

# Análisis del conformado del haz para optimizar el consumo energético en redes de sensores usando metaheurísticas

J. Enrique Agudo<sup>1</sup>, Juan F. Valenzuela-Valdés<sup>2</sup>, Francisco Luna<sup>3</sup>,  
Rafael M. Luque-Baena<sup>1</sup>, and Pablo Padilla<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Ingeniería de Sistemas Informáticos y Telemáticos,  
Centro Universitario de Mérida, Universidad de Extremadura  
{jeagudo,rmluque}@unex.es

<sup>2</sup> Dpto. Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones,  
Universidad de Granada  
{juanvalenzuela,pablopadilla}@ugr.es

<sup>3</sup> Dpto. de Lenguajes y Ciencias de la Computación, Universidad de Málaga  
flv@lcc.uma.es

**Resumen** Conformar el haz de forma colaborativa en una red de sensores permite reducir la potencia consumida en la comunicación inalámbrica, un aspecto crítico para aumentar el tiempo de vida de este tipo de sistemas donde la energía proviene de fuentes limitadas como baterías o pilas. Este trabajo analiza el impacto de la dimensionalidad en la dificultad de resolución del problema del conformado del haz atendiendo a dos factores: número de sensores que intervienen y tipo de antena instalado en los sensores. La evaluación preliminar utilizando algoritmos del estado del arte ha mostrado que, fijado el tipo de antena, el número de nodos hace que el problema sea mucho duro por las condiciones que impone el conformado colaborativo del haz. En cualquier caso, los resultados también muestran que el tiempo de vida de la red de sensores se incrementa considerablemente usando esta técnica.

**Keywords:** Redes de sensores, eficiencia energética, conformado del haz

## 1. Introducción

Las redes de sensores (Wireless Sensor Networks, o WSNs por sus siglas en inglés) han emergido como una de las tecnologías más prometedoras de los últimos años. Hay dos indicadores que constatan este hecho: el primero es el número de artículos de revisión publicados, e.g., [11] (y las revisiones anteriores que contiene); el segundo son las predicciones en volumen de negocio que han ido desde 450 millones de dólares en 2012 y se estima que asciendan a 2000 millones en 2022 [10]. Las WSNs ofrecen numerosas ventajas con respecto a las redes tradicionales, como bajo coste, escalabilidad, fiabilidad, precisión, flexibilidad y facilidad de despliegue, permitiendo su aplicación en una gran diversidad de aplicaciones.

Una WSN se puede definir como una red de dispositivos, llamados nodos o sensores, que están distribuidos espacialmente y trabajan de forma colaborativa para comunicar información, a través de enlaces inalámbricos, que se recolecta de un área que se desea monitorizar [2]. La información obtenida se transfiere a un nodo distinguido que, bien utiliza los datos localmente, bien está conectado a otras redes (e.g., Internet). Este nodo se denomina HECN (High Energy Communication Node en inglés). En una WSN la información es transmitida entre el HECN y un sensor particular cuando ambos están lo suficientemente próximos, o bien se usan los sensores intermedios como routers. Típicamente, los nodos se organizan de forma autónoma para establecer las comunicaciones.

La característica principal de las WSNs radica en la naturaleza de los propios nodos, que tienen recursos muy limitados (capacidad de cómputo, memoria, etc.) debido a su tamaño. En particular, la energía disponible en cada nodo se considera como el parámetro más crítico, ya que se emplean baterías de un tamaño muy pequeño. Esto obliga a utilizar los recursos de forma eficiente para alargar la vida de la WSN, y es una de las líneas donde se han desarrollado más avances, e.g., enrutamiento eficiente [6]. Este es el contexto también de este trabajo: mejorar la eficiencia energética de las comunicaciones inalámbricas que se usan en las WSN, empleando para ello técnicas de conformado del haz [8].

