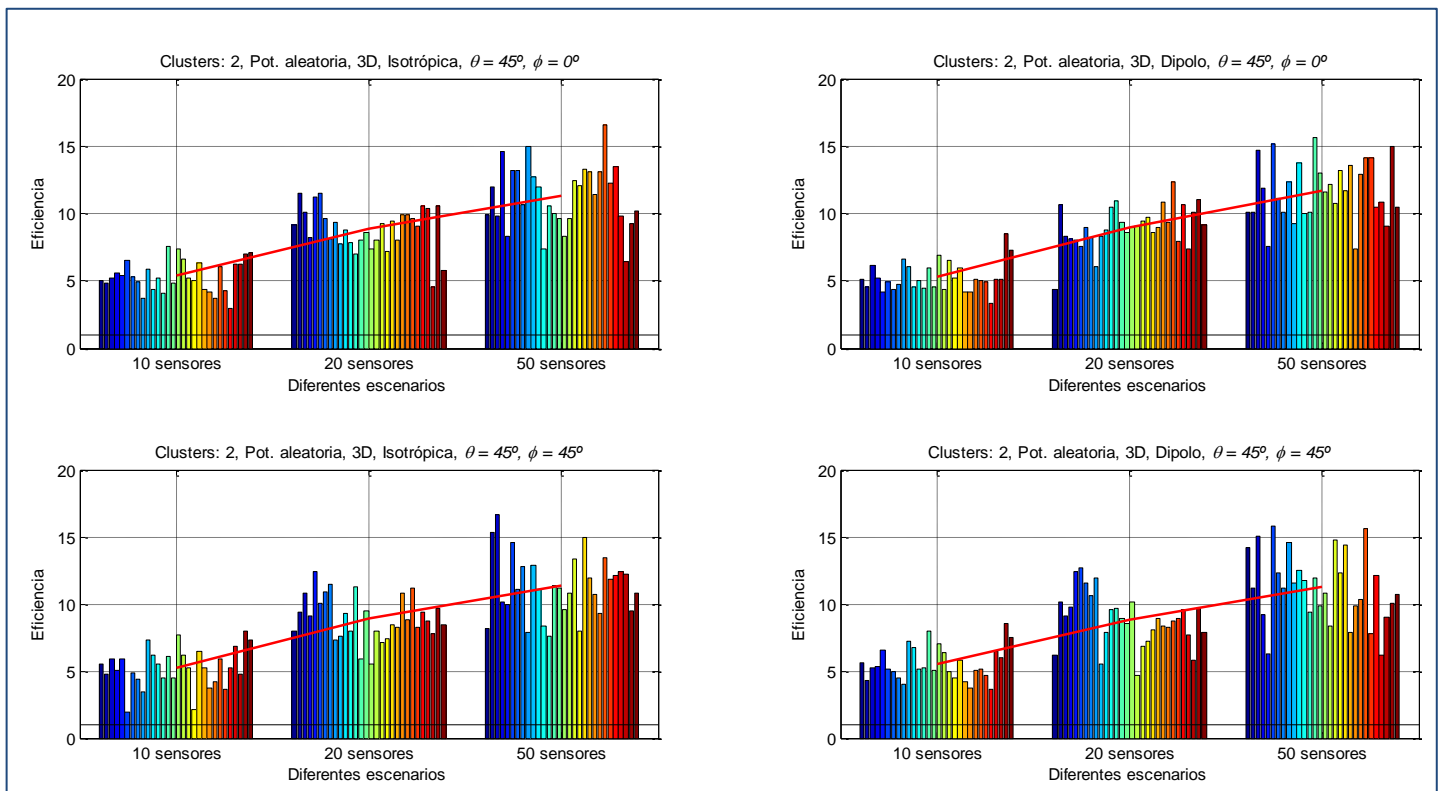


Fig. 4.3.4.8. Caso de estudio 4, clusters: 2. Eficiencia en función de la cantidad de sensores.

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
10	5.379	1.159	5.280	1.464	5.275	1.094	5.539	1.261
20	8.877	1.619	8.947	1.639	9.012	1.572	8.833	1.948

<b>50</b>	11.332	2.323	11.325	2.323	11.734	2.190	11.233	2.643
-----------	--------	-------	--------	-------	--------	-------	--------	-------

Tabla 4.3.4.3. Caso de estudio 4. Clusters: 2.

N° de sensores	Resultados globales 2 clusters		Respecto a 1 cluster	
	Media	$\sigma$	Media	%
<b>10</b>	5.368	1.241	-4.727	-46.824
<b>20</b>	8.917	1.681	-10.087	-53.079
<b>50</b>	11.406	2.353	-10.456	-47.827

Tabla 4.3.4.4. Caso de estudio 4, resultados globales. Clusters: 2.

Al igual que en los casos de estudio anteriores, vemos que utilizar 2 clusters en lugar de 1 perjudica los resultados de eficiencia. Para 10, 20 y 50 sensores, la eficiencia se reduce en un 50%, aproximadamente. A continuación, mostramos el efecto esperado al usar 2 clusters y 10 sensores y 2 clusters y 20 sensores, junto con 1 cluster y 5 sensores y 1 cluster y 10 sensores, al igual que en los casos anteriores.

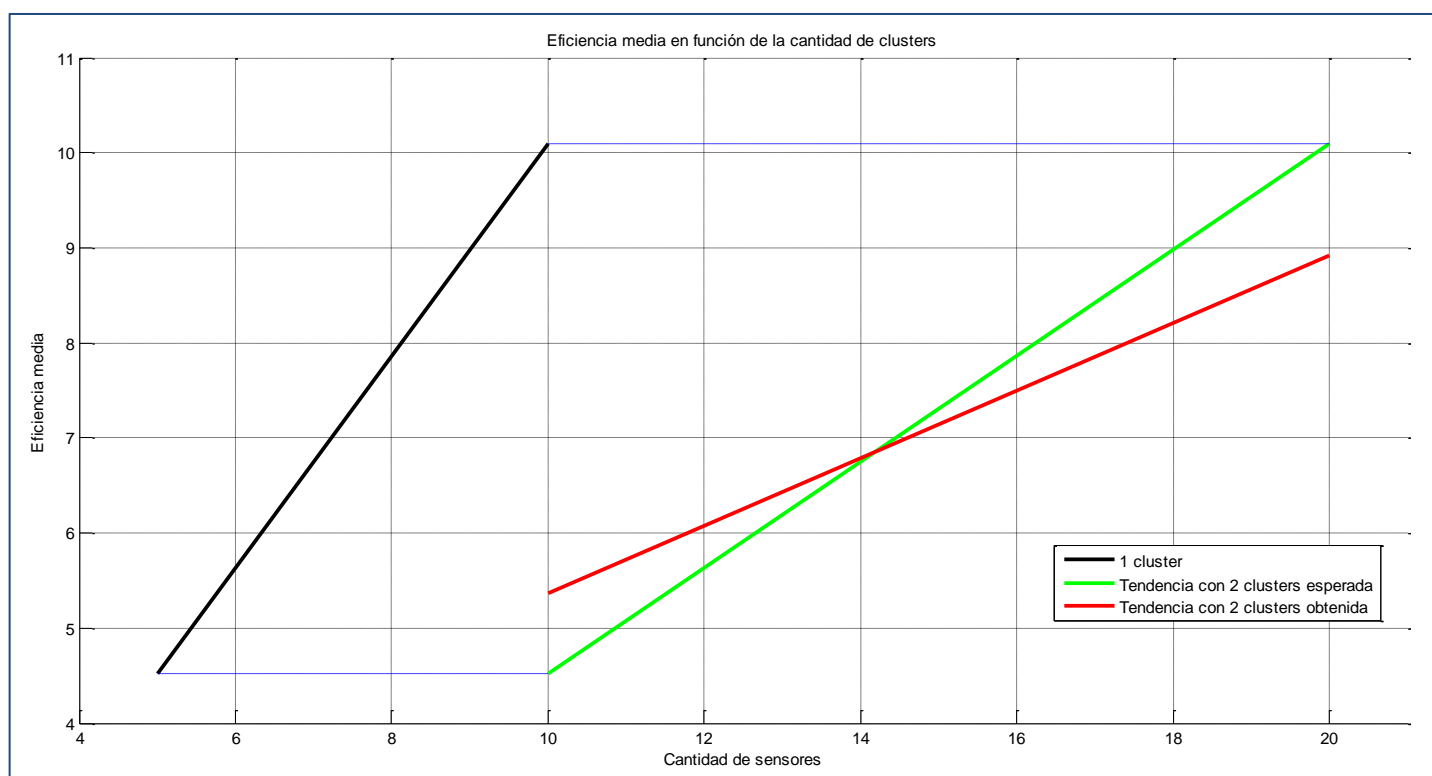


Fig. 4.3.4.9. Caso de estudio 4. Eficiencia media en función de la cantidad de clusters (comparativa).

Como vemos, la eficiencia con 2 clusters y 10 sensores es superior que la eficiencia con 1 cluster y 5 sensores. Sin embargo, esto no ocurre para 2 clusters y 20 sensores, pues la eficiencia es menor que para 1 cluster y 10 sensores. Este mismo hecho ocurría en el caso de estudio 3, pero no ocurría en los casos de estudio 1 y 2 (carga máxima para todos los sensores). En esos dos casos, la eficiencia con 2 clusters siempre estaba por debajo de la eficiencia con 1 cluster.



Así pues, podemos concluir que si se tiene un escenario en el que la carga de las baterías no sea la misma para todos los sensores, si se desean establecer 2 clusters y 10 sensores, será una mejor alternativa que establecer 1 cluster y 5 sensores.

#### 4.3.4.3 3 clusters

En este apartado, estudiaremos la eficiencia en caso de que los sensores del escenario se dividan en 3 clusters distintos

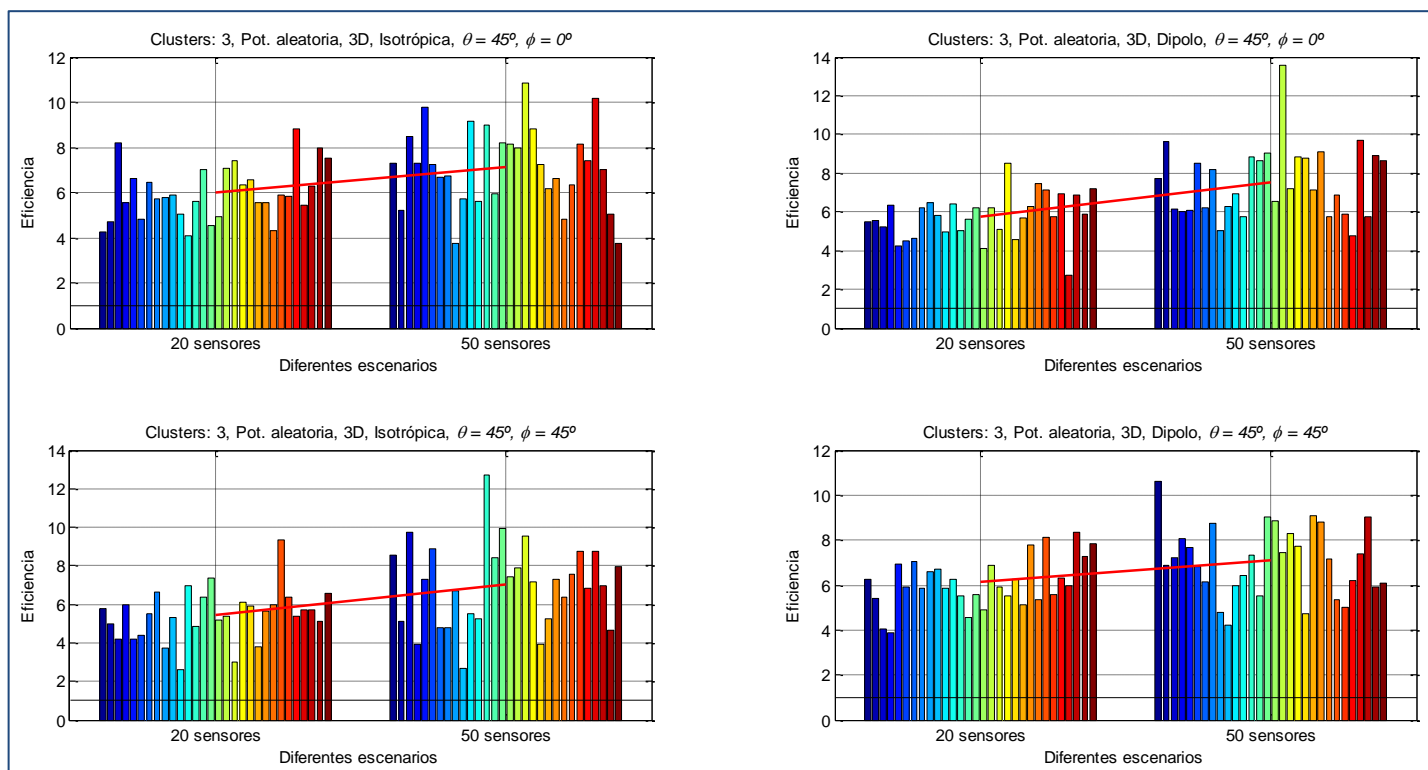


Fig. 4.3.4.10. Caso de estudio 4, clusters: 3. Eficiencia en función de la cantidad de sensores.

