

Redes de sensores seguras y eficientes con beamforming

J.F Valenzuela-Valdés¹, F. Luna², P. Padilla¹, J.L. Padilla³, R. M. Luque-Baena²

¹Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones
CITIC, Universidad de Granada

{juanvalenzuela, pablopadilla}@ugr.es
²Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación
Universidad de Málaga

{flv, rmluque}@lcc.uma.es
³Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores
CITIC, Universidad de Granada
jluispt@ugr.es

Abstract

Mejorar la eficiencia energética de las redes de sensores (WSN, por sus siglas en inglés) es uno de sus principales objetivos de diseño. De entre las distintas líneas de trabajo existentes en esta área, el uso del conformado del haz, o *beamforming*, está en auge en la actualidad, ya que proporciona una forma de transmitir señales de radio muy eficiente hacia un conjunto dado de direcciones destino. En este trabajo, el *beamforming* se ha utilizado para incrementar, por una parte, el tiempo de vida de las WSNs y, por otro, el nivel de seguridad de la red, evitando establecer comunicaciones en direcciones donde se conoce la existencia de nodos enemigos. El problema se ha formulado agregando dichos objetivos en una única función de *fitness*, y cuyas soluciones tentativas están compuestas por las amplitudes y fases de las antenas instaladas en los nodos de la WSN. Sobre distintos escenarios sintéticos, los resultados han mostrado que es posible reducir el consumo energético de una WSN y, a la vez, proporcionar comunicaciones seguras ante la presencia de posibles atacantes.

1 Introducción

Las redes de sensores inalámbricos (WSNs, por sus siglas en inglés) están compuestas por un conjunto de nodos que tienen dos tareas principales: monitorizar, en general, algún tipo de magnitud física mediante algún sensor, y transmitir lo monitorizado a un nodo distinguido de la red, que es el encargado de recolectar toda la información de todos los nodos, procesarla de alguna forma y/o reenviarla al exterior de la red (ya sea un servicio web, la nube, etc.). Estos nodos son dispositivos que están alimentados por baterías y, por tanto, con el tiempo, dejarán de funcionar una vez se agoten. Alargar el tiempo de vida de una WSN es una de las líneas de trabajo más importante en el dominio, y se aborda desde diferentes frentes. En nuestro caso, el objetivo es ahorrar energía en la transmisión de las señales que llevan la información monitorizada por los nodos. Para ello se propone el uso conjunto la técnica de conformado del haz (*beamforming*) colaborativo [8]. El *beamforming* colaborativo se realiza a nivel de señal de radio y tiene como objeto configurar el patrón de radiación (*beam*) resultante de varias antenas para proporcionar el máximo nivel de señal posible en una dirección deseada. Como se explica en [8], se pueden utilizar técnicas de optimización clásicas (*convex optimization*) para resolver diferentes problemas relacionados con el *beamforming*. Sin embargo, en todos esos problemas, los nodos están distribuidos de forma regular (por ejemplo, en una línea recta o en un círculo), haciendo el problema matemáticamente tratable por dichas técnicas para obtener la amplitud y fase de las antenas que hacen que se obtenga la mejor ganancia en una dirección dada. No obstante, cuando los nodos (antenas) están dispuestos aleatoriamente, el problema de optimización subyacente se complica, y las técnicas anteriores no son aplicables.

La contribución de este trabajo tiene que ver con la mejora de la seguridad en las transmisiones a nivel de interfaz de radio (capa física). Para ello, se asume la existencia de nodos enemigos en el área de trabajo que no deben recibir las señales transmitidas (e.g., porque no están autorizados). Es decir, el haz se conforma colaborativamente con los nodos de la WSN, y ha de apuntar hacia una dirección dada (donde se ubica el nodo distinguido) y, al mismo tiempo, debe evitar irradiar hacia las direcciones donde

están los nodos enemigos. El problema de optimización se ha formulado con una función objetivo que agrega dos valores: el tiempo de vida de la WSN (que se ha de maximizar), medido como el tiempo en el que el primer nodo se queda sin batería, y la ganancia de la señal en la dirección de los nodos enemigos (a minimizar). Para ello se ha utilizado un Algoritmo Genético (GA por sus siglas en inglés) clásico [3], en el que las soluciones tentativas están compuestas por los parámetros de alimentación de las antenas (amplitud y fase) con los que se realiza el *beamforming*. Los resultados obtenidos en la experimentación realizada, que deben considerarse como preliminares a los ya presentados en [15], han mostrado que ambos objetivos, eficiencia energética e incremento de la seguridad en las transmisiones, se han alcanzado satisfactoriamente.