La técnica del conformado de haz es útil para recibir y transmitir señales de una forma selectiva en el espacio, es decir puede recibir y enviar las señales en una determinada dirección. Si tenemos en cuenta que el HECN está localizado normalmente en un punto fijo del área de trabajo, esta técnica resulta especialmente útil. Al igual que se puede mejorar la transmisión en una determinada dirección, también se puede anular la transmisión de potencia a zonas no deseadas y no recibir así señal éstas (esto puede servir para evitar recibir señales interferentes). En [13], ya se ha mostrado que la conformación de haz se puede utilizar en el contexto de WSNs para llevar a cabo un ahorro de energía en la transmisión de datos, realizando comunicaciones de datos de forma eficiente, y permitiendo así que el tiempo de vida de las redes de sensores aumente. Para ello se formuló un problema de optimización en el que se la excitación de la antena de cada sensor, dado por la amplitud y fase, constituían el espacio de búsqueda y el objetivo final era maximizar el tiempo de vida de la red (medido como el tiempo en el que el primer sensor se queda sin batería). El objetivo de este trabajo es analizar en profundidad este nuevo problema de optimización en base al número de sensores que se utilizan para conformar el haz y el tipo de antena que instalan (isotrópica, dipolo, o hélice). El problema se ha abordado con cuatro algoritmos, dos del estado del arte, Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES) [9] y Differential Evolution (DE) [12], y uno clásico como es un algoritmo genético (GA) [3], en sus versiones generacional (gGA) y estado estacionario (ssGA). Los resultados han mostrado que el tipo de antena es crítico en la definición del problema y que, a igualdad de antena, aumentar el número de sensores hace que el problema de optimización sea más duro (a pesar de que desde el punto de vista teórico, el conformado del haz debería ser más eficiente).

El artículo está organizado de la siguiente manera. La Sección 2 describe el modelo de formación de haz utilizado para WSN. La Sección 3 describe brevemente los algoritmos de optimización utilizados. En la Sección 4 se analizan y discuten los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones se resumen en la Sección 5.

## 2. Conformado del haz en redes de sensores

Esta sección detalla brevemente en qué consiste la técnica de conformado del haz y define formalmente el problema de optimización que se aborda en el trabajo.

### 2.1. Conformado del haz

Para la obtención de un patrón de radiación altamente directivo con técnicas de conformación de haces, es necesario que el campo de cada elemento individual interfiera constructivamente en las direcciones deseadas y destructivamente en el espacio restante. Para conformar el patrón general de la agrupación de antenas, es posible configurar 5 variables. Estas 5 variables se pueden agrupar en dos categorías diferentes (configuración del elemento individual y situación espacial del elemento individual):

Configuración del elemento individual:

1. El patrón de radiación de los elementos individuales. Es decir, diferentes tipos de antenas tienen patrones diferentes de radiación (dipolo, grupo de parches, etc.)
2. Amplitud de excitación de los elementos individuales.
3. Fase de excitación de los elementos individuales.

Situación espacial del elemento individual:

1. La geometría de la red de antenas (lineal, circular, rectangular, esférica, etc.).
2. Separación entre los distintos elementos (distancia entre los diversos elementos de array).

La forma más fácil y más conveniente para colocar los elementos de una matriz es una línea recta, con la misma separación entre los elementos y la misma excitación de amplitud. Con esta configuración o cualquier otra disposición relativamente simple (circular, matriz cuadrada con igual espaciado entre los elementos), es bastante fácil de calcular la fase de la alimentación de los elementos con el fin de obtener un patrón de radiación deseado. Sin embargo, en el contexto de las WSNs, los nodos se despliegan de forma arbitraria en un área cerrada (la mayoría de las veces incluso al azar) y, como consecuencia, el uso de la formación de haz no es una tarea fácil. De hecho, las primeras aproximaciones aplicando el conformado de haz a las redes de sensores solo tienen unos años de antigüedad. En [5], los autores demostraron la existencia de una alimentación óptima para

los elementos individuales (las variables 2 y 3 se han definido anteriormente) para obtener una ganancia máxima en la dirección deseada. El enfoque propuesto en [7] afirma que se ahorra el 80 % de la energía con la formación de haz. En [1], los autores proporcionan un modelo teórico para las ganancias obtenidas con la formación de haz mediante el despliegue de nodos usando una distribución gaussiana. En este trabajo el ahorro de energía es calculado para cada uno de los escenarios planteados.

