**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 = 45º, phi = 0º, por ejemplo). En el apartado siguiente, el apartado XXXESTACIONES\_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 XXXCOMPARATIVA DE CASOS. A continuación, se presentan todos los casos.

**--Caso 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.
* *φ* = 0º, *φ* = 45º. *θ* = 45º.
* 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 = 0º 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] º, solo existe la mitad de arriba en esta representación.

 

Fig. XXX0. Caso 1, 2 sensores, antenas isotrópicas. *ϕ* = 0º, *θ* = (º) Fig. XXX1. Caso 1, 2 sensores, antenas dipolo. *ϕ* = 0º, *θ* = (º)

 

Fig. . Caso 1, 2 sensores, antenas isotrópicas. *ϕ* = 45º, *θ* = (º) Fig. XXX2. Caso 1, 2 sensores, antenas dipolo. *ϕ* = 45º, *θ* = (º)

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 X2, 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 = 0º, theta = 45º, 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. . Caso 1, 5 sensores, antenas isotrópicas. *ϕ* = 0º, *θ* = (º) Fig. . Caso 1, 5 sensores, antenas dipolo. *ϕ* = 0º, *θ* = (º)

 

Fig. . Caso 1, 10 sensores, antenas isotrópicas. *ϕ* = 0º, *θ* = (º) Fig. . Caso 1, 10sensores, antenas dipolo. *ϕ* = 0º, *θ* = (º)

 

Fig. . Caso 1, 20 sensores, antenas isotrópicas. *ϕ* = 0º, *θ* = (º) Fig. . Caso 1, 20 sensores, antenas dipolo. *ϕ* = 0º, *θ* = (º)

 

Fig. . Caso 1, 50 sensores, antenas isotrópicas. *ϕ* = 0º, *θ* = (º) Fig. . Caso 1, 50 sensores, antenas dipolo. *ϕ* = 0º, *θ* = (º)

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.

**---Clusters 1**

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.



XXX3

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, 20 y 50), además, del ángulo *φ* para el que se realiza la optimización (en todos los casos el ángulo *θ* es 45º). 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 *σ*. 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.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Eficiencia, antenas isotrópicas** | | | | **Eficiencia, antenas dipolo** | | | |
| ***φ* = 0** | | ***φ* = 45º** | | ***φ* = 0** | | ***φ* = 45º** | |
| **Nº de sensores** | **Media** | ***σ*** | **Media** | ***σ*** | **Media** | ***σ*** | **Media** | ***σ*** |
| **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 . Caso 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:

|  |  |
| --- | --- |
| **Resultados globales** | |
| **Nº de sensores** | **Media** | ***σ*** |
| **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 . Caso 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 nulos en su eje, si vemos las figuras XXX1 y XXX2, 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 *φ* 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·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 XXX3, 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·*T*), frente al tiempo que necesitan los 20 sensores para transmitir (20·*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.

**---Clusters 2**

Al lanzar las ejecuciones de este caso, se decide, además, hacer que la variable *clusters\_fijados* sea igual a 2. A continuación se presentan las gráficas que las de la figura XXX3, 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.



XXX10

Se presentan ahora las tablas que resumen estas gráficas:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Eficiencia, antenas isotrópicas** | | | | **Eficiencia, antenas dipolo** | | | |
| ***φ* = 0** | | ***φ* = 45º** | | ***φ* = 0** | | ***φ* = 45º** | |
| **Nº de sensores** | **Media** | ***σ*** | **Media** | ***σ*** | **Media** | ***σ*** | **Media** | ***σ*** |
| **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 XXX12. Caso 1. Clusters: 2.

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:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Resultados globales 2 clusters** | | **Respecto a 1 cluster** | |
| **Nº de sensores** | **Media** | ***σ*** | **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 XXX15. Caso 1. Resultados globales. Clusters: 2.

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 XXX10 y la tabla XXX12, 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·*T* frente a 50·*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·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.



XXX3000

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.

**---Clusters 3**

Veamos a continuación qué ocurre cuando fijamos la variable *clusters\_fijados* = 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).



Las tablas obtenidas son:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Eficiencia, antenas isotrópicas** | | | | **Eficiencia, antenas dipolo** | | | |
| ***φ* = 0** | | ***φ* = 45º** | | ***φ* = 0** | | ***φ* = 45º** | |
| **Nº de sensores** | **Media** | ***σ*** | **Media** | ***σ*** | **Media** | ***σ*** | **Media** | ***σ*** |
| **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 . Caso 1. Clusters: 3.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Resultados globales 3 clusters** | | **Respecto a 1 cluster** | |
| **Nº de sensores** | **Media** | ***σ*** | **Media** | **%** |
| **20** | 2.943 | 0