Las tablas que resumen las gráficas se presentan a continuación.

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
20	5.993	1.209	5.466	1.340	5.769	1.178	6.119	1.109
50	7.150	1.764	7.025	2.172	7.545	1.850	7.085	1.565

Tabla 4.3.4.5. Caso de estudio 4. Clusters: 3.

Nº de sensores	Resultados globales 3 clusters		Respecto a 1 cluster	
	Media	$\sigma$	Media	%
20	5.837	1.222	-13.168	-69.288
50	7.201	1.839	-14.661	-67.060

Tabla 4.3.4.6. Caso de estudio 4, resultados globales. Clusters: 3.

De nuevo, al igual que en todos los casos de estudio, no resulta productivo dividir los sensores en 3 clusters, pues la eficiencia se reduce en casi un 70%. Así pues, se concluye que no es conveniente establecer en 3 la cantidad de clusters en ninguno de los casos de estudio presentados hasta ahora.

#### 4.3.4.4 Cantidad de clusters optimizada

A continuación, estableceremos la variable *clusters\_fijados* = 0 para permitir que el algoritmo optimice la cantidad de clusters necesaria en cada realización para 10, 20 y 50 sensores.

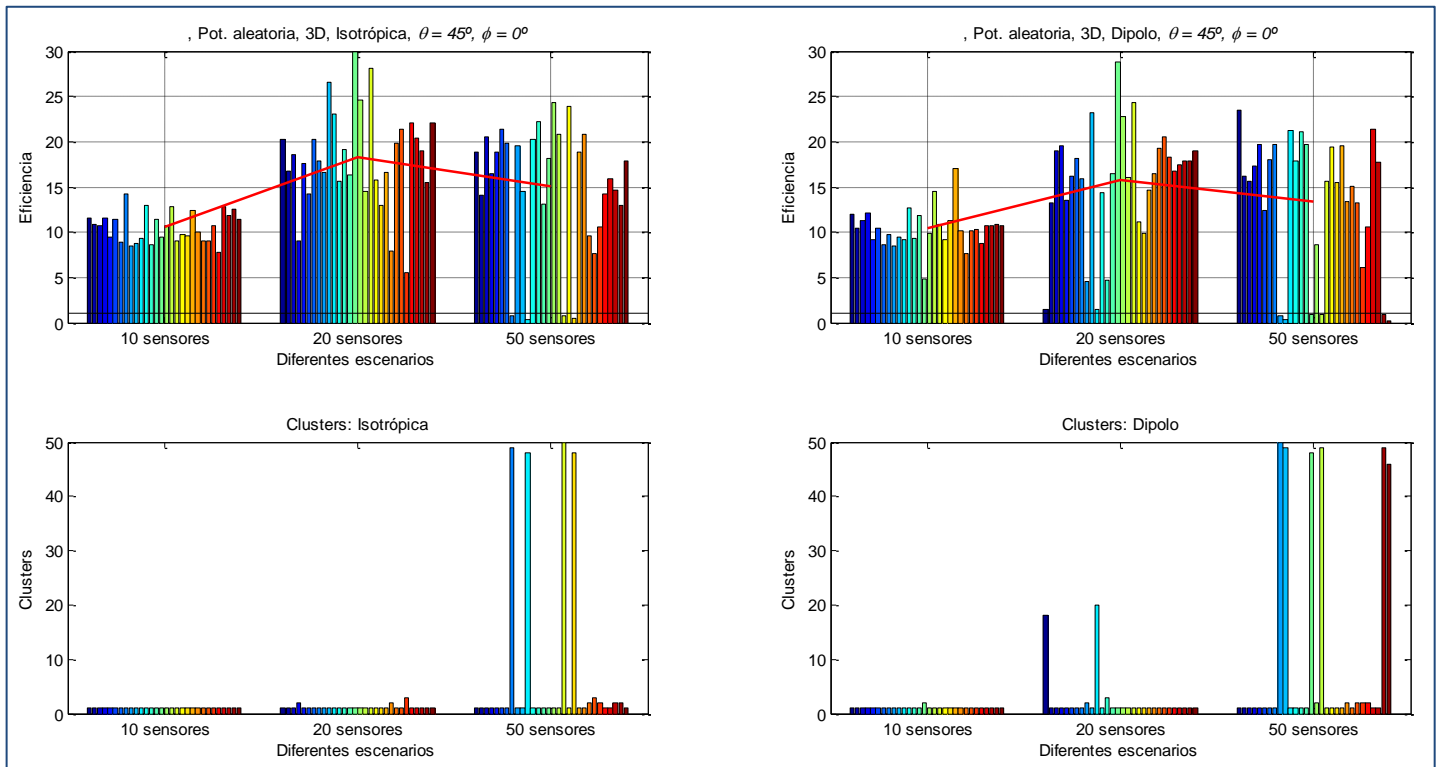


Fig. 4.3.4.11. Caso de estudio 4, clusters: optimizados. Eficiencia en función de la cantidad de sensores (1).

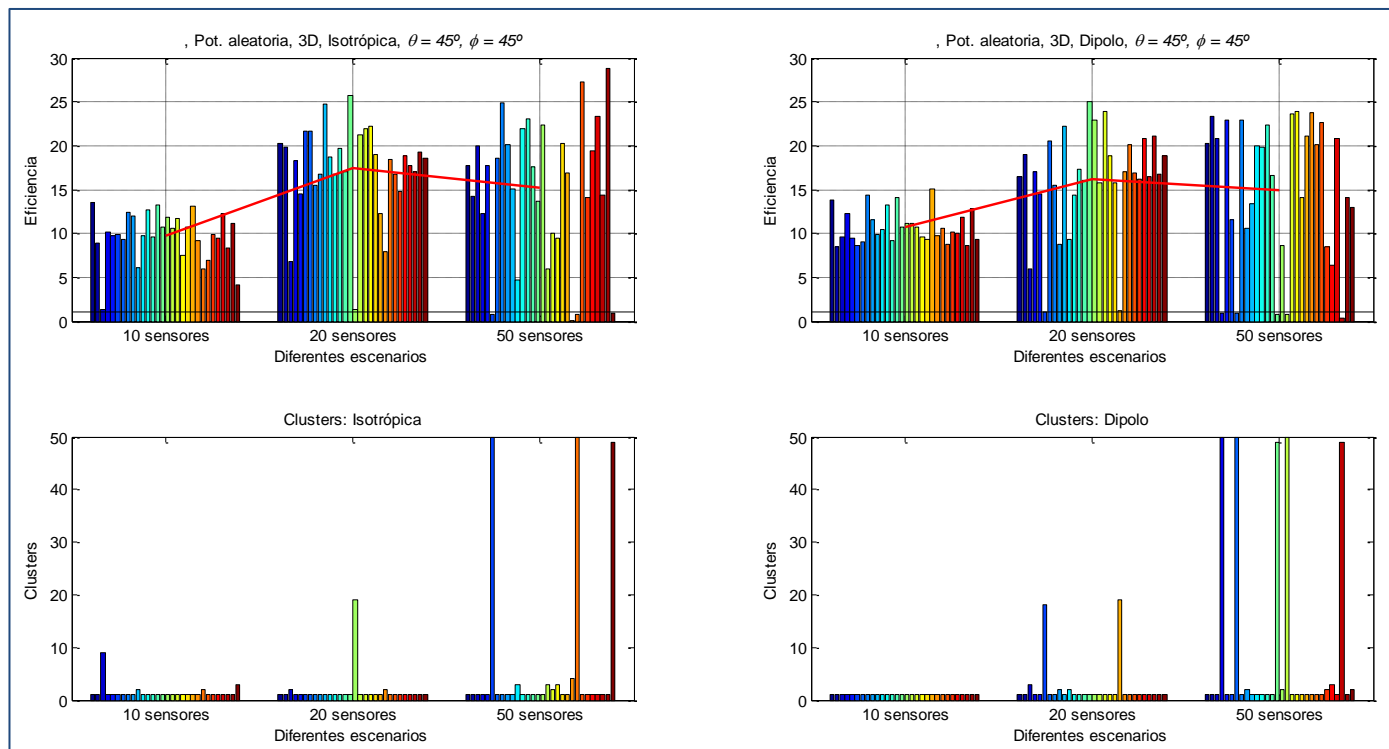


Fig. 4.3.4.12. Caso de estudio 4, clusters: optimizados. Eficiencia en función de la cantidad de sensores (1).

Nº de sensores	Eficiencia, antenas isotrópicas				Eficiencia, antenas dipolo			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 0$		$\varphi = 45^\circ$	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
10	10.576	1.634	9.732	2.774	10.414	2.132	10.783	1.862
20	18.272	5.462	17.501	5.123	15.772	6.359	16.190	5.864
50	15.074	7.046	15.222	8.072	13.410	7.512	14.975	8.215

Tabla 4.3.4.7. Caso de estudio 4. Clusters: optimizados.

Nº de sensores	Resultados globales clusters optimizados		Respecto a 1 cluster			
	Media	$\sigma$	Media	% (media)	$\sigma$	% ( $\sigma$ )
10	10.376	2.153	+0.281	+2.782	+0.871	+67.9
20	16.934	5.737	-2.071	-10.897	+2.694	+88.5
50	14.670	7.663	-7.192	-32.896	+3.980	+108.1

Tabla 4.3.4.8. Caso de estudio 4, resultados globales. Clusters: optimizados.

Si analizamos las tablas 4.3.4.11 y 4.3.4.12, apreciamos perfectamente que en la gran mayoría de las realizaciones, la cantidad óptima de clusters es 1. Para 10 y 20 sensores, en algunos casos, la cantidad es mayor. Para 50 sensores, en algunas realizaciones, la cantidad óptima es de hasta 50 sensores, algo inviable, pues se reduce la eficiencia incluso por debajo de la unidad. En cualquier caso, podemos ver que cuando la cantidad de clusters es superior a 1, la eficiencia se reduce en todos ellos.

Analizando la tabla 4.3.4.8, para 10 sensores, vemos que el algoritmo ha conseguido aumentar la eficiencia con respecto a 1 cluster. Sin embargo, esto choca con que haya casos en los que la eficiencia se reduce cuando aumenta la cantidad de clusters. En los anteriores casos de estudio, la eficiencia media siempre se reducía al usar clusters

optimizados con respecto a usar un solo cluster. La causa más probable de que la eficiencia haya aumentado es que en las realizaciones de este caso, los sensores hayan tomado unas posiciones (decididas aleatoriamente) muy particulares o que la carga de las baterías (también aleatoria) haga que aumente la eficiencia con respecto a 1 cluster. En cualquier caso, podemos afirmar que se trata de una excepción, pues en la mayoría de las realizaciones la cantidad de clusters es igual a uno y en las realizaciones en las que es mayor que uno la eficiencia se reduce. Así pues, no tendría sentido optimizar la cantidad de clusters, sino usar siempre 1 solo cluster, pues las realizaciones en las que hay más de uno, la eficiencia siempre se reduce. Además, la desviación típica ha aumentado en un 67.9%, indicativo de que ha aumentado la dispersión de los resultados.

Para los casos en los que la cantidad de sensores es de 20 y 50, la eficiencia se reduce significativamente: 10% para 20 sensores y más del 30% para 50 sensores. De este modo, vemos que permitir que el algoritmo optimice la cantidad de clusters no es nada conveniente, pues hace que se reduzca la eficiencia.

#### 4.3.4.5 Comparativa en función de la cantidad de clusters

Finalmente, para concluir este caso de estudio, se presentará la comparativa entre clusters vista en apartados anteriores. El resultado se puede observar en la figura siguiente.