El resto del trabajo se organiza como sigue. La siguiente sección describe los trabajos relacionados de la literatura especializada. La modelización del problema y la función objetivo se detallan en la Sección 3. La Sección 4 analiza los resultados obtenidos, mientras que las principales conclusiones del trabajo y las posibles líneas de trabajo futuro se incluyen en la Sección 5.

2 Trabajos relacionados

El primer trabajo encontrado en el que se usa *beamforming* distribuido específicamente en WSNs ha sido propuesto por Ochiai *et al.* en 2005 [12], en el que se muestra que, asumiendo que un gran número de sensores están distribuidos en un disco, esta aproximación es posible. Estos autores también han mostrado diferentes propiedades de los diagramas de radiación medios, que permiten reducir el consumo de energía. Mudumbai *et al.* [10] han presentado una arquitectura para habilitar *beamforming* colaborativo en WSN. En 2007, Han y Poor [11] plantean el problema como la selección de nodos para implementar *beamforming* distribuido, para alargar la vida de la WSN. En 2009, Ahmed y Vorbyov [2] han extendido el trabajo de Ochiai *et al.* [12] para considerar una distribución Gaussiana de los sensores, Feng *et al.* [7] han propuesto diferentes modelos para la energía consumida por los nodos que usan *beamforming*, y Mudumbai *et al.* [11] han revisado diferentes técnicas de sincronización cuando se aplica conformado del haz. En 2010, Zarifi *et al.* han introducido la idea de seleccionar subconjuntos de nodos de entre los que componen la WSN para implementar *beamforming* distribuido [17], considerando también los lóbulos laterales del patrón de radiación para minimizarlos [18]. Una línea de trabajo relacionada con antenas direccionales se ha presentado en [6]. En 2014, Béjar Haro *et al.* [4] han introducido la necesidad de optimizar cuando se utiliza técnicas de conformado de haz colaborativas ya que, en trabajos previos basados en propiedades promedio de los diagramas de radiación, sólo se consiguen resultados satisfactorios cuando el número de nodos es muy elevado. En 2016 se han presentado dos aproximaciones diferentes para implementar estrategias de selección de nodos que garanticen ahorro de energía y control del patrón del lóbulo lateral [5, 16]. Los autores del presente artículo también tienen resultados previos en los que se utiliza *beamforming* distribuido en WSNs [1,13], si bien, hasta donde conocemos, la aplicación de conformado del haz para mejorar la seguridad de las transmisiones es un problema aún no abordado en las WSNs, y es ahí donde radican las contribuciones de este trabajo.

3 Modelado del problema

La WSN se ha modelado sobre un volumen cúbico de 30 metros de lado en el que los sensores se despliegan de forma aleatoria (según una distribución uniforme en cada dimensión) y, una vez desplegados, son estáticos. En este tipo de redes existe un nodo distinguido, el HECN (*High Energy Communication Node* por sus siglas en inglés), que actúa como pasarela para transmitir toda la información monitorizada por los nodos de la red. Como novedad en este trabajo, se ha asumido la existencia de varios HECN en la red, incrementar también la robustez y seguridad de las soluciones propuestas en caso de que algún HECN se vea comprometido. Los sensores están equipados con una antena isotrópica, cuyo diagrama de radiación aparece en la Figura 1a. En la Figura 1b se pueden observar tres sensores equidistantes dispuestos en una línea horizontal, todos transmitiendo con la misma fase, mientras que la Figura 1c muestra un conjunto de sensores colocados aleatoriamente, y cuya fase se ha calculado para que tengan ganancia máxima en la dirección de 15° .