## 2.2. Definición del problema de optimización

Estamos considerando en este trabajo que la red de sensores se despliega de forma aleatoria, siendo el área de trabajo de una cuadrícula. Una vez desplegada la red de sensores, los sensores no se mueven (es decir, son redes de sensores estáticas). El despliegue aleatorio de sensores es una estrategia muy común en WSNs, ampliamente utilizado en la literatura publicada (por ejemplo, [1]). Los sensores están equipados con una antena que tiene un determinado diagrama de radiación y se alimenta con una amplitud y fase determinadas.

Cada sensor tiene la batería limitada que se utiliza tanto para monitorizar el entorno, como para transmitir estos datos a la HECN. Se supone que la potencia total disponible para todos los sensores es la misma, pero hemos considerado diferentes tipos de sensores. Se diferencian entre sí en la cantidad de energía dedicada a la detección y por tanto la energía que queda disponible para la transmisión de datos. Hemos modelado esta energía con un número aleatorio distribuido uniformemente entre [0.4,0.6] (debe existir al menos un mínimo de energía para transmitir). Por lo tanto, la energía disponible ( $Ea_x$ ) para el sensor  $n$  ( $n = 1, 2, \dots$ , hasta el máximo número de sensores) es la siguiente:

$$Ea^n = E_t^n \times F^n , \quad (1)$$

donde  $E_t^n$  es la energía total disponible en el sensor  $n$  y  $F^n$  es el factor aleatorio descrito anteriormente.

Se puede obtener la energía consumida el sensor  $n$  ( $Ec^n$ ) como

$$Ec^n = P_{tx}^n \times t^n , \quad (2)$$

donde  $P_{tr}^n$  es la potencia para transmitir los datos en el sensor  $n$ ,  $t^n$  es el tiempo de transmisión de  $n$  y, por tanto, la potencia disponible en  $n$  ( $Pa^n$ ) es

$$Pa^n = P_{tr}^n \times F^n . \quad (3)$$

Así, el máximo tiempo de vida ( $t_{life}^n$ ) un sensor  $n$  (es decir, el tiempo máximo que pueden operar sin consumir su batería) se define igualando la energía consumida igual a la energía disponible, esto es:

$$E_t^n \times F^n = P_{tx}^n \times t_{life}^n . \quad (4)$$

Por tanto, dado un sensor  $n$ , su tiempo de vida se puede expresar como sigue:

$$t_{life}^n = \frac{E_t^n \times F^n}{P_{tx}^n} . \quad (5)$$

En la Ecuación 5,  $P_{tx}^n$  es la potencia necesaria para transmitir los datos cuando no se usa la técnica de conformado de haz. Sin embargo cuando se usa conformado de haz  $P_{tx}^n$  es la excitación en amplitud de cada sensor. Además cuando se usa la técnica de conformado de haz, se produce una ganancia de potencia en unas direcciones y una pérdida de potencia en otras direcciones. Por tanto la potencia utilizada para transmitir datos al receptor es

$$P_{tx}^{nBA} = P_{tx}^n \times GB, \quad (6)$$

donde  $P_{tx}^{nBA}$  es la excitación en amplitud de cada sensor,  $P_{tx}^{nB}$  es la excitación en amplitud y fase de cada sensor y  $GB$  es la ganancia del array en la dirección de recepción. Por tanto cuando se usa la técnica de conformado de haz,  $P_{tx}^n$  es

$$P_{tx}^n = \frac{P_{tx}^{nB}}{GB} \quad (7)$$

Y el tiempo de vida de los sensores con conformado de haz ( $t_{life}^{nB}$ ) se define como:

$$t_{life}^{nB} = \frac{E_t^n \times F^n \times GB}{P_{tx}^{nB}}. \quad (8)$$

El objetivo de este trabajo es maximizar el tiempo de vida de la red completa de sensores. Esto significa que buscaremos las excitaciones en modulo y fase para cada sensor de forma que