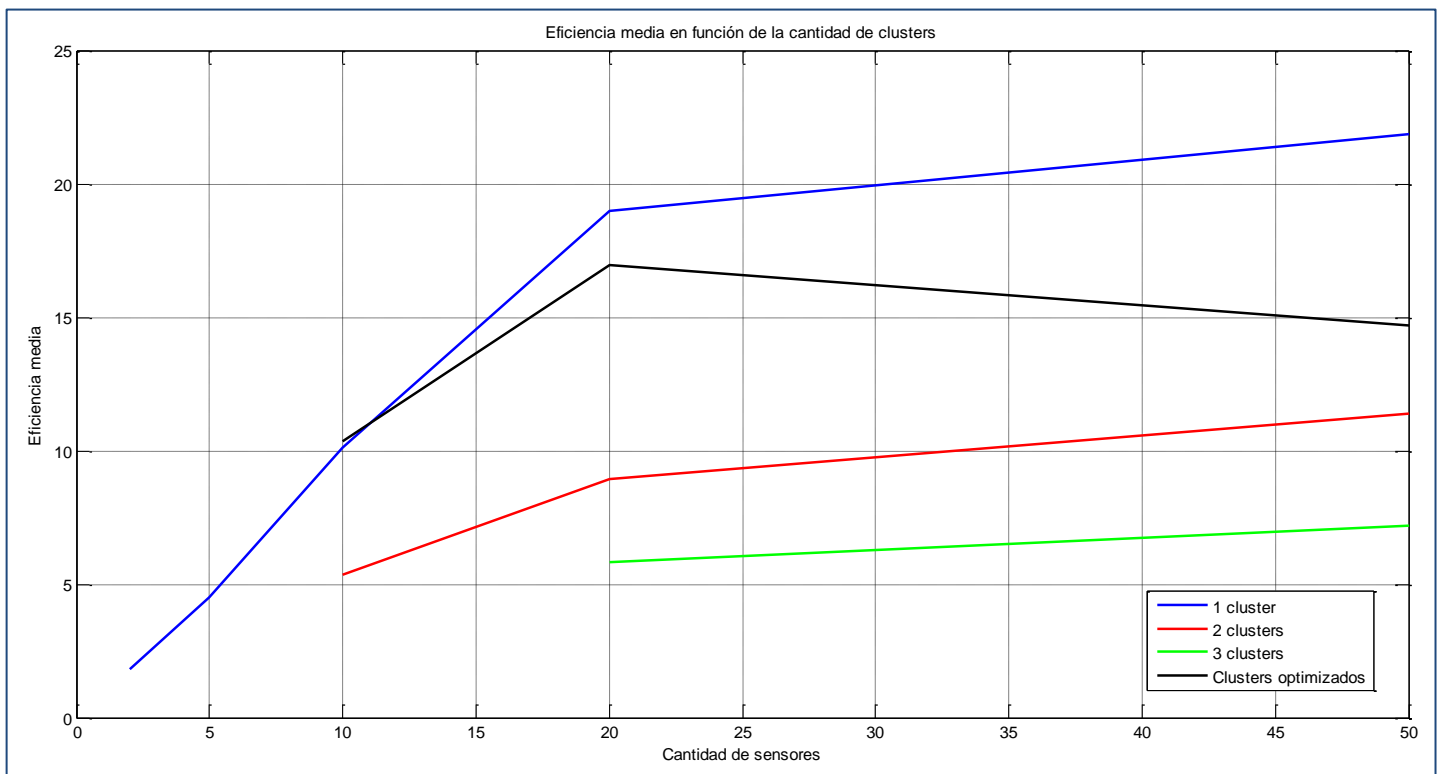


Fig. 4.3.4.13. Caso de estudio 4. Eficiencia para 1, 2, 3 clusters y clusters optimizados (comparativa).

Analizando la gráfica, del mismo modo que en los casos de estudio anteriores, vemos que la mejor opción es que todos los sensores trabajen en el mismo cluster. Si se dividen en 2 o 3 clusters, la eficiencia se reduce enormemente. Si permitimos que la cantidad de clusters se optimice, vemos que para 10 sensores la eficiencia obtenida ha sido mejor;

sin embargo, la causa de este efecto es que los sensores hayan tomado unas posiciones o una carga de batería muy especiales como para que aumente la eficiencia, pues en las realizaciones en las que se dividían en 2 clusters la eficiencia se reducía, como ya se comentó en el apartado anterior. Para 20 y 50 sensores, la eficiencia con clusters optimizados se ve muy reducida.

Al igual que en el caso de estudio 2, en el que los sensores se situaban en 3D, la eficiencia para 50 sensores es mayor que para 20 sensores. Recordemos que esto no ocurría en los casos de estudio 1 y 3, en los cuales los sensores se situaban en 2D. De esta forma, se nos puede presentar la duda de si este efecto se ha producido a causa de la escasa cantidad de generaciones o si se ha debido a que cuando los sensores se sitúan en un plano, existe cierto límite en el que la eficiencia deja de aumentar a medida que aumenta la cantidad de sensores de la red.

Como conclusión a este caso de estudio, podemos decir que dadas las condiciones del escenario que se ha presentado (3D y cargas distintas para los sensores), el tiempo de vida de los sensores se puede prolongar hasta casi 22 veces más que el tiempo de vida de los sensores que no usen beamforming.

#### **4.3.5 Comparativa de los distintos casos de estudio**

En este apartado se realizará una comparación entre los cuatro casos de estudio presentados. Se dividirá en distintos apartados en función de la cantidad de sensores tenidos en cuenta. Se hará uso de distintas gráficas sobre la eficiencia para comparar los casos: 2D y cargas de las baterías iguales, 2D y cargas de las baterías distintas, 3D y cargas iguales y 3D y cargas distintas.

Dado que a lo largo de los casos de estudio se ha concluido que lo más conveniente es utilizar solo 1 cluster, no se presentarán las gráficas correspondientes a 2 clusters, 3 clusters ni clusters optimizados.

##### **4.3.5.1 2 sensores**

En este apartado, se presentan las gráficas que comparan la eficiencia de los distintos casos de estudio cuando la cantidad de sensores es igual a 2.

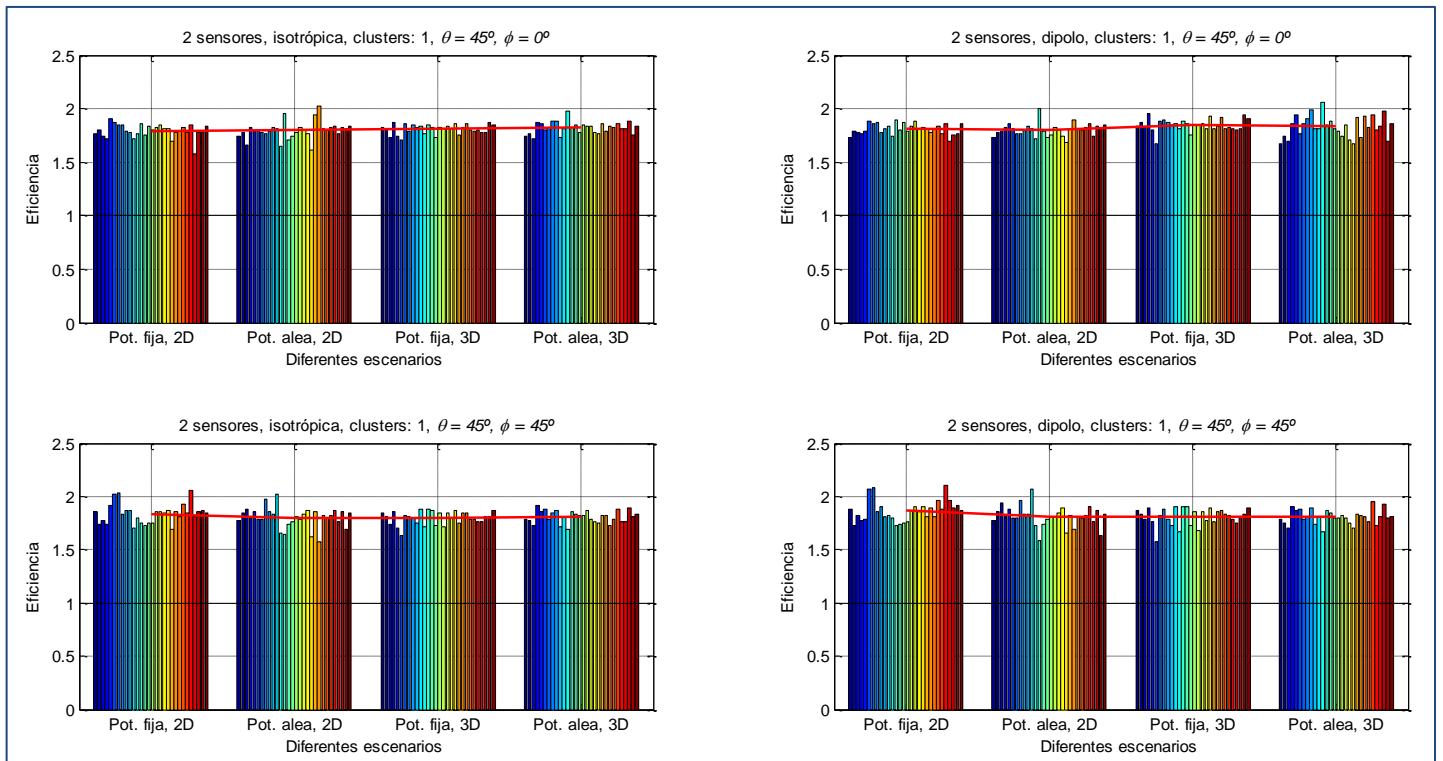


Fig. 4.3.5.1. Eficiencia en función de los distintos casos de estudio para 2 sensores.

Analizando esta gráfica, podemos extraer como conclusión que en caso de contar con 2 sensores, no existen diferencias significativas entre tipos de antena, ángulos en los que se desea radiar ni tipos de escenario. La eficiencia media obtenida en todos los escenarios es prácticamente la misma.

Algo que sí podemos afirmar viendo estas gráficas es que con tan solo usar 2 sensores, se puede conseguir que la vida de los sensores se prolongue. De este modo, podemos prolongar el tiempo de vida de una red con 2 sensores hasta 1.8 veces más usando el beamforming.

#### 4.3.5.2 5 sensores

A continuación, se realizará el mismo análisis que en el apartado anterior, pero para 5 sensores. Se muestran los resultados en la figura siguiente.

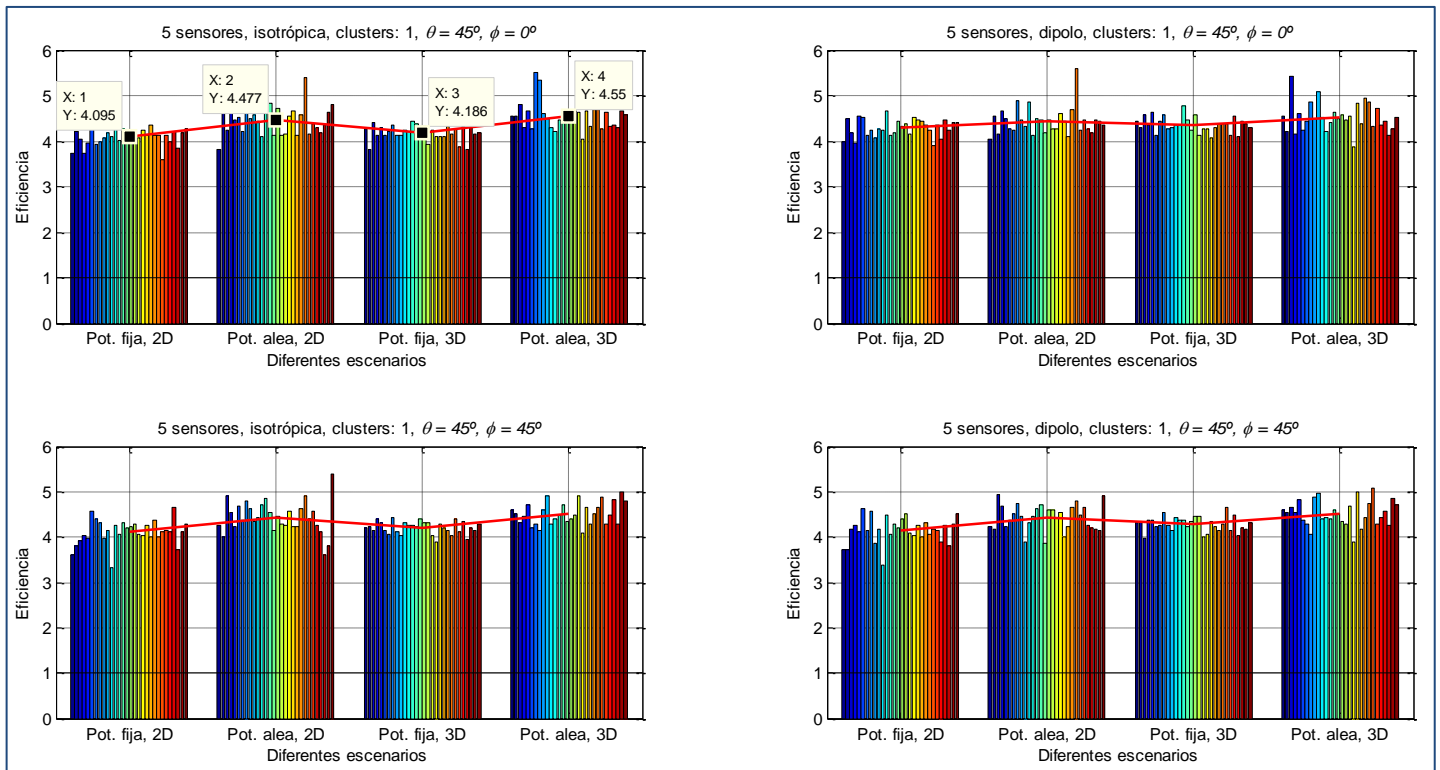


Fig. 4.3.5.2. Eficiencia en función de los distintos casos de estudio para 5 sensores.