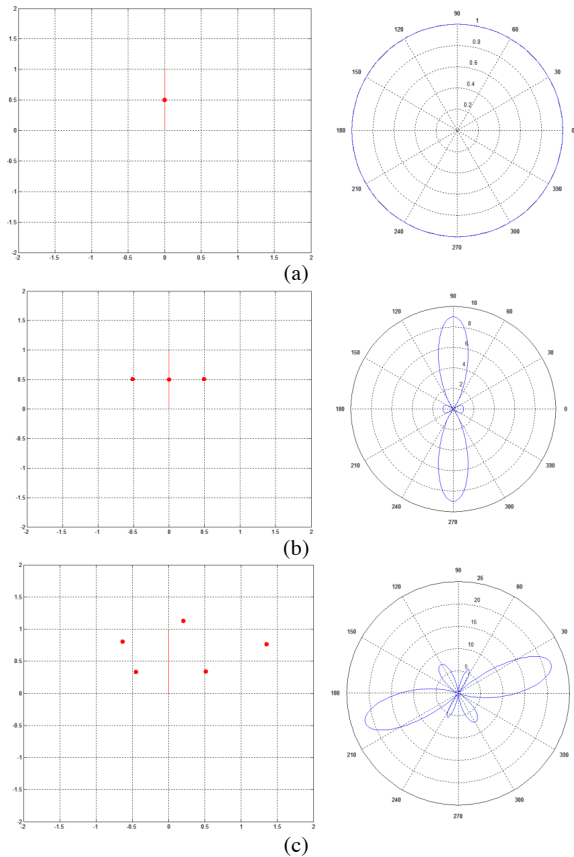


Figura 1: Diagrama de radiación de una antena isotrópica (a), tres sensores dispuestos en línea (b) y 5 sensores dispuestos aleatoriamente y con fase optimizada para apuntar a 15° (c).

Los nodos de la WSN tienen una autonomía limitada (están alimentados por baterías, no conectados a la red eléctrica) y que deben usar tanto para tareas de monitorización de su entorno, como de transmisión de datos al HECN. Se asume que la potencia total disponible para todos los sensores es la misma, pe diferencian entre sí en la cantidad de energía dedicada a la monitorización y por tanto la energía que queda disponible para la transmisión de datos. Se ha modelado esta energía con un número aleatorio distribuido uniformemente entre $[0.4, 0.6]$ (i.e., debe existir un mínimo de energía para trasmitir). Por lo tanto, la energía disponible (Ea_x) para el sensor de x ($x = 1, 2, \dots$, máximo número de sensores) es la siguiente:

$$Ea_x = E_t * F_x \quad (1)$$

donde, E_t es la energía total disponible en el sensor y F_x es el factor aleatorio descrito anteriormente. Se puede obtener la energía consumida por cada sensor (Ec_x) como:

$$Ec_x = P_{tx,x} * t_x \quad (2)$$

donde, $P_{tx,x}$ es la potencia para transmitir los datos en el sensor x , t_x es el tiempo de transmisión y la potencia disponible (Pa_x) es:

$$Pa_x = P_{tx,x} * F_x \quad (3)$$

Entonces, el máximo tiempo de vida ($t_{life,x}$) de los sensores (es decir, el tiempo máximo que pueden

operar los sensores sin vaciar la batería) se define igualando la energía consumida igual a la energía disponible, esto es:

$$E_t * F_x = P_{tx,x} * t_{life,x} \quad (4)$$

Por tanto, el tiempo de vida de cada sensor se puede expresar como sigue:

$$t_{life,x} = \frac{E_t * F_x}{P_{tx,x}}; \quad (5)$$

En la Ecuación 5, $P_{tx,x}$ 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 $P_{tx,x}$ 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:

$$P_{tx,x,B,A} = P_{tx,x} * GB; \quad (6)$$

donde $P_{tx,x,B,A}$ es la excitación en amplitud de cada sensor, $P_{tx,x,B,P}$ es la excitación en fase de cada sensor, $P_{tx,x,B}$ 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, $P_{tx,x}$ es:

$$P_{tx,x} = \frac{P_{tx,x,B}}{GB}; \quad (7)$$

Y el tiempo de vida de los sensores con conformado de haz ($t_{life,x,B}$):

$$t_{life,x} = \frac{E_t * F_x * GB}{P_{tx,x,B}}; \quad (8)$$

El objetivo de este trabajo es maximizar el tiempo de vida de la red completa de sensores. Esto significa que, con a primera función objetivo, buscaremos las excitaciones en módulo y fase para cada sensor de forma que:

$$F1 = \text{máx} \{ t_{WSN} = \min(t_{life,x,B}), \quad x \in [1, \text{max_sensors}] \} \quad (9)$$

esto es, el tiempo de vida de la red de sensores viene determinado por el primer sensor que se queda sin batería y el problema es maximizar el tiempo de vida de los sensores que es un elemento crítico en las redes de sensores. Por otra parte, la segunda función objetivo ha de minimizar la ganancia de la señal en las direcciones en las que existe un nodo enemigo. Sean e_1 a e_n los nodos enemigos existente en la WSN, y GB_1 a GB_n la ganancia de la señal en esas direcciones, calculada según (JUANFRA, pon aquí algo coherente), entonces:

$$F2 = \text{máx} \frac{1}{\sum_{i=1}^n GB_i} \quad (10)$$

y la función de fitness que combina ambos objetivos es:

$$F = a \times F1 + b \times F2,$$

siendo a y b dos constantes cuyo valor se ha establecido, respectivamente, en 1 y 10, después de experimentación preliminar.