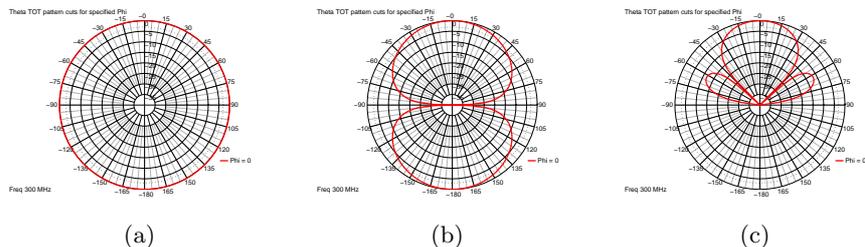
$$\text{máx } t_{WSN} = \text{mín}_n \left( t_{life}^{nB} \right), n \in [1, \text{max\_sensors}] , \quad (9)$$

esto es, el tiempo de vida de la red de sensores viene determinado por el primer sensor que se queda sin batería y, por tanto, el problema de optimización consiste en maximizar el tiempo de vida de los sensores, un aspecto crítico en las redes de sensores.

### 3. Algoritmos

Esta sección esboza brevemente los cuatro algoritmos utilizados para abordar el problema: dos GAs estándar [3], uno generacional (gGA) y estado estacionario (ssGA), así como dos algoritmos del estado del arte, DE [12] y CMA-ES [9]. Todos los algoritmos considerados son metaheurísticas basadas en población que manejan un conjunto de soluciones tentativas al problema (en este trabajo, un vector de reales con las amplitudes y fases de las antenas instaladas en los sensores), que se modifican con operadores de búsqueda, normalmente estocásticos, para encontrar mejores soluciones.

Los GAs usan operadores de selección, cruce y mutación. La diferencia fundamental entre un gGA y un ssGA es que, en el primero, en cada iteración se genera una población completamente nueva a partir de la anterior (mejorado con algún tipo de estrategia elitista que impide que las mejores soluciones se pierdan), mientras en un ssGA se genera una solución en cada iteración y se inserta en la población, permitiendo la recombinación entre padres e hijos. DE, por su parte, es un algoritmo especializado en optimización numérica que utiliza



**Figura 1.** Diagramas de radiación de los tres tipos de antenas utilizadas: (a) isotrópica, (b) dipolo y (c) hélice

una recombinación especial en el que la diferencia ponderada entre dos individuos de la población se añaden a un tercer individuo. Por último, CMA-ES es una aproximación de segundo orden que estima una matriz de covarianza de forma iterativa, y que sirve para muestrear el espacio de búsqueda mediante transformaciones en base a dicha matriz.

## 4. Experimentación

Esta sección incluye la metodología seguida para la realización de los experimentos, así como los detalles necesarios para su reproducibilidad, detallando la parametrización de los mismos. La última sección se dedica al análisis y evaluación de los resultados obtenidos.

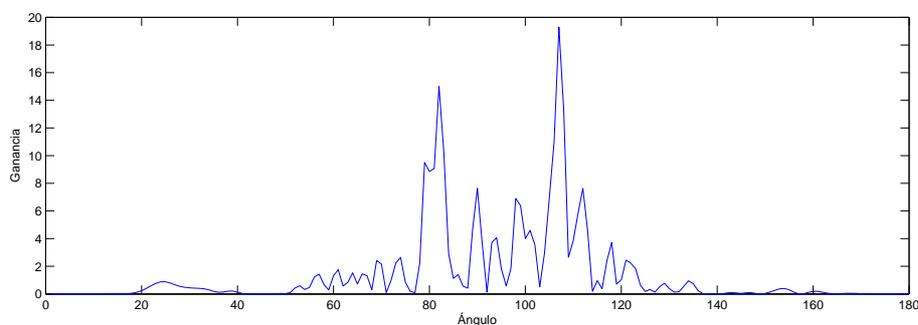
### 4.1. Metodología y parametrización

Por cada algoritmo y número de sensores de la WSN se han realizado 30 ejecuciones independientes para obtener suficiente confianza estadística. Dado que el despliegue de la WSN es aleatorio, se ha garantizado que todos los algoritmos se enfrentan a los mismos 30 escenarios en cada configuración (posicionamiento de los sensores, tipo de antena instalada y energía disponible para transmisión en cada uno de ellos: ver Sec. 2.2). La Figura 1 muestra el diagrama de radiación de los tres tipos de antenas que pueden instalar los sensores. Se ha optado por una configuración homogénea, es decir, todos los sensores usan el mismo tipo. En cuanto a la configuración de energía de cada nodo, la energía disponible en cada sensor,  $E_t = 3600$  Jul., la potencia necesaria para la transmisión  $P_{tx} = 0.1$  Watt, y la dirección del HECN para conformar el haz:  $135^\circ$ .