Viendo las gráficas, vemos que no importa el ángulo en el que se desea radiar ni el tipo de antena en lo que a eficiencia se refiere. Sin embargo, al contrario que en el apartado anterior (2 sensores), vemos que comienzan a apreciarse diferencias entre los distintos escenarios.

En aquellos en los que la carga de las baterías es distinta para cada sensor, la eficiencia media aumenta ligeramente. En la primera gráfica, podemos ver que cuando el escenario es el de 2D y carga igual para los sensores, la eficiencia media es de 4.095, mientras que para 2D y carga distinta para los sensores, la eficiencia media es de 4.477. Igual ocurre para 3D. Así pues, vemos que existe cierta diferencia entre los escenarios en los que la carga de la batería es distinta.

Finalmente, podemos decir que con 5 sensores se puede llegar a prolongar la vida de las baterías hasta 4.477 veces más que en redes con las mismas condiciones que no usen beamforming. Cabe destacar que en ninguna de las realizaciones se ha obtenido una eficiencia inferior a 1.

### 4.3.5.3 10 sensores

En este apartado, se llevará a cabo el mismo estudio que en los dos apartados anteriores. En este caso, la cantidad de sensores será 10.

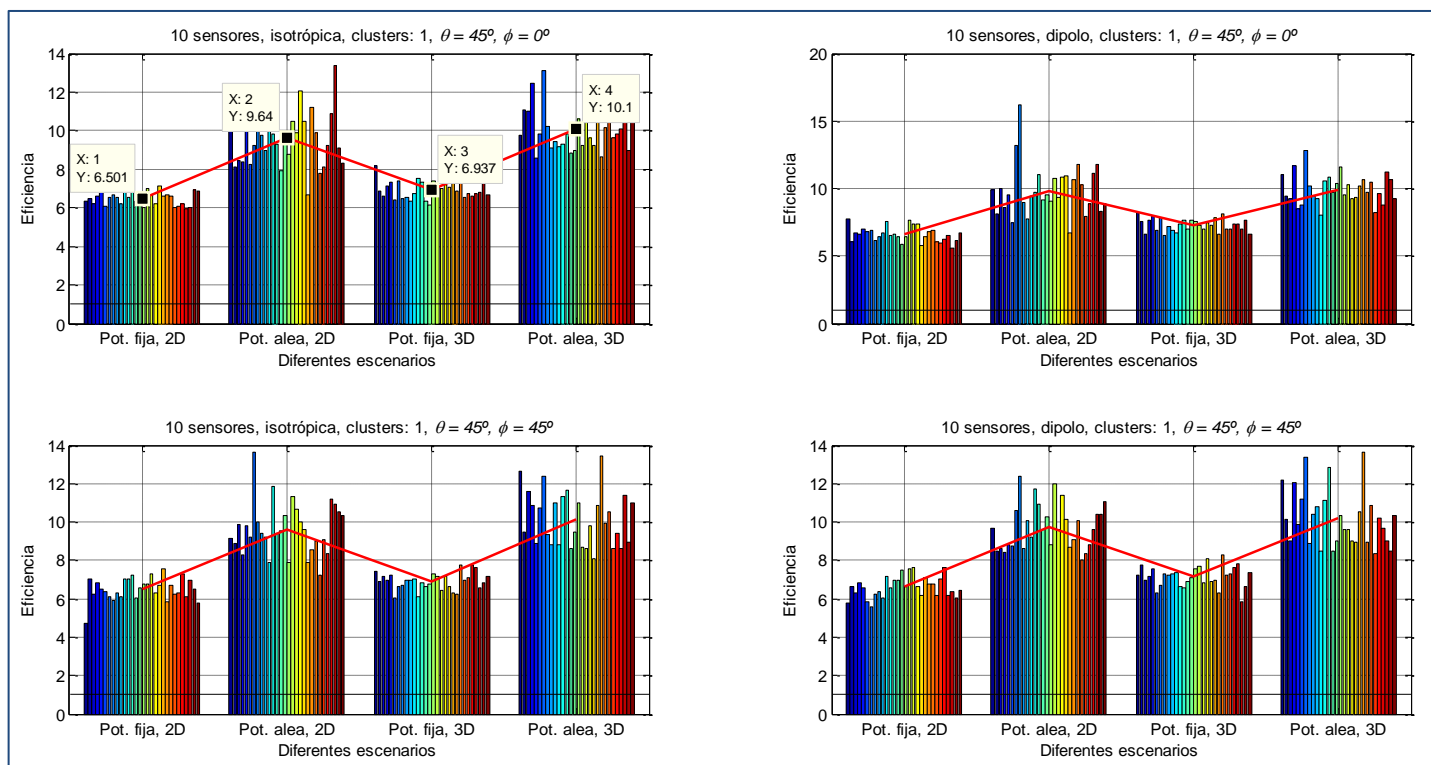


Fig. 4.3.5.3. Eficiencia en función de los distintos casos de estudio para 10 sensores.

De nuevo, analizando las gráficas, cabe mencionar que apenas existe diferencia entre usar antenas isotrópicas o dipolo ni entre radiar en una dirección u otra. Con 5 sensores, las se apreciaban ligeras diferencias entre usar cargas iguales o cargas distintas para las baterías. Con 5 sensores, vemos que esta diferencia es más pronunciada.

En todas las gráficas vemos que cuando la carga de los sensores es distinta, la eficiencia es mayor que cuando la carga de los sensores es igual para todos. En el primer caso, por ejemplo, vemos que la diferencia entre el escenario de 3D y carga distinta (eficiencia media igual a 10.1) es muy superior al escenario de 2D y carga igual (6.5). Estas diferencias se mantienen en todos los casos.

Además, existen también diferencias entre escenarios en 2D y 3D. En todos los casos, los escenarios en 3D consiguen alcanzar una eficiencia mayor que los escenarios en 2D. En los apartados siguientes, veremos si este efecto se sigue dando.

Así pues, vemos que a medida que vamos aumentando el número de sensores, las diferencias que suponen las distintas cargas de batería van incrementando. En el apartado siguiente, podemos ver qué ocurrirá con 20 sensores.

Como conclusión a este apartado, con las condiciones de este escenario, se puede prolongar la vida de la batería hasta 10 veces más con respecto a los sensores que no usan beamforming.

#### 4.3.5.4 20 sensores

En este apartado, se estudiará la eficiencia para los distintos escenarios cuando la red presenta un total de 20 sensores.



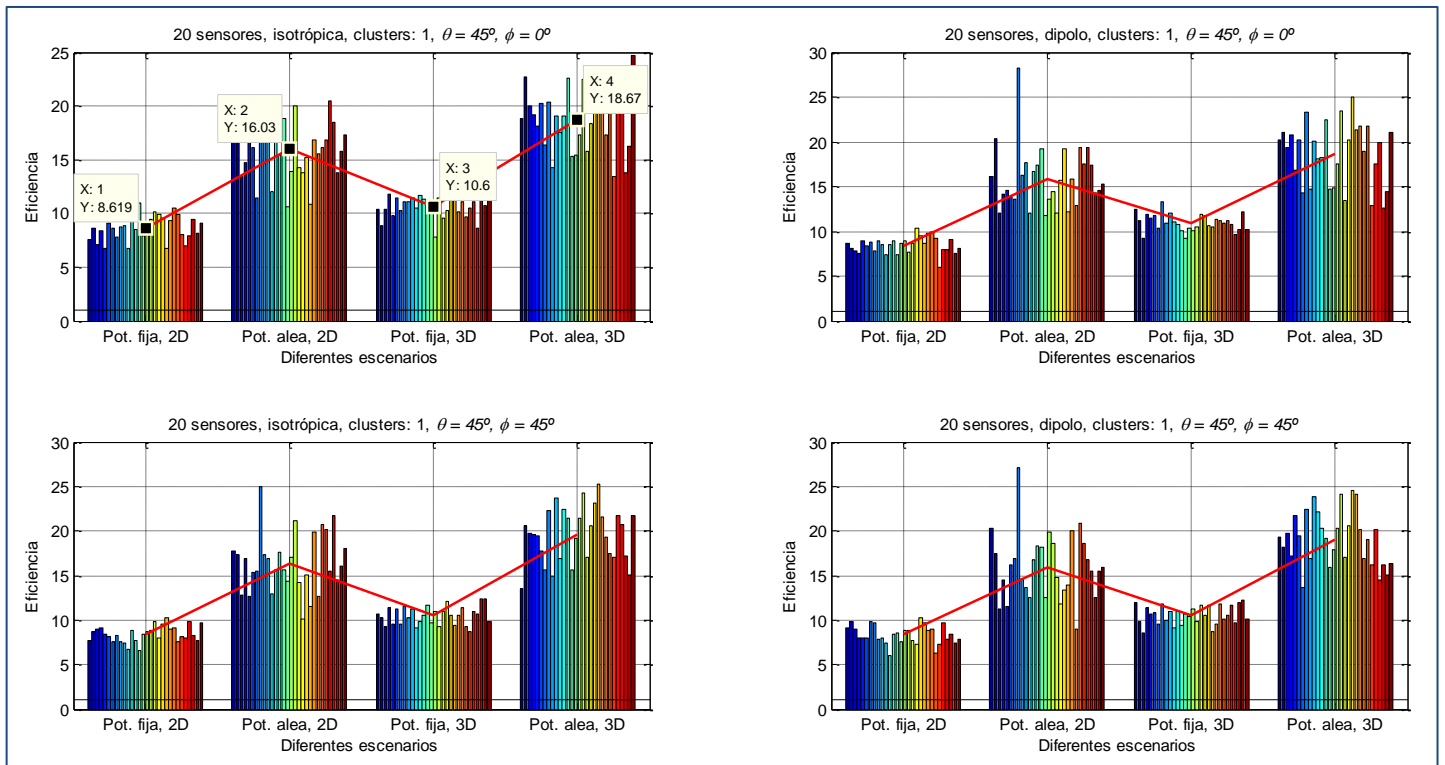


Fig. 4.3.5.4. Eficiencia en función de los distintos casos de estudio para 20 sensores.

Al igual que en los apartados anteriores, vemos que en ninguna de las realizaciones se obtiene una eficiencia inferior a 1. Además, no se aprecian diferencias entre usar una antena u otra o entre un ángulo de radiación u otro. Sin embargo, del mismo modo que con 10 sensores, sí que se aprecian diferencias destacables entre escenarios. En este caso, con 20 sensores, estas diferencias son aún mayores.

En la primera gráfica, por ejemplo, la eficiencia media alcanzada con cargas distintas y 3D es de 18.67, mientras que para cargas iguales y 2D la eficiencia ha sido de 8.62. Así pues, se observan diferencias muy significativas entre escenarios con carga fija o aleatoria, pero también entre casos en 2D y 3D. En los casos en 3D, la eficiencia es claramente mayor.

Como conclusión, con la tecnología estudiada en este proyecto, en redes con 20 sensores, la eficiencia media que podría alcanzarse sería de hasta 18.67.

#### 4.3.5.5 50 sensores

Por último, veremos las mismas gráficas presentadas en los apartados anteriores, pero en este caso para 50 sensores.

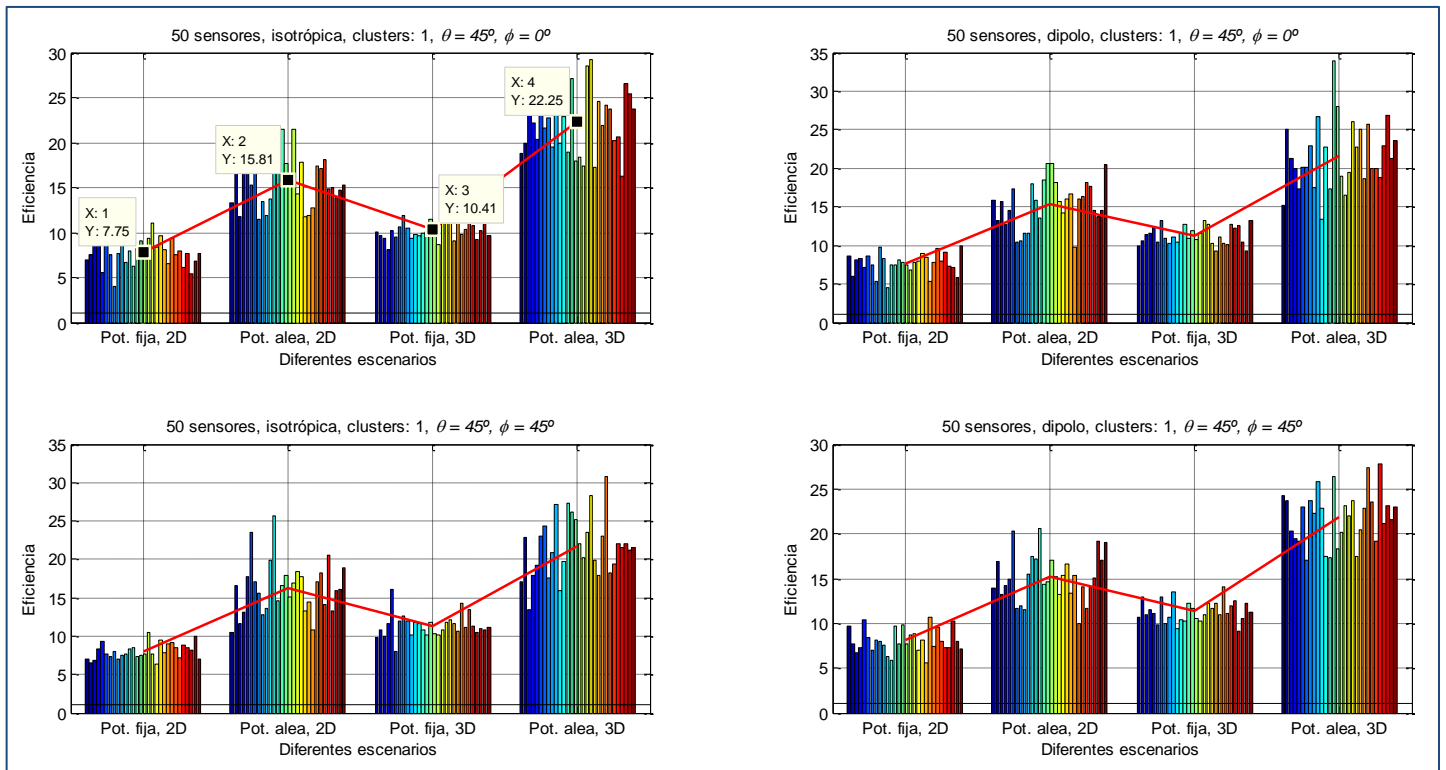


Fig. 4.3.5.5. Eficiencia en función de los distintos casos de estudio para 50 sensores.