4 Experimentos

Esta sección está dedicada a describir la experimentación realizada en este trabajo. En primer lugar se describen el algoritmo utilizado para abordar el problema de optimización definido en la sección anterior, así como la metodología experimental seguida. En segundo lugar aparecen definidos los escenarios evaluados, es decir, las distintas instancias del problema (distintas WSNs). Finalmente, la última sección se encarga de mostrar y analizar los resultados obtenidos.

4.1 Algoritmo y metodología

Se ha utilizado el GA incluido en la caja de herramientas de optimización de Matlab®. Dado que el objetivo del trabajo era la definición del problema y una primera aproximación a su resolución con metaheurísticas, se ha utilizado la configuración por defecto del GA junto con una configuración estándar: el tamaño de la población se ha establecido en 100; como operadores genéticos se han utilizado la

selección por resto, cruce heurístico (con una probabilidad de 0.8), y una mutación uniforme (probabilidad de 0.1); por último, la condición de parada es realizar 100 generaciones. Dada la naturaleza estocástica del algoritmo, los resultados presentados están promediados sobre 30 ejecuciones independientes.

4.2 Escenarios

Se han diseñado cuatro escenarios diferentes para evaluar si el *beamforming* colaborativo es capaz de servir, a la vez, para mejorar la eficiencia energética de la WSN, así como introducir una capa de mejora de seguridad en la misma. En el primer caso (Escenario A), los sensores de la WSN han de transmitir la información monitorizada a un HECN, a la vez que ciega (evita irradiar) de 1 a 5 direcciones donde están ubicados hasta 5 nodos enemigos (subescenarios A1 a A5). El Escenario B considera la transmisión simultánea a 2 HECNs y evitando dar cobertura en 1 dirección. El Escenario C está definido de forma que los nodos transmiten a 3 HECNs y ciegan 2 direcciones de nodos enemigos. Y, finalmente, en el Escenario D, se ha de transmitir simultáneamente a 4 HECNs y evitar a 3 nodos enemigos. La descripción de todos los parámetros de los escenarios se incluye en las Tablas 1, 2 y 3. La disposición de los nodos queda recogida gráficamente en la Figura 2: Representación gráfica de la posición de los HECNs y los nodos enemigos. En todos los casos se han evaluado configuraciones con 10, 20 y 50 sensores.

Escenarios	Número de HECNs	Número de nodos enemigos (EN)
A1 a A5	1	1 a 5
B	2	1
C	3	2
D	4	3

Tabla 1: Características principales de los escenarios definidos.

	HECN 1	HECN 2	HECN 3	HECN 4
(x,y,z)	(115, 65, 45)	(115, -50, 45)	(-100, 65, 45)	(-100, 65, 45)
(d, θ , ϕ)	(115.7 m, 74°, 26°)	(122.9 m, 75°, 326°)	(128.9 m, 76°, 156°)	(135.4 m, 77°, 209°)

Tabla 2: Posiciones de los HECNs.

	EN 1	EN 2	EN 3	EN 4	EN 5
(x,y,z)	(120, -80, 20)	(-120, -90, 20)	(130, -180, 30)	(-140, 190, 10)	(200, 150, 20)
(d, θ , ϕ)	(141.6 m, 87°, 317°)	(171.1 m, 88°, 217)	(226.8 m, 86°, 300°)	(233.8 m, 91°, 131°)	(229.0 m, 88°, 36°)

Tabla 3: Posiciones de los nodos enemigos.

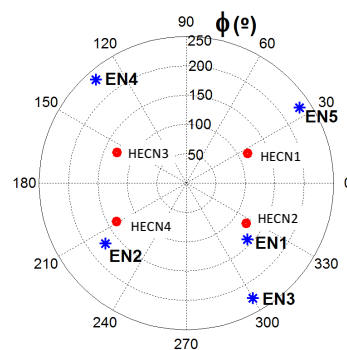


Figura 2: Representación gráfica de la posición de los HECNs y los nodos enemigos.

4.3 Resultados

Esta sección, a su vez, se subdivide en el análisis, primero, de los Escenarios A1 a A5, ya que su configuración es creciente respecto del número de nodos enemigos y, posteriormente, los Escenarios B, C y D, donde también se incrementa el número de HECNs y, consecuentemente, la complejidad del problema.

4.3.1 Escenarios A1 a A5

En este conjunto de escenarios se evalúa la capacidad del algoritmo para evitar irradiar, es decir, impedir que haya transmisión de datos, a un número creciente de direcciones donde están ubicados nodos enemigos. Los resultados se analizan, primero, desde el punto de vista de la ganancia en tiempo de vida respecto a la misma WSN pero sin usar *beamforming* y, segundo, desde el punto de vista de la seguridad.