Después de realizar alguna experimentación preliminar, los parámetros de funcionamiento de los algoritmos se incluye en la Tabla 1. En todos los casos, la condición de parada se ha definido en base al número de sensores. Queda claro que más sensores implica un espacio de búsqueda más grande y, por tanto, el muestreo debe ser mayor. El análisis de los experimentos previos nos ha llevado a fijar la condición de parada en el cómputo de, como máximo,  $N \times 2500$  evaluaciones de función, donde  $N$  es el número de sensores de la instancia.

**Tabla 1.** Parametrización de los algoritmos.  $N$  es el número de sensores.

Parametrización de gGA y ssGA	
<i>Tamaño de población</i>	100 individuos
<i>Selección</i>	tornero binario + tornero binario
<i>Recombinación</i>	SBX, $p_c = 0.9$
<i>Mutación</i>	Polinomial, $p_m = 1.0/2.0 * N$
Parametrización de DE	
<i>Tamaño de población</i>	100 individuos
<i>Variante</i>	rand/1/bin"
<i>CR</i>	0.5
<i>F</i>	0.5
Parametrización de CMA-ES	
<i>Tamaño de población</i>	10 individuos

**Figura 2.** Conformado del haz con una WSN de 20 sensores que instalan hélices

Recordar, por último, que las soluciones tentativas que manejan los algoritmos son vectores de valores reales con la amplitud y la fase de excitación de las antenas instaladas en los  $N$  sensores, y en ese orden. Es decir, primero están representadas las amplitudes y después las fases. Los valores que pueden tomar los primeros van entre 0.1 y 1.0, y los segundos entre -1.0 y 1.0.

## 4.2. Resultados

Las Tablas 2, 3 y 4 incluyen el tiempo de vida de la WSN cuando se utilizan 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10 y 20 sensores para realizar el conformado del haz usando, respectivamente, antenas isotrópicas, dipolos y hélices. El análisis de los resultados se van a estructurar, primero, en base al tipo de antena instalada y, segundo atendiendo al número de sensores.

**Atendiendo al tipo de antena** Hay una conclusión clara que se extrae directamente de los resultados numéricos incluidos en las tablas. Es mucho más fácil conformar un haz con una gran ganancia que nos aumente el tiempo de vida

**Tabla 2.** Tiempo de vida de la WSN alcanzado por los cuatro algoritmos cuando los sensores instalan antenas isotrópicas.

#s	Isotrópica			
	ssGA	gGA	DE	CMA-ES
2	454.527 $\pm$ 41.166	454.522 $\pm$ 41.166	454.527 $\pm$ 41.166	453.329 $\pm$ 42.123
3	444.028 $\pm$ 35.576	444.018 $\pm$ 35.576	444.005 $\pm$ 35.570	443.298 $\pm$ 35.724
4	437.289 $\pm$ 32.252	437.277 $\pm$ 32.249	437.006 $\pm$ 32.198	427.926 $\pm$ 43.386
5	429.544 $\pm$ 25.801	429.661 $\pm$ 25.807	428.690 $\pm$ 25.950	421.052 $\pm$ 27.875
6	427.550 $\pm$ 23.478	427.527 $\pm$ 23.480	425.535 $\pm$ 23.960	398.573 $\pm$ 39.368
7	427.340 $\pm$ 27.832	428.234 $\pm$ 26.810	427.175 $\pm$ 27.938	404.521 $\pm$ 35.269
10	413.947 $\pm$ 21.945	418.158 $\pm$ 18.544	418.010 $\pm$ 18.610	376.856 $\pm$ 30.186
20	398.489 $\pm$ 18.491	408.183 $\pm$ 11.676	409.756 $\pm$ 11.042	335.923 $\pm$ 27.925