Como podemos observar, de nuevo se ha conseguido que la eficiencia supere la unidad en todas las realizaciones. No existe diferencia entre un tipo de antena y otra ni tampoco el ángulo en el que se desea radiar, lo cual es bastante positivo. Además, encontramos grandes diferencias entre escenarios, como el de la primera gráfica.

En ella, se tiene que la eficiencia media máxima alcanzada es para la carga aleatoria y 3D y es de 22.25, mientras que para 2D y carga igual para todos los sensores la eficiencia es de tan solo 7.75. También se observa el mismo efecto que en apartados anteriores: la eficiencia obtenida en 3D es mayor que la obtenida en 2D.

Finalmente, resta decir que con una red de 50 sensores también es posible conseguir el objetivo de nuestro proyecto, pues se llega a alcanzar una eficiencia media de 22.25, aumentando enormemente el tiempo de vida de las baterías de los sensores.

#### 4.3.5.6 Conclusión

Para concluir con la comparativa entre los distintos casos de estudio, se presentará una última gráfica en la que se muestre la media en función de la cantidad de sensores. Dicha media se ha calculado a partir de las realizaciones de los distintos ángulos de radiación y los distintos tipos de antena, para una misma cantidad de sensores. A continuación, se muestra el resultado.

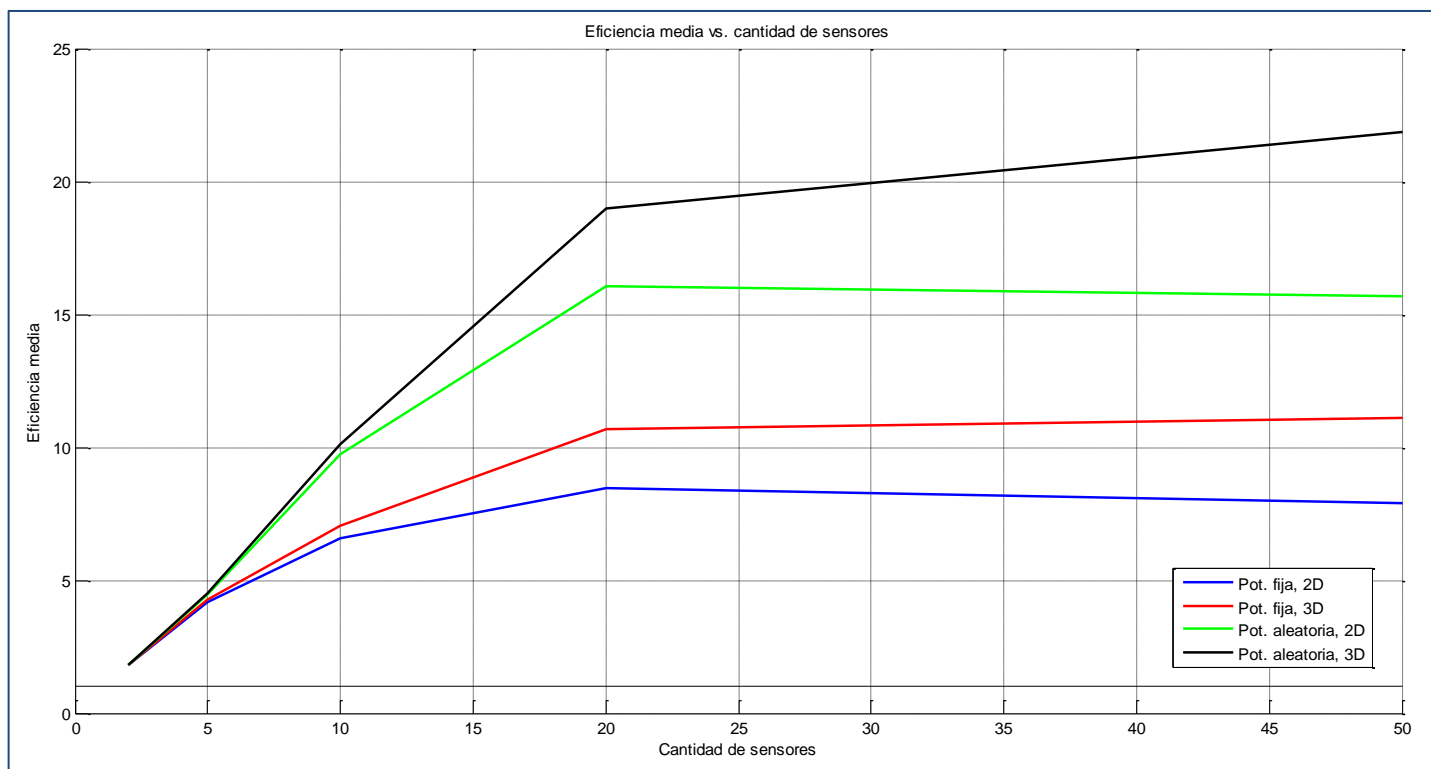


Fig. 4.3.5.6. Eficiencia en función de los distintos casos de estudio (comparativa).

Observando las gráficas, podemos ver que todos los puntos se encuentran por encima de la línea que representa la eficiencia unidad. Esto significa que en todos los casos de estudio básicos que hemos analizado hasta ahora se consigue el objetivo perseguido en el proyecto: conseguir que la vida de los sensores sea superior a la de los sensores que no usan beamforming. De este modo, se consigue superar la barrera de que cada sensor deba transmitir dura un tiempo  $X \cdot T$ , tiempo que aumenta a medida que aumenta la cantidad de sensores ( $X$ ). Recordemos que los sensores que no usan beamforming solo transmiten durante un tiempo  $T$ . También se supera la barrera que supone el tiempo de sincronismo entre los sensores, que también aumenta conforme aumentan los sensores de la red.

En los dos casos de estudio en 2D, vemos que la eficiencia media para 50 sensores se reduce con respecto a la eficiencia con 20 sensores. Este efecto se estudiará con mayor profundidad en el apartado “4.3.7 Explicación al efecto observado en los casos de estudio en 2D”.

Cabe destacar cómo aumenta la eficiencia a medida que aumenta la cantidad de sensores. Para 2 y 5 sensores, la eficiencia obtenida en los distintos escenarios es prácticamente la misma. Conforme se va aumentando el número de sensores, las gráficas comienzan a separarse significativamente.

Analizando la figura, vemos que las gráficas que representan los casos de estudio con carga de batería distinta para los sensores son las que más eficiencia obtienen. Esto es muy positivo, pues muy difícilmente en un caso real todos los sensores tendrían exactamente la misma carga de batería.

Además, las gráficas que representan los escenarios en tres dimensiones se encuentran por encima de las de los escenarios en dos dimensiones. Esto también es

muy conveniente, pues en un caso real los sensores no se encuentran situados perfectamente en un plano, sino más bien en un espacio tridimensional.

#### 4.3.6 Eficiencia máxima

Hasta este punto, siempre hemos considerado que la eficiencia se calcula como el cociente entre el menor tiempo de vida de los sensores que usan beamforming y el tiempo de vida de los sensores que no lo usan. Recordemos que los sensores que no usan beamforming tendrán todos el mismo tiempo de vida, pues a todos se les asigna la misma potencia y apuntan al mismo ángulo, lo cual quiere decir que el valor del diagrama de radiación en la dirección deseada es el mismo para todos.

Este modo de calcular la eficiencia ha resultado ser bastante válido por dos motivos:

- Se asegura una eficiencia mínima para todos los sensores. Si la mínima es superior a la unidad, la eficiencia de los demás también lo será, de forma que se conseguiría el objetivo del proyecto.
- En todos los casos de estudio llevados a cabo, en todas las realizaciones la eficiencia ha sido superior a la unidad, consiguiendo así el objetivo principal.

Dado que hemos asegurado que con el beamforming conseguimos ahorrar energía y prolongar la batería que se gastaría primero, resulta interesante conocer la eficiencia del sensor que más tardará en agotar su batería. Para ello, se realiza el cálculo de la siguiente forma:

$$eficiencia\ máxima = \frac{\max(t_{vida\_x\_B})}{\min(t_{vida\_x})} \quad (4.1)$$

donde  $t_{vida\_x\_B}$  es el tiempo de vida del sensor  $x$  que usa beamforming y  $t_{vida\_x}$  es el tiempo de vida del sensor  $x$  que no usa beamforming. Realmente, podría elegirse cualquier  $t_{vida\_x}$ , pues son todos iguales.

Mediante la fórmula (4.1), se lleva a cabo el mismo análisis que se ha presentado en apartados anteriores. Se calculará la eficiencia máxima para cada tipo de antena y ángulo de radiación y se hará la media en función de la cantidad de sensores, para cada uno de los casos de estudio. De este modo, se representa a continuación una gráfica similar a la de la figura 4.3.5.6 del apartado anterior.

La tabla que resume la figura 4.3.6.1 también se presenta a continuación.

Nº de sensores	Eficiencias máximas							
	Caso de estudio 1 (2D, carga fija)		Caso de estudio 2 (3D, carga fija)		Caso de estudio 3 (2D, carga aleat.)		Caso de estudio 4 (3D, carga aleat.)	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
2	1.827	0.082	1.817	0.064	2.985	1.055	2.925	0.977
5	4.292	0.270	4.376	1.280	12.053	4.044	10.938	3.285
10	9.750	1.097	9.630	2.640	27.984	6.581	26.564	5.365

<b>20</b>	22.485	4.821	21.432	6.191	57.093	13.314	61.016	13.971
<b>50</b>	46.165	8.573	57.447	19.979	144.453	33.911	170.003	41.580

Tabla 4.3.6.1. Eficiencia máxima.