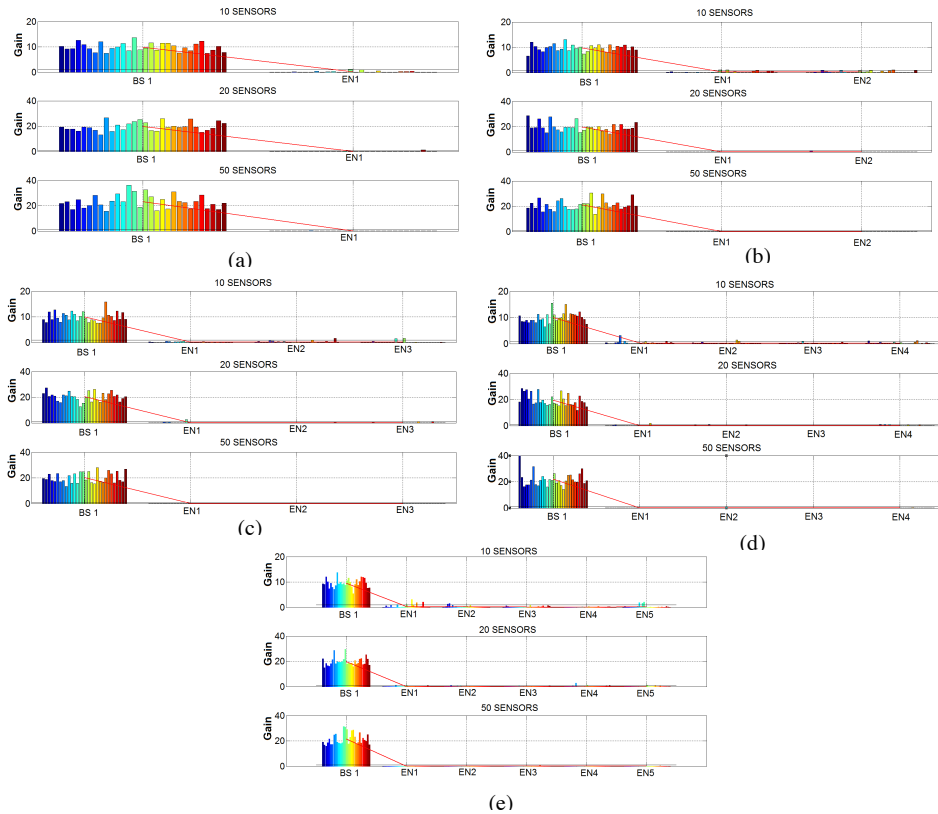


Figura 3: Ganancia del tiempo de vida para los casos A1 (a), A2 (b), A3 (c), A4 (d) y A5 (e).

Las subfiguras 3a a 3d muestran la ganancia en el tiempo de vida de la WSN con 10, 20 y 50 sensores (con respecto a la red que donde no se aplica *beamforming*). Las columnas muestran el resultado de cada ejecución independiente. Hay varias conclusiones que se pueden extraer de los resultados obtenidos. Por

un lado, en todos los casos, el *beamforming* ha permitido alargar el tiempo de vida de las redes resultantes, es decir, el GA ha sido capaz de encontrar configuraciones de amplitud y fase para las antenas de los nodos de forma que las comunicaciones inalámbricas sean más eficientes. Por otro lado, implicar un mayor número de sensores a la hora de conformar el haz permite una mayor directividad del mismo, lo que permite aumentar más la ganancia (más tiempo de vida). Las gráficas también muestran como los nodos enemigos no ven modificado su tiempo de vida, salvo algún efecto lateral provocado por el cálculo de la señal en escenario donde nodo enemigo y HECN están en la misma dirección (Figura 2).

Escenario	Nº de sensores	HECN 1	EN 1	EN 2	EN 3	EN 4	EN 5
A1	10	9.79	-2.48	----	----	----	----
	20	12.51	-2.96	----	----	----	----
	50	15.60	-1.35	----	----	----	----
A2	10	9.81	-2.33	-0.49	----	----	----
	20	12.46	-4.41	-1.44	----	----	----
	50	15.53	-2.51	-3.42	----	----	----
A3	10	9.80	-0.39	-1.23	-4.30	----	----
	20	12.53	-1.34	-1.94	-2.59	----	----
	50	15.58	-1.04	-5.00	-1.45	----	----
A4	10	9.81	-0.26	-3.90	-1.98	-3.74	----
	20	12.48	-3.85	-1.39	-3.65	-1.55	----
	50	15.66	-2.57	-4.19	-1.76	-0.96	----
A5	10	9.82	-1.33	-2.55	-1.54	-2.86	-2.53
	20	12.50	-0.40	-3.45	-2.48	-3.02	-3.86
	50	15.58	-2.93	-3.32	-2.57	-2.94	-3.35

Tabla 4: Directividad del haz en cada escenario para el HECN1 y los nodos enemigos.