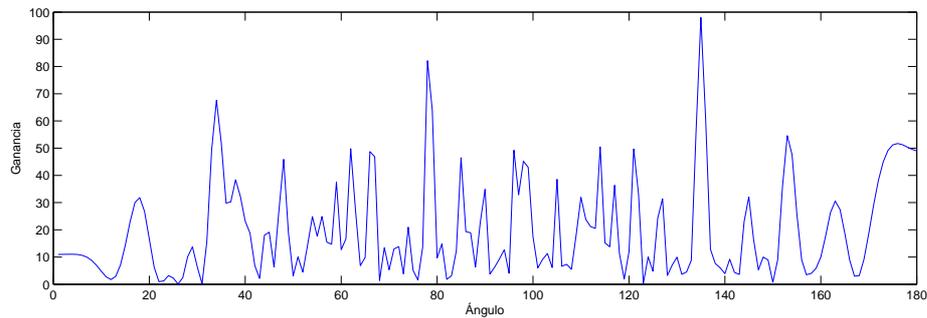
**Tabla 3.** Tiempo de vida de la WSN alcanzado por los cuatro algoritmos cuando los sensores instalan antenas de tipo dipolo.

#s	Dipolo			
	ssGA	gGA	DE	CMA-ES
2	454.341 $\pm$ 41.154	454.338 $\pm$ 41.154	454.341 $\pm$ 41.154	454.290 $\pm$ 41.212
3	443.607 $\pm$ 35.604	443.819 $\pm$ 35.581	443.802 $\pm$ 35.588	443.415 $\pm$ 35.686
4	437.110 $\pm$ 32.230	437.046 $\pm$ 32.091	436.805 $\pm$ 32.075	431.887 $\pm$ 32.929
5	429.485 $\pm$ 25.807	429.460 $\pm$ 25.779	429.079 $\pm$ 25.848	419.927 $\pm$ 30.547
6	427.283 $\pm$ 23.476	427.340 $\pm$ 23.465	426.611 $\pm$ 23.417	408.752 $\pm$ 29.314
7	427.699 $\pm$ 26.422	428.122 $\pm$ 26.740	425.858 $\pm$ 27.529	398.004 $\pm$ 58.138
10	418.109 $\pm$ 18.799	417.853 $\pm$ 18.683	416.652 $\pm$ 18.891	375.524 $\pm$ 34.459
20	402.623 $\pm$ 14.298	405.581 $\pm$ 41.183	409.764 $\pm$ 11.300	331.743 $\pm$ 37.817

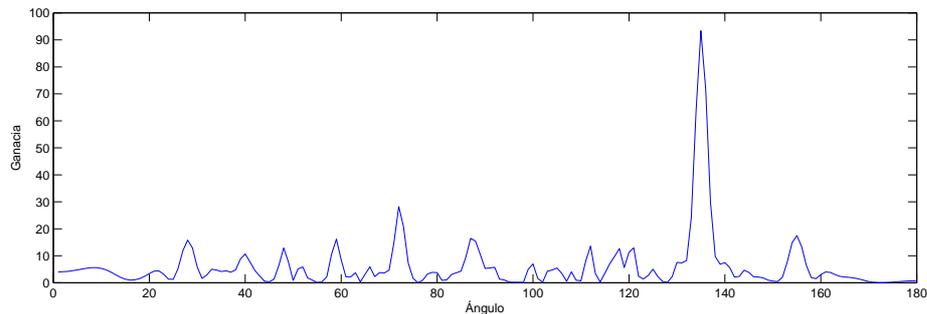
**Tabla 4.** Tiempo de vida de la WSN alcanzado por los cuatro algoritmos cuando los sensores instalan antenas de tipo hélice.