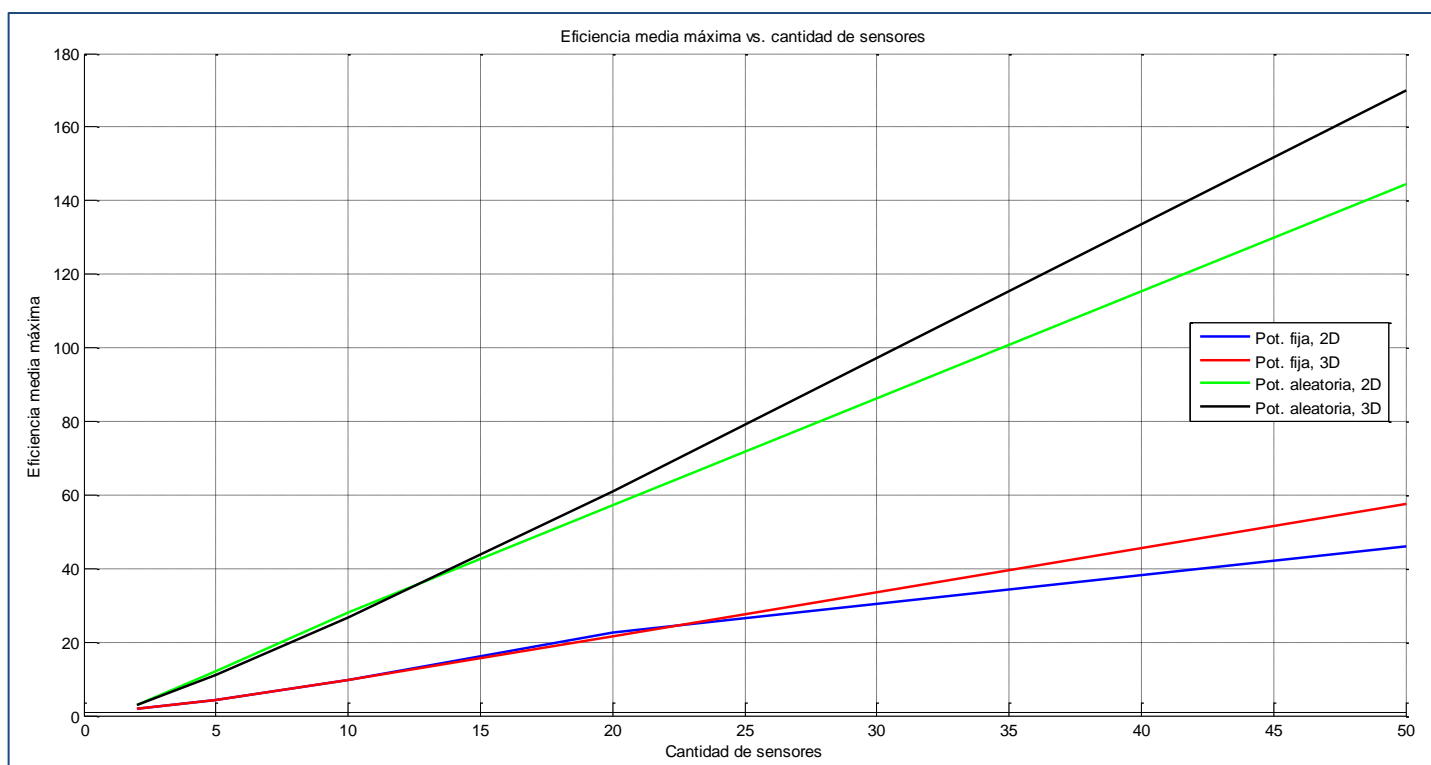


Fig. 4.3.6.1. Eficiencia máxima.

Analizando la figura 4.3.6.1, podemos ver que se reproduce la tendencia de la figura 4.3.5.6, en la que se representaba la eficiencia mínima: el escenario con el que más eficiencia se obtiene es el de carga aleatoria y 3D, seguido por carga aleatoria y 2D, carga igual y 3D y, por último, carga igual y 2D. Sin embargo, los resultados alcanzados son completamente distintos.

Como vemos, la eficiencia media máxima obtenida en el peor de los casos de estudio se da para una cantidad de sensores igual a 50. En ese caso, viendo la tabla 4.3.6.1, el valor de eficiencia obtenida ha sido de 46.165, es decir, la vida de uno de los sensores de esa red duraría 46 veces más que un sensor que no utilizara beamforming.

Si observamos la gráfica que representa el escenario con carga desigual para los sensores y 3D, para 50 sensores, se alcanza una eficiencia de 170.003, lo cual significa que un sensor de esa red tardará 170 veces más en agotar su batería que un sensor de ese mismo tipo de red que no utilice el beamforming. Recordemos que en la tabla 4.3.4.2 la eficiencia media mínima, es decir, la eficiencia del sensor que primero agotaría su batería, era de 21.862. De esta forma, podemos afirmar que en ese tipo de escenario, con esa cantidad de sensores, como mínimo podemos conseguir que la batería de los sensores dure casi 22 veces más; como máximo, 170 veces más.

Algo que resalta al observar la figura 4.3.6.1 es que cuando la cantidad de sensores es reducida (2, 5, 10 e incluso 20 en los escenarios con carga igual para todos los sensores), la eficiencia máxima obtenida es mayor para los casos en 2D que para los casos en 3D. Es también destacable que, en la tabla 4.3.6.1, la dispersión de los datos

sea tan elevada, pues la desviación típica para 50 sensores en el escenario de 3D y carga aleatoria es de 41.580.

#### 4.3.7 Explicación al efecto observado en los casos de estudio en 2D

A lo largo de la discusión de los distintos casos de estudio, nos hemos topado con un efecto que no se esperaba en un principio: la eficiencia media obtenida para 50 sensores en los escenarios en 2D era menor que la obtenida para 20 sensores en 2D. Dicho efecto no era esperado debido a que cuanto mayor sea la cantidad de sensores, mejor se llevará a cabo el beamforming y, por tanto, la eficiencia también sería mayor. Dos posibles causas para este efecto podrían ser:

1. Una de ellas podría ser que el algoritmo no conseguía superar la barrera impuesta por el tiempo de transmisión de los sensores que utilizan beamforming, es decir,  $X \cdot T$ , que aumenta a medida que aumenta la cantidad de sensores  $X$ . Cuanto mayor sea este tiempo de transmisión, antes se agotará la batería, pues los sensores han de transmitir durante más tiempo. De este modo, habría cierto límite en la cantidad de sensores para el cual la eficiencia dejaría de aumentar.
2. La otra causa podría ser que la cantidad de generaciones no fuera suficiente. Recordemos que la cantidad de generaciones para todos los experimentos y realizaciones han sido 200, y la población ha sido 100. De este modo, el algoritmo funcionaría mejor (llegaría con menor cantidad de generaciones a la solución óptima) para 20 sensores (40 variables) que para 50 sensores (100 variables).

Con el fin de descartar una de las causas, se decide llevar a cabo el siguiente experimento: dado que el paso de 20 a 50 sensores es demasiado grande, se llevarán a cabo distintas simulaciones empezando en 16 sensores, hasta llegar a 50, de dos en dos. Las simulaciones desde 16 hasta 30 sensores se realizarán con la misma cantidad de generaciones y población que los casos de estudio anteriores, 200 generaciones y 100 de población; de 32 a 50 sensores, se harán otras simulaciones con 400 generaciones y 100 de población y otras se harán con 400 generaciones y 200 de población.

Con estos experimentos, se probará la teoría de la segunda causa. En caso de no ser cierta, nos servirá para comprobar el supuesto límite impuesto por la primera causa comentada.

Así pues, se decide llevar a cabo estos experimentos con las condiciones del caso de estudio 1 (carga igual para los sensores y 2D) y para el caso de estudio 4 (carga aleatoria y 3D). Dado que los distintos experimentos llevados a cabo para distintas antenas y ángulos de radiación resultaron ser muy similares, se decide realizar los siguientes experimentos únicamente para antenas isotrópicas y para el ángulo  $\theta = 45^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ , con el fin de ahorrar tiempo de ejecución.

A continuación se muestran los resultados obtenidos. En primer lugar, se muestran las realizaciones para los casos en los que la cantidad de sensores varía de 16 a 30 (200 generaciones y 100 población); en segundo lugar, los casos en los que la cantidad de sensores varía de 32 a 50 (400 generaciones y 100 población); por último, el mismo caso para 400 generaciones y 200 de población.

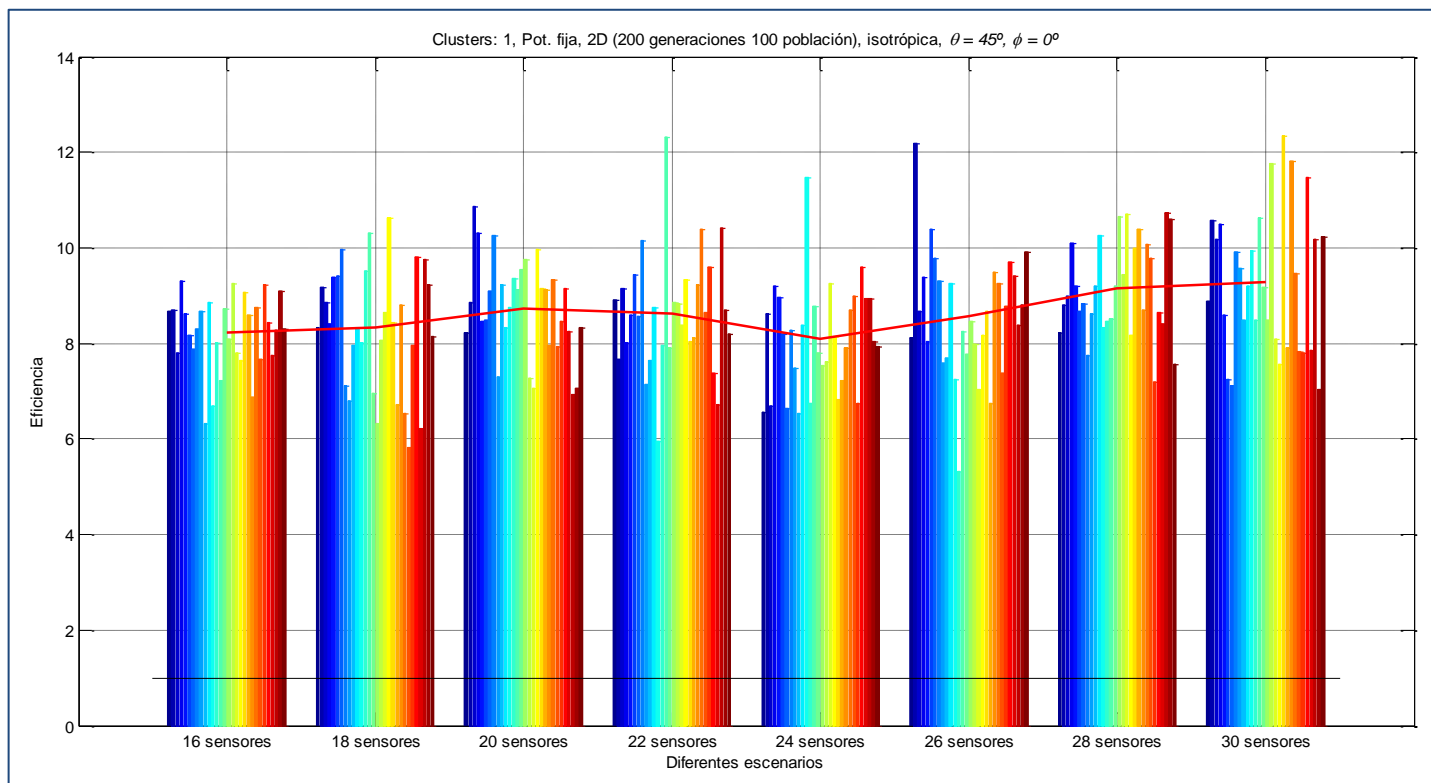


Fig. 4.3.7.1. Eficiencia en función de la cantidad de sensores para el caso de estudio 1 (200 generaciones, 100 población).

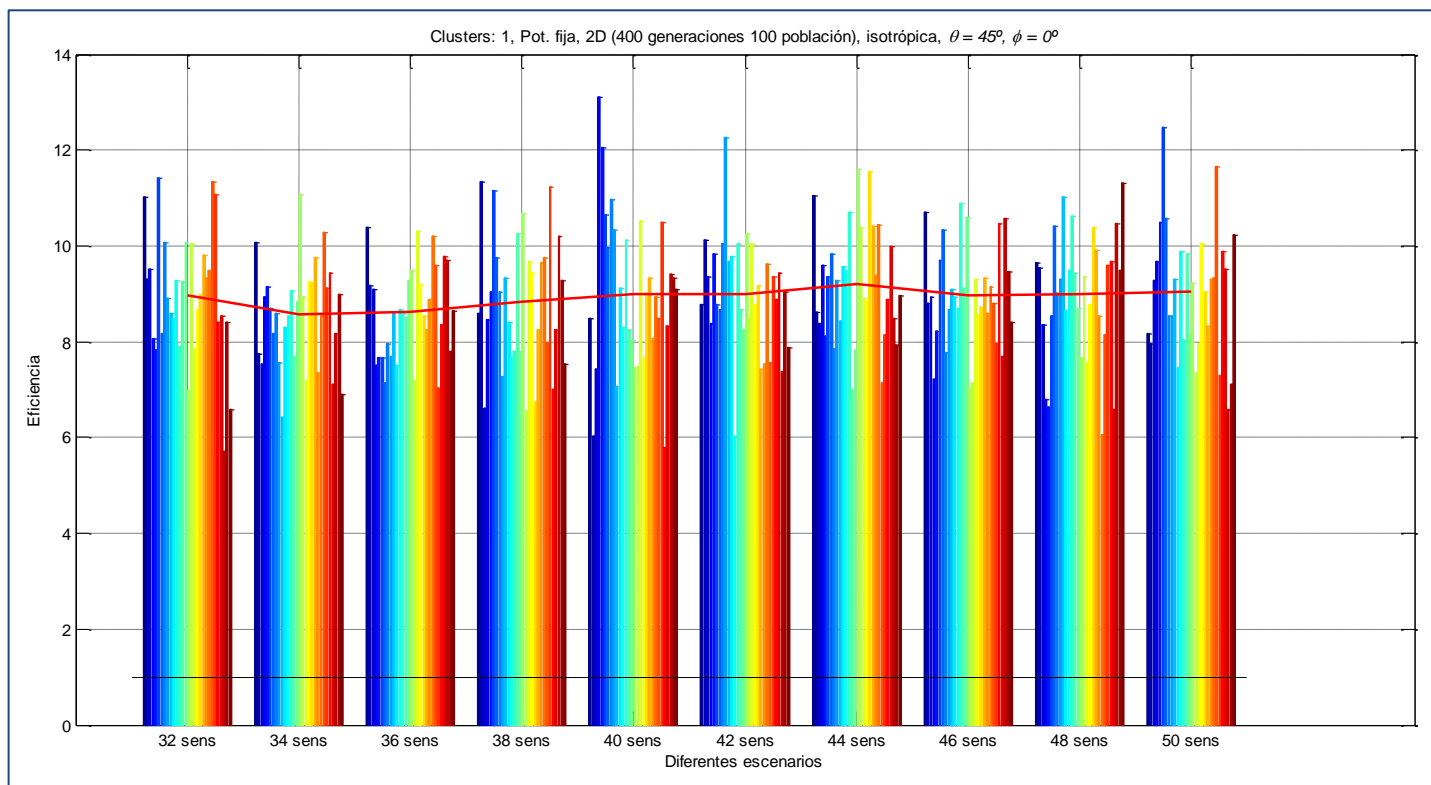


Fig. 4.3.7.2. Eficiencia en función de la cantidad de sensores para el caso de estudio 1 (400 generaciones, 100 población).