Respecto a la capacidad del algoritmo para evitar nodos enemigos, la Tabla 4 muestra la directividad media sobre las 30 ejecuciones del haz conformado con las antenas de los nodos de la WNS con respecto al HECN1 en cada uno de los 5 escenarios (con 1 a 5 nodos enemigos, respectivamente). Se entiende la directividad como la potencia que se gana respecto al equivalente de una antena isotrópica. Así, una directividad negativa significa que se pierde potencia respecto a la configuración base sin *beamforming*, que es lo que, en definitiva, se pretende. Los resultados obtenidos por el GA son muy satisfactorios ya que, como se puede observar, en todos los casos la directividad es negativa para los nodos enemigos. Hay que destacar, no obstante, varias observaciones adicionales importantes. Primero, más nodos permite alcanzar directividades más altas, siendo un resultado esperado ya que resulta más fácil conformar el haz con más elementos. Segundo, más nodos también supone evitar irradiar señal hacia zonas donde hay nodos enemigos (las menores directividades se producen con un mayor número de nodos). Y, finalmente, es especialmente importante relevante el resultado en el escenario A5, donde el EN5 está en la misma dirección del HECN1, y cuya directividad ahí es de las más bajas de los nodos enemigos.

4.3.2 Escenarios B, C y D

En estos escenarios, el número de sensores considerados es de 20 y 50, ya que un número menor impide alcanzar correctamente las direcciones de los HECNs de la red y, a la vez, múltiples nullos (en la dirección de los nodos enemigos). El análisis de los resultados se estructura de la misma forma que en el apartado anterior, primero evaluando las ganancias en el tiempo de vida (F1) y después la seguridad de las transmisiones (F2).

Para poder realizar una comparación correcta, la ganancia en el tiempo de vida de la red con y sin *beamforming* se calcula para los HECNs y los nodos enemigos, teniendo en cuenta que el caso base sólo transmite a un HECN, mientras que en los escenarios B, C y D se transmite, respectivamente, a 2, 3, y 4 HECNs (ver Tabla 1).

La Tabla 5 incluye los resultados de la ganancia en el tiempo de vida de la WSN medida como la mejora, en cada HECN, respecto a lo que supondría no usar *beamforming*. Las principales conclusiones que se pueden sacar son las siguientes. Todas las ganancias son mayores que 1, lo que supone un mayor tiempo de vida. Hay una excepción, Escenario D con 50 sensores, que se analiza más abajo. En general, hacer que el conformado del haz alcance a más de un HECN complica el problema, y las ganancias, en general se reducen. También se observa una pérdida de ganancia cuando pasamos de 20 a 50 sensores. Si bien más sensores permiten una mejor conformación del haz, cuando el problema base se complica (más de un HECN), el GA encuentra problemas en encontrar configuraciones de amplitud y fase adecuadas para más sensores (espacio de búsqueda más grande). Respecto a los nodos enemigos, al igual que ocurría en el caso anterior, la herramienta proporciona ganancias superiores a cero debido a efectos laterales del cálculo de la señal en direcciones donde se encuentran nodos enemigos y HECNs. Por último, comentar el caso del Escenario D con 50 sensores, donde se obtiene una ganancia por debajo de 1 en el que, a pesar de que a priori podría suponer una pérdida de ganancia, i.e., un tiempo de vida más corto, la WSN sigue ahorrando energía puesto que se está transmitiendo a 4 HECNs a la vez y el caso de referencia sólo transmite a un HECN. Para ilustrar este caso mejor, la Figura 4 muestra el resultado de todas las ejecuciones independientes, donde se puede observar que en ningún caso hay un valor por debajo de 0.25, el límite en el que se considera que la WSN no ahorra energía.

	Nº de Sensores	HECN 1	HECN 2	HECN 3	HECN 4	EN 1	EN 2	EN 3
B	20	5.665	7.011	-----	-----	0.119	-----	-----
	50	4.919	6.245	-----	-----	0.008	-----	-----
C	20	2.189	2.740	3.362	-----	0.109	0.156	-----
	50	1.989	2.486	3.012	-----	0.053	0.022	-----
D	20	1.102	1.349	1.596	1.929	0.065	0.181	0.114
	50	0.960	1.227	1.426	1.739	0.021	0.012	0.030

Tabla 5: Ganancia en el tiempo de vida para los HECNs y los nodos enemigos en los Escenarios B, C y D.