#s	Hélice			
	ssGA	gGA	DE	CMA-ES
2	3.755 $\pm$ 0.841	3.755 $\pm$ 0.841	3.755 $\pm$ 0.841	3.755 $\pm$ 0.841
3	3.509 $\pm$ 0.740	3.509 $\pm$ 0.740	3.509 $\pm$ 0.740	3.478 $\pm$ 0.755
4	3.591 $\pm$ 0.550	3.591 $\pm$ 0.550	3.589 $\pm$ 0.550	3.510 $\pm$ 0.532
5	3.563 $\pm$ 0.490	3.563 $\pm$ 0.490	3.555 $\pm$ 0.490	3.466 $\pm$ 0.482
6	3.501 $\pm$ 0.416	3.501 $\pm$ 0.416	3.486 $\pm$ 0.421	3.347 $\pm$ 0.406
7	3.642 $\pm$ 0.450	3.641 $\pm$ 0.450	3.625 $\pm$ 0.428	3.442 $\pm$ 0.413
10	3.413 $\pm$ 0.329	3.428 $\pm$ 0.317	3.425 $\pm$ 0.318	3.032 $\pm$ 0.432
20	3.240 $\pm$ 0.224	2.552 $\pm$ 0.262	3.293 $\pm$ 0.218	2.604 $\pm$ 0.309

de la WSN cuando se utilizan antenas isotrópicas o dipolos. De forma general, los tiempo de vida de la WSN, atendiendo a la energía disponible en los nodos y al modelado de la misma utilizado (ver Sec. 2), están por encima de las 400 horas (en promedio). En el caso de tener instaladas antenas de tipo hélice, el tiempo de vida cae dramáticamente a poco más de tres horas. La justificación de este resultado tiene que ver con que la fase a la que se excitan este tipo de antenas tienen una influencia casi nula en la conformación del haz [4], es decir,



(a) Conformado del haz cuando se utilizan 5 sensores



(b) Conformado del haz cuando se utilizan 20 sensores

**Figura 3.** Conformado del haz cuando se utilizan (a) 5 y (b) 20 sensores

es muy difícil cambiar la dirección a la que apunta cuando se instala. Dado que el despliegue es aleatorio, cada una puede irradiar en una dirección diferente y, por tanto, la ganancia en  $135^\circ$  es muy baja. Esto implica más energía para transmitir información, lo que reduce así el tiempo de vida. La Figura 2 ilustra este hecho: la mayor ganancia se obtiene en ángulos donde no se encuentra el HECN, por la disposición inicial de los sensores.

**Atendiendo al número de sensores para conformar el haz** Para WSNs que instalan la misma antena, el número de sensores que se utilizan para conformar el haz también ha mostrado una tendencia clara: más sensores supone un menor tiempo de vida. Además este descubrimiento es consistente para cualquiera de los cuatro algoritmos utilizados. Estos resultados se pueden justificar desde dos puntos de vista: el de teoría de la señal y el de la complejidad del problema para los algoritmos de optimización. En el primer caso, desde el punto de vista teórico, cuando la posición de las antenas no es aleatoria, conformar el haz con un mayor número de elementos es más fácil. Sin embargo, el despliegue aleatorio supone un escollo importante, ya que sincronizar las excitaciones de las antenas para que las señales que generan sumen en una dirección concreta ( $135^\circ$  en nuestro caso) es complejo. Es decir, a más sensores, más difícil sincronizar.

Desde el punto de vista de los algoritmos, además, cada nuevo sensor añade dos dimensiones nuevas (su amplitud y su fase), lo que supone tener que explorar un espacio de búsqueda mucho más grande. Para ilustrar este resultado, la Figura 3 muestra linealmente las ganancias en todas las direcciones del plano ( $0^\circ$  a  $360^\circ$ ) cuando conformamos el haz con 5 y 20 sensores. Se puede observar que para 20 sensores es el haz está mucho más claro en  $135^\circ$  que cuando hay 5 sensores. No obstante la ganancia que se obtiene con 5 sensores casi llega a 100 mWatts mientras que con 20 sólo llega a 90 mWatts. Esto supone, de nuevo, mayores necesidades de energía para transmitir y, por tanto, se reduce el tiempo de vida.