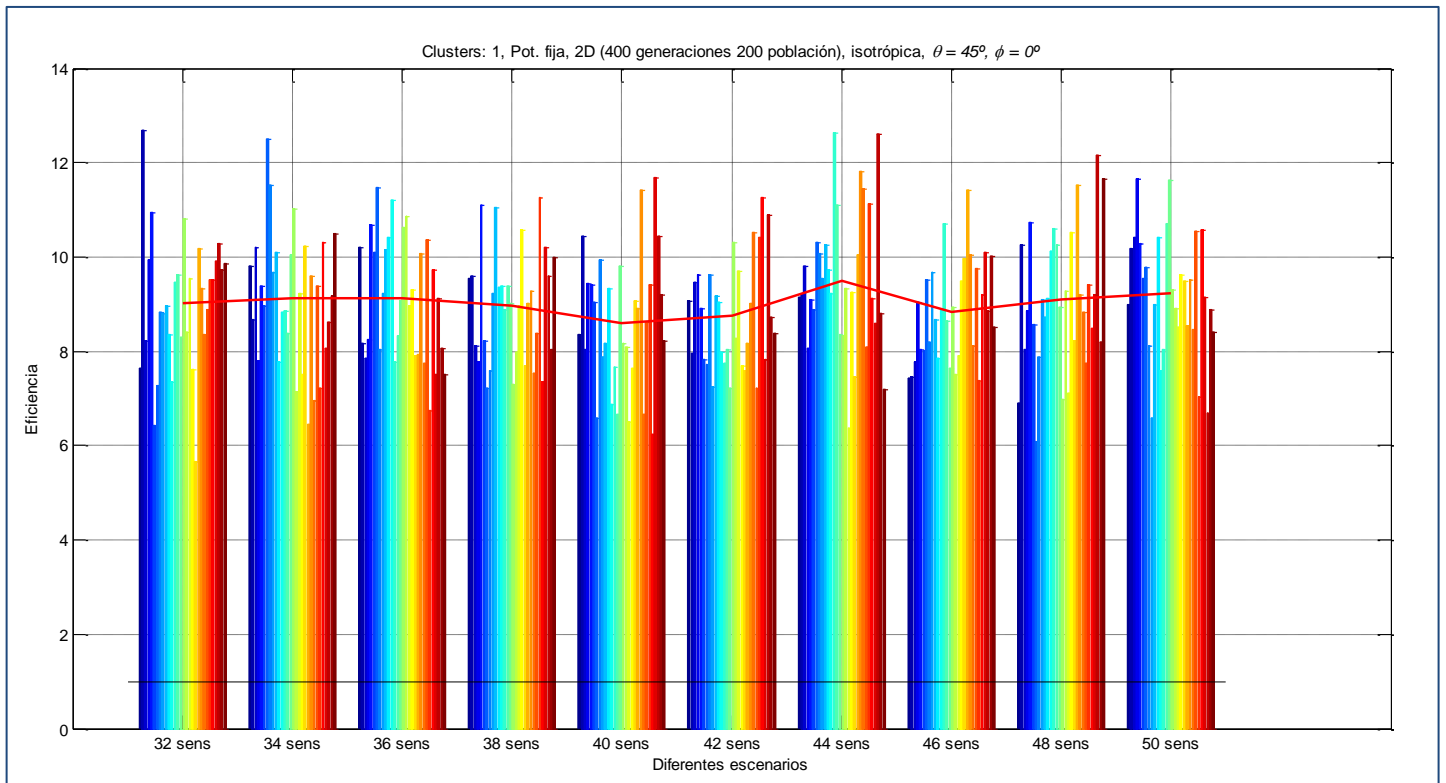


Fig. 4.3.7.3. Eficiencia en función de la cantidad de sensores para el caso de estudio 1 (400 generaciones, 200 población).

Analizando las figuras 4.3.7.1, 4.3.7.2 y 4.3.7.3, podemos ver que en ninguna de las realizaciones la eficiencia se reduce por debajo de la unidad. De este modo, se consigue el objetivo de este proyecto para todos estos experimentos.

Con el fin de poder comparar claramente las distintas realizaciones, se mostrará la media de cada experimento en una misma figura. A continuación, se muestra dicha comparativa. Los valores de eficiencia media para 2, 5, 10 y 50 sensores para 200 generaciones y 100 de población se han extraídos directamente de los valores del caso de estudio 1, pues no se han calculado en estas nuevas simulaciones. Con ellos, veremos claramente las diferencias entre una simulación y otra.



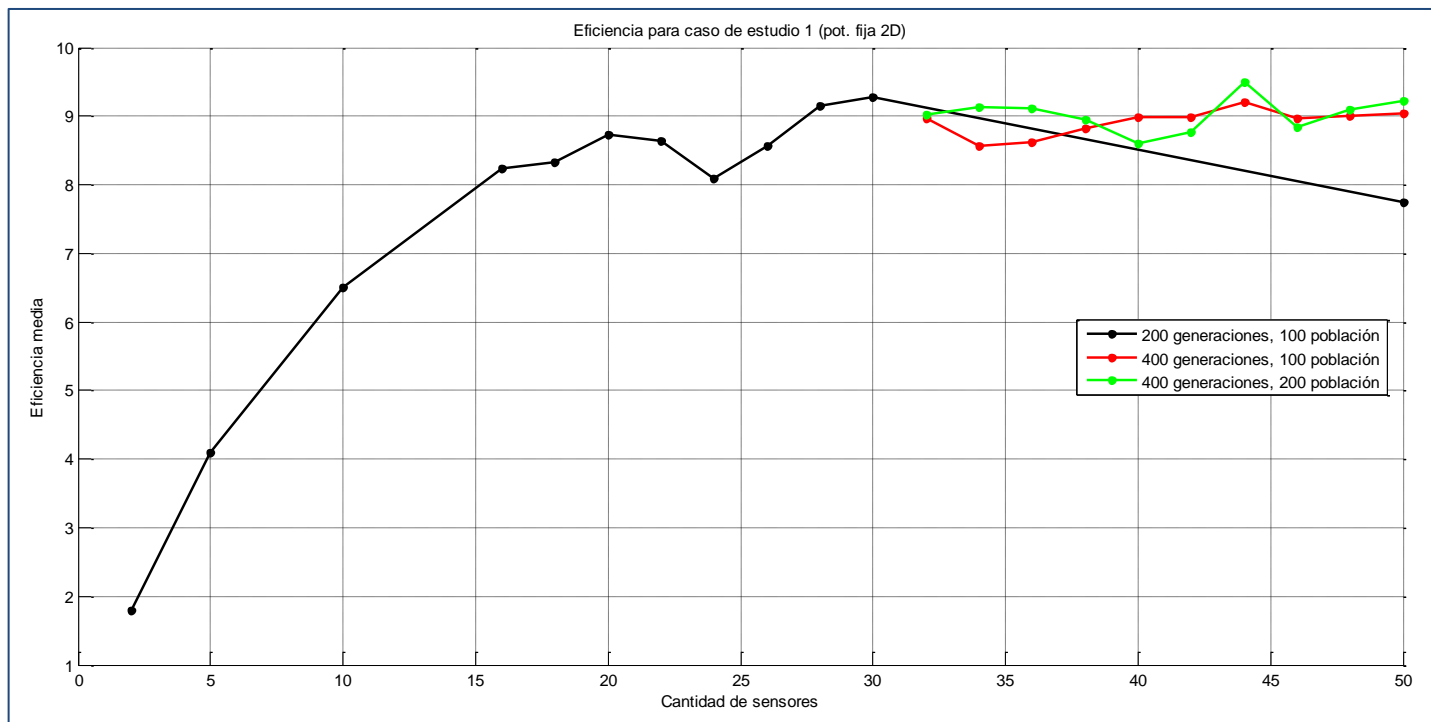


Fig. 4.3.7.4. Eficiencia en función de la cantidad de sensores para el caso de estudio 1.

En primer lugar, comentemos la gráfica de color negro (200 generaciones y 100 de población). Como vemos, presenta un claro ascenso a medida que aumenta la cantidad de sensores, desde 2 hasta 20. Entonces, para 22, 24 y 26 sensores, la eficiencia se reduce ligeramente. Para 28 y 30, aumenta. Para 50 sensores, vemos el efecto que se producía en el caso de estudio 1, la eficiencia se reduce.

En segundo lugar, comentemos la gráfica roja (400 generaciones y 100 de población). Esta gráfica comienza en 32 sensores y va en pasos de 2 sensores hasta 50. A pesar de que se reduce ligeramente con respecto a la eficiencia obtenida para 30 sensores con respecto a la gráfica con 200 generaciones, esta gráfica no tiene una tendencia de bajada, sino de subida. Así, para 50 sensores, la eficiencia obtenida es mucho mayor que la eficiencia obtenida para 50 sensores con 200 generaciones.

Finalmente, comentaremos la gráfica verde (400 generaciones y 200 de población). Esta gráfica, al igual que la roja, comienza reduciéndose, aunque termina por encima incluso de la gráfica roja.

Por tanto, hemos visto que tratando de descartar la causa número 2, sobre la cantidad de generaciones, hemos conseguido dar la razón de por qué la eficiencia para 50 sensores se reducía con respecto a la eficiencia para 20 sensores, pues acabamos de ver que aumentando el número de generaciones al doble, este efecto deja de darse. También tiene que ver el tamaño de la población, pues con 200 de población (gráfica verde) la eficiencia conseguida es mayor que para un tamaño de 100 (gráfica roja).

Así pues, descartamos que para una cantidad menor a 50 sensores exista un límite que impida a la eficiencia aumentar en función de la cantidad de sensores debía al tiempo de transmisión  $X \cdot T$ , pues dicho límite no existe cuando la cantidad de generaciones es elevada. Dado que no se han realizado simulaciones para cantidades

superiores a 50 sensores, no es posible afirmar si dicho límite existirá cuando el número de sensores sea más elevado.

A continuación, se llevará a cabo el mismo tipo de análisis para el caso de estudio 4. En dicho caso, no se daba el efecto en el que la eficiencia se reducía para 50 sensores con respecto a la eficiencia para 20 sensores. Sin embargo, resulta interesante saber si en él también aumentará la eficiencia al aumentar la cantidad de generaciones. Así, mostramos las gráficas obtenidas para este caso de estudio.

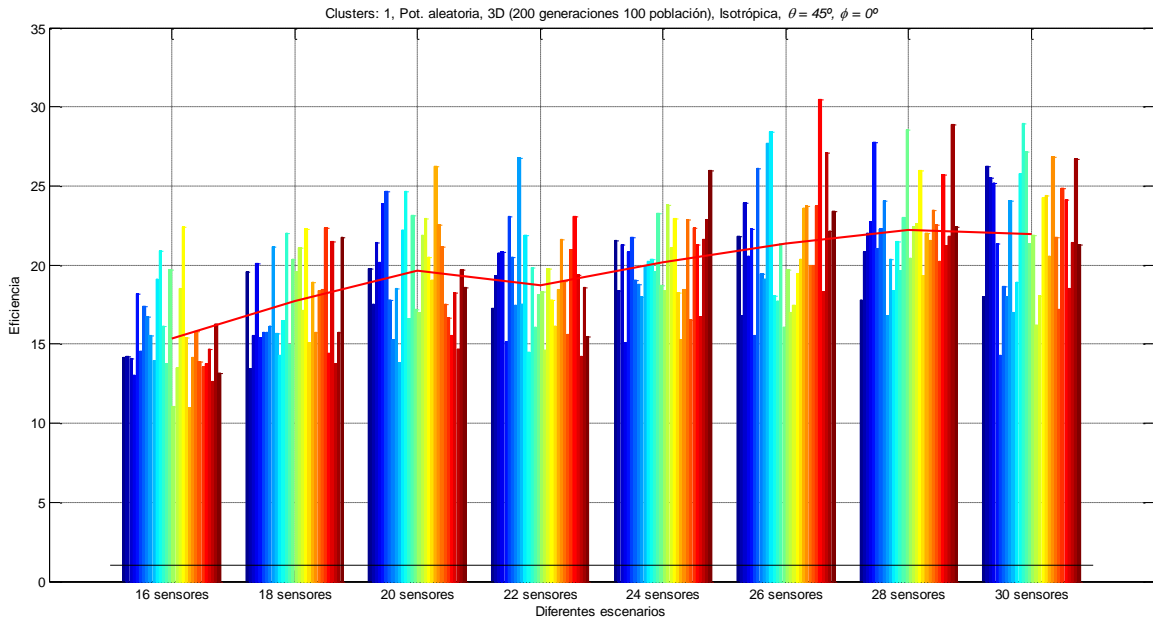


Fig. 4.3.7.5. Eficiencia en función de la cantidad de sensores para el caso de estudio 4 (200 generaciones, 100 población).