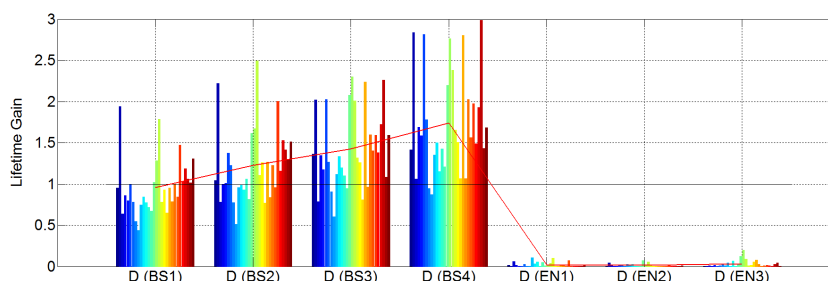


Figura 4: Ganancia de tiempo de vida para el Escenario D y 50 sensores (4 HECNs y 3 nodos enemigos).

Finalmente, para mostrar la efectividad del GA para poder crear nulos (evitar transmisiones) hacia los nodos enemigos, la Figura 5 incluye (a) la directividad media de los HECNs y (b) la de los nodos enemigos. En las gráficas se puede observar que la directividad es elevada cuando el número de HECNs es pequeño, ya que el problema se simplifica (hay que conformar un haz más simple). Por la configuración de los escenarios, también se puede observar que la directividad del HECN_i es menor que la del HECN_j, cuando $i < j$. También es necesario remarcar que la directividad en las direcciones de los nodos enemigos está siempre por debajo de 0 dB, es decir, que se evita cubrir esas zonas del área de trabajo que podrían estar comprometidas.

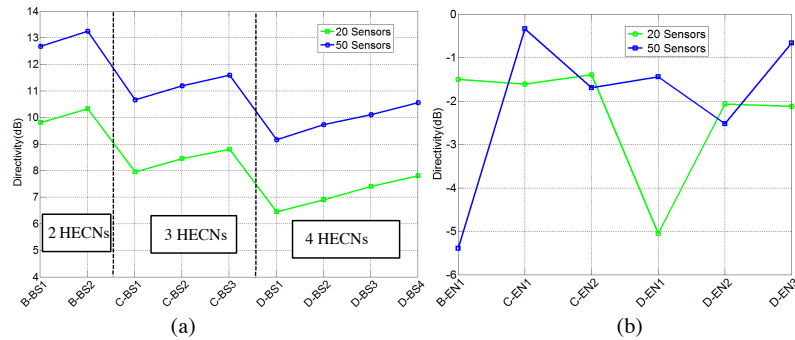


Figura 5: Directividad en diferentes escenarios para (a) HECNs y (b) nodos enemigos.

5 Conclusiones

En este trabajo se ha utilizado la técnica de conformado del haz o *beamforming* dentro del contexto de la WSNs con un doble objetivo como herramienta, por una parte, para mejorar el consumo energético de las mismas, a través de comunicaciones inalámbricas más eficientes y, por otra, para añadir una capa de seguridad adicional que evita transmitir señales hacia regiones del área de trabajo donde existen nodos enemigos (que pueden modelar desde zonas con interferencias hasta elementos no autorizados). El problema de optimización subyacente consiste en asignar los parámetros de alimentación de las antenas instaladas en los nodos de la WSN (amplitud y fase de cada uno de ellos) para realizar el conformado del haz atendiendo a los dos criterios anteriores.

El algoritmo utilizado para afrontar este problema es un GA clásico que, evaluado sobre 8 escenarios distintos (A1 a A5, B, C y D) que modelan WSNs con uno o varios HECNs y uno o varios nodos enemigos, ha obtenido resultados muy satisfactorios. Así, se han obtenido configuraciones en el que el tiempo de vida se ha alargado considerablemente a la vez que se ha podido cegar (dejar de irradiar) hasta 5 nodos enemigos, simplemente ajustando la amplitud y fase de las antenas de los nodos (dispuestos aleatoriamente en el área de trabajo).

Hasta donde conocen los autores de este trabajo, el uso de *beamforming* no se ha usado previamente para alcanzar estos dos objetivos simultáneamente (eficiencia energética y seguridad). Como líneas de trabajo futuro se encuentran, desde el punto de vista del problema, el análisis de la complejidad cuando se incrementa el número de nodos y las áreas de trabajo de las WSNs consideradas, cuando hay que realizar varios saltos desde un nodo para alcanzar un HECN (hay otros nodos que han de actuar de relays) así como dotar a la red de tolerancia a fallos ante la caída circunstancial de uno de los nodos que la componen. Desde el punto de vista algorítmico, se pretende evaluar el problema con otras metaheurísticas clásicas de la literatura, así como el desarrollo de operadores específicos que permitan mejorar la capacidad de búsqueda de las mismas. La resolución de escenario reales es, claramente, otra línea de trabajo que se abordará en el futuro.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Economía y Competitividad con el proyecto TIN2016-75097-P. Francisco Luna también agradece la ayuda de la Universidad de Málaga, Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech.