Un último apunte respecto a la efectividad de cada algoritmo. Se puede observar en las tres tablas que, en general, su comportamiento es similar. Esto nos lleva a pensar que, efectivamente, la complejidad del problema es creciente y no está determinada por un bajo rendimiento de cualquier de ellos. Aunque el objetivo del artículo no es encontrar el mejor algoritmo para el problema, sí que se vuelve a corroborar la degradación de CMA-ES a medida que el número de variables de decisión aumenta, ya que es el que peor escala de entre las cuatro propuestas. El comportamiento de ssGA, gGA y DE es bastante similar y, el solapamiento que se adivina en sus boxplots (no incluidos gráficamente) llevan a pensar que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

## 5. Conclusiones y trabajo futuro

Este trabajo ha analizado el problema de la eficiencia energética en redes de sensores utilizando técnicas de conformado del haz cuando se utiliza un número creciente de sensores y distintos tipos de antenas. El objetivo era evaluar la complejidad del mismo a la hora de abordarlos con cuatro metaheurísticas, dos algoritmos clásicos (GAs generacional y estado estacionario) y dos del estado del arte, DE y CMA-ES. Los resultados han mostrado que el tipo de antena es determinante conformar el haz ya que puede resultar casi imposible dependiendo de su diagrama de radiación. En cuanto al número de sensores involucrados, a medida que se aumenta su número, se puede conformar un haz más direccional, pero que termina teniendo menos ganancia y, por tanto, reduciendo el tiempo de vida de la WSN. Este hecho tiene que ver con la dificultad propia del problema, ya que sincronizar amplitud y fase de un número elevado de antenas desplegadas aleatoriamente es un problema muy complejo. Esto abre una vía clara de investigación en la mejora de los algoritmos mediante operadores de búsqueda específicos para el problema (hibridación). Otra línea de trabajo de este trabajo que deja abierta es la optimización de WSNs en las que los sensores son heterogéneos, es decir, cada uno tiene instalada un tipo de antena diferente o incluso la selección automática del tipo de antena que utiliza para transmitir.

**Agradecimientos.** Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno de Extremadura y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) bajo el proyecto IB13113. Francisco Luna agradece la ayuda de la Universidad de Málaga, Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech.

## Referencias

1. Ahmed, M., Vorobyov, S.: Collaborative beamforming for wireless sensor networks with gaussian distributed sensor nodes. *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 8(2), 638–643 (2009)
2. Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E.: A survey on sensor networks. *Communications Magazine, IEEE* 40(8), 102–114 (2002)
3. Bäck, T., Fogel, D.B., Michalewicz, Z. (eds.): *Handbook of Evolutionary Computation*. Oxford University Press (1997)
4. Balanis, C.A.: *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley, 3rd edn. (2005)
5. Bejar Haro, B., Zazo, S., Palomar, D.: Energy efficient collaborative beamforming in wireless sensor networks. *Signal Processing, IEEE Trans. on* 62(2), 496–510 (2014)
6. Ehsan, S., Hamdaoui, B.: A survey on energy-efficient routing techniques with qos assurances for wireless multimedia sensor networks. *Communications Surveys Tutorials* 14(2), 265–278 (2012)
7. Feng, J., Lu, Y., Jung, B., Peroulis, D.: Energy efficient collaborative beamforming in wireless sensor networks. In: *International Symposium on Circuits and Systems*. pp. 2161–2164 (2009)
8. Gershman, A., Sidiropoulos, N., ShahbazPanahi, S., Bengtsson, M., Ottersten, B.: Convex optimization-based beamforming. *Signal Processing Magazine, IEEE* 27(3), 62–75 (2010)
9. Hansen, N.: The CMA evolution strategy: a comparing review. In: *Towards a new evolutionary computation. Advances on estimation of distribution algorithms*, pp. 75–02. Springer (2006)
10. Harrop, P.: *Wireless sensor networks 2012-2022*. IDTechEx (2012)
11. Rawat, P., Singh, K.D., Chaouchi, H., Bonnin, J.M.: Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies. *Journal of Supercomputing* 68, 1–48 (2014)
12. Storn, R., Price, K.: Differential evolution – a simple efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. *Tech. Rep. 95-012, Int. Compt. Sci. Inst., Berkeley, CA* (1995)
13. Valenzuela-Valdés, J.F., Luna, F., Luque-Baena, R.M., Padilla, P.: Saving energy in wsns with beamforming. In: *3rd IEEE International Conference on Cloud Networking, CloudNet 2014*. pp. 255–260 (2014)