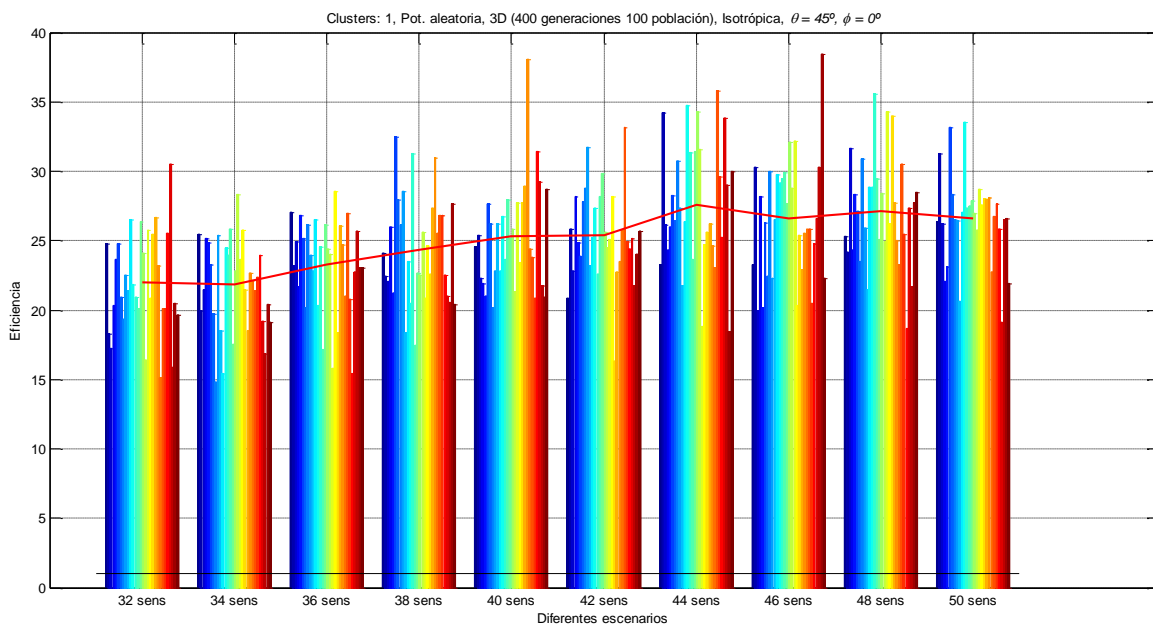


Fig. 4.3.7.6. Eficiencia en función de la cantidad de sensores para el caso de estudio 4 (400 generaciones, 100 población).

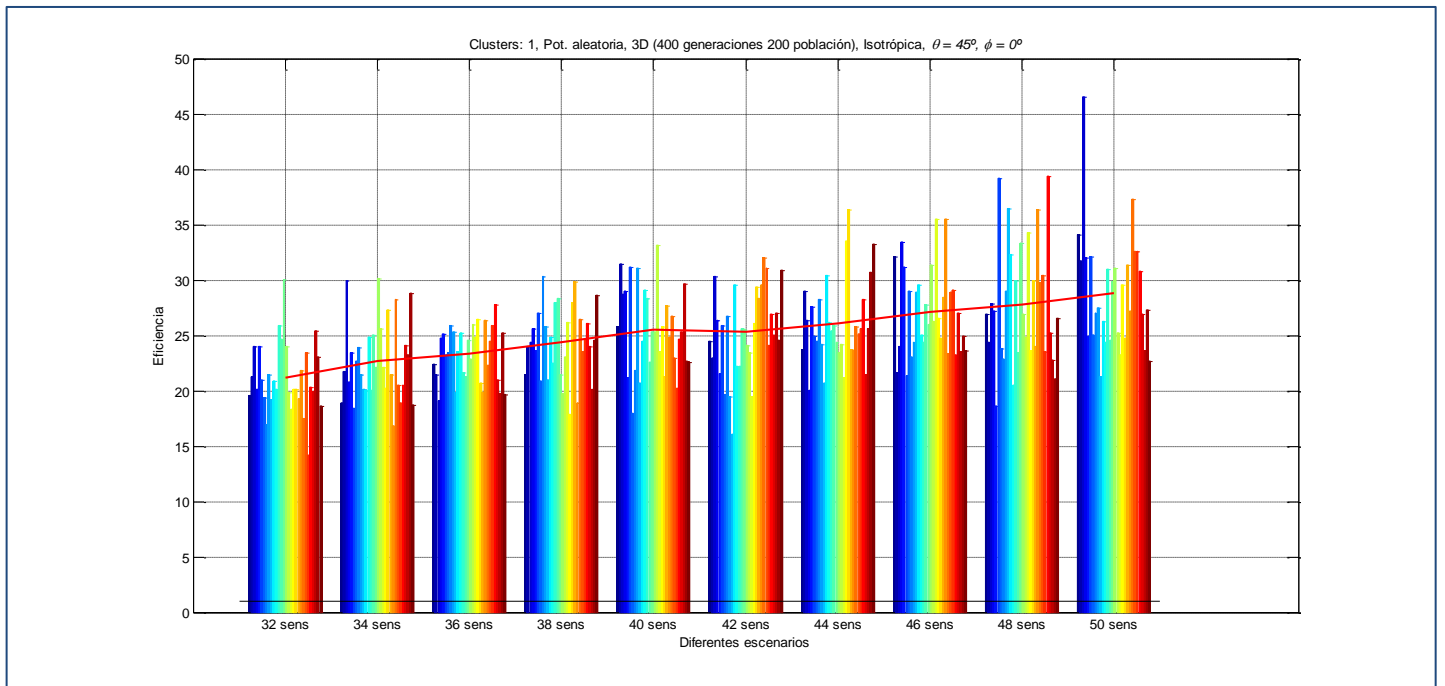


Fig. 4.3.7.7. Eficiencia en función de la cantidad de sensores para el caso de estudio 4 (400 generaciones, 200 población).

Observando las figuras 4.3.7.5, 4.3.7.6 y 4.3.7.7, en ninguna de las realizaciones la eficiencia obtenida está por debajo de 1, consiguiendo así el objetivo del proyecto. Al igual que con el caso de estudio 1, se representará la eficiencia media obtenida de cada experimento en una misma gráfica para que se puedan comparar fácilmente. Los valores de eficiencia media para 2, 5, 10 y 50 sensores para 200 generaciones y 100 de población se han obtenido a partir de las tablas del caso de estudio 4.

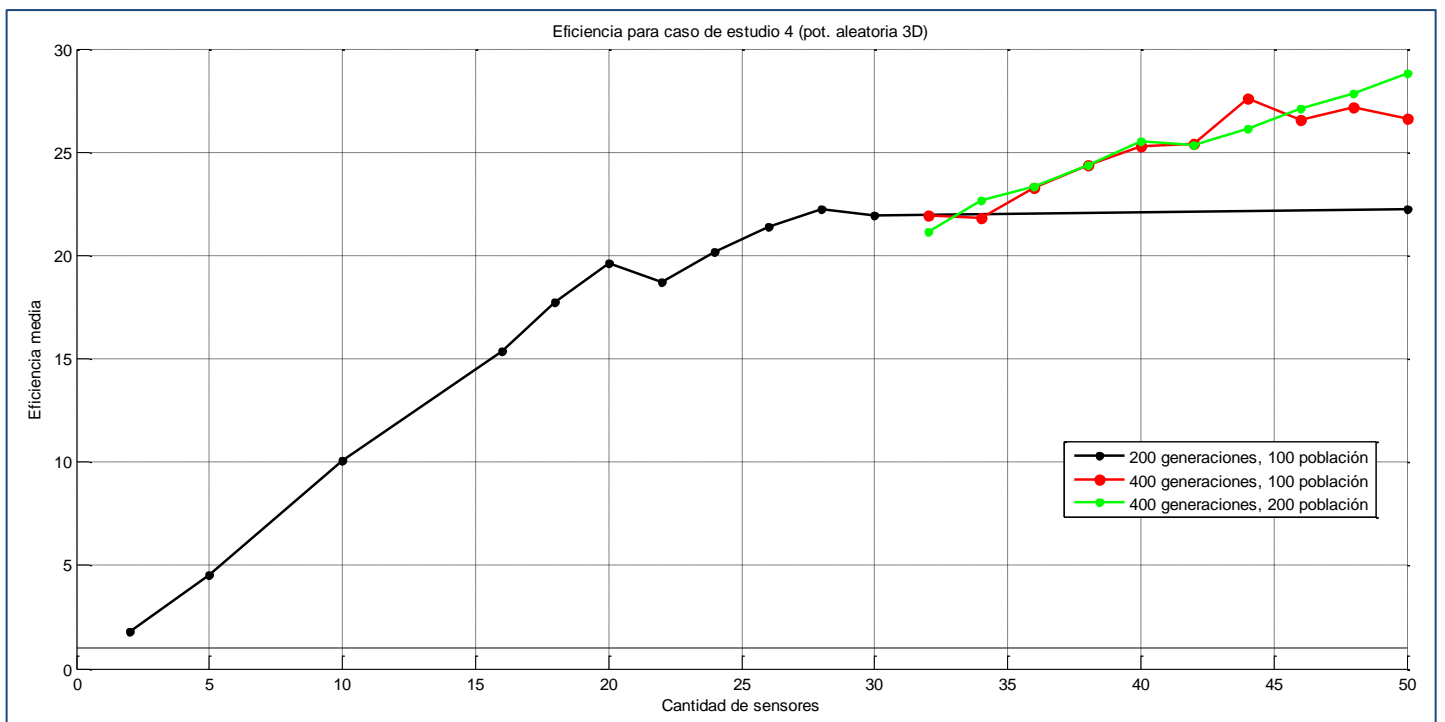


Fig. 4.3.7.8. Eficiencia en función de la cantidad de sensores para el caso de estudio 4.

Analicemos la figura 4.3.7.8. En cuanto a la gráfica de color negro (200 generaciones y 100 de población), vemos que a medida que aumenta la cantidad de sensores, aumenta también la eficiencia de forma casi lineal, hasta los 20 sensores. Para 22 sensores, la eficiencia se reduce ligeramente, para seguir aumentando posteriormente hasta alcanzar los 28 sensores. Para 30 y 50 sensores, la eficiencia obtenida es ligeramente inferior que para 28. La causa probable podría ser que la cantidad de generaciones para un número tan elevado de variables (60 variables para 30 sensores y 100 variables para 50 sensores) sea demasiado poca.

En cuanto a la gráfica roja (400 generaciones y 100 de población), vemos que a partir de 34 sensores, la eficiencia aumenta hasta alcanzar un valor de 26.6 por 50 sensores, que, comparado con el valor alcanzado por la gráfica negra (22.25), es realmente superior. Así, vemos que se repite el efecto del caso de estudio 1: es necesario aumentar la cantidad de generaciones cuando la cantidad de sensores es elevada; de lo contrario, habrá una repercusión directa en la eficiencia, en forma de una clara reducción.

En cuanto a la gráfica verde (400 generaciones y 200 de población), podemos ver que coincide en algunos valores con la gráfica roja. Sin embargo, para 50 sensores, la eficiencia es claramente superior al resto de gráficas, debido a que se ha aumentado la población y también el número de generaciones.

La conclusión que podemos extraer de este apartado es que con la cantidad de generaciones con las que se han ejecutado los algoritmos genéticos en todos los casos de estudio (200) y con el tamaño de la población utilizado (100), es posible conseguir que la eficiencia sea superior a la unidad en escenarios cuya cantidad de sensores sea 50 o inferior. Sin embargo, en los casos en los que la cantidad de sensores es elevada (superior a 30), habíamos notado una ligera reducción en eficiencia, motivada por una cantidad reducida de generaciones y población. Por tanto, se decide llevar a cabo nuevas simulaciones con cantidades de generaciones y de poblaciones más elevadas y se consigue demostrar que la eficiencia es capaz de aumentar en esos casos en los que se reducía. Así, en todos los casos, a medida que aumenta la cantidad de sensores, la eficiencia también lo hará, venciendo siempre a la barrera que podría imponer el tiempo que los sensores con beamforming han de radiar ( $X \cdot T$ ).

## **4.4 Estaciones base**