Referencias

- [1] J. E. Agudo, J. F. Valenzuela-Valdés, F. Luna, R. M. Luque-Baena, P. Padilla, "Analysis of beamforming for improving the energy efficiency in wireless sensor networks with metaheuristics", *Progress in Artificial Intelligence*, 2016 (Article in press) doi: 10.1007/s13748-016-0087-z.
- [2] M. F. A. Ahmed and S. A. Vorobyov, "Collaborative beamforming for wireless sensor networks with Gaussian distributed sensor nodes," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 2, pp. 638-643, Feb. 2009.

-
- [3] T. Bäck, D. Fogel, Z. Michalewicz (eds), *Handbook of Evolutionary Computation*, Oxford University Press, 1997.
- [4] B. Béjar Haro, S. Zazo and D. P. Palomar, "Energy Efficient Collaborative Beamforming in Wireless Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 2, pp. 496-510, Jan.15, 2014.
- [5] J. C. Chen, C. K. Wen and K. K. Wong, "An Efficient Sensor-Node Selection Algorithm for Side-lobe Control in Collaborative Beamforming," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 8, pp. 5984-5994, Aug. 2016.
- [6] J. Du, E. Kranakis, O. Morales, S. Rajsbaum "Neighbor Discovery in a Sensor Network with Directional Antennae", *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks (2016)*, Volume 30, Number 3-4, pp. 261-286.
- [7] J. Feng; Y.-H. Lu; B. Jung; D. Peroulis, "Energy efficient collaborative beamforming in wireless sensor networks,". *ISCAS 2009. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2 Taipei 4-27 May 2009.
- [8] A. B. Gershman, N. D. Sidiropoulos, S. Shahbazpanahi, M. Bengtsson and B. Ottersten, "Convex Optimization-Based Beamforming," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 27, no. 3, pp. 62-75, May 2010.
- [9] Z. Han and H. V. Poor, "Lifetime improvement in wireless sensor networks via collaborative beamforming and cooperative transmission," in *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 1, no. 6, pp. 1103-1110, Dec. 2007.
- [10] R. Mudumbai, G. Barriac and U. Madhow, "On the Feasibility of Distributed Beamforming in Wireless Networks," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 5, pp. 1754-1763, May 2007.
- [11] R. Mudumbai, D. R. Brown Iii, U. Madhow and H. V. Poor, "Distributed transmit beamforming: challenges and recent progress," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 2, pp. 102-110, February 2009
- [12] H. Ochiai, P. Mitran, H. V. Poor and V. Tarokh, "Collaborative beamforming for distributed wireless ad hoc sensor networks," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, no. 11, pp. 4110-4124, Nov. 2005.
- [13] F. Porcel-Rodríguez, J. Valenzuela-Valdés, Pablo Padilla, F. Luna-Valero, R. Luque-Baena and M. Á. López-Gordo "Clustering and Beamforming for Efficient Communication in Wireless Sensor Networks" *Sensors* 2016, 16(8), 1334; doi:10.3390/s16081334
- [14] J.F. Valenzuela-Valdés, F. Luna, R. M. Luque, P. Padilla, "Saving energy in WSNs with beamforming", 2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking (CloudNet), Luxembourg, October 8-10 pp. 255-260, 2014.
- [15] J.F. Valenzuela-Valdés, F. Luna, P. Padilla, J.L. Padilla, R. M. Luque, J.E. Agudo, "Securing and Greening Wireless Sensor Networks with Beamforming", *Mobile Networks and Applications* (2016). doi:10.1007/s11036-016-0785-6.
- [16] J. Xu, Z. Zhong and B. Ai, "Wireless Powered Sensor Networks: Collaborative Energy Beamforming Considering Sensing and Circuit Power Consumption," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 344-347, Aug. 2016.
- [17] K. Zarifi, S. Affes and A. Ghayeb, "Collaborative Null-Steering Beamforming for Uniformly Distributed Wireless Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 3, pp. 1889-1903, March 2010.
- [18] K. Zarifi, A. Ghayeb and S. Affes, "Distributed Beamforming for Wireless Sensor Networks With Improved Graph Connectivity and Energy Efficiency," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 3, pp. 1904-1921, March 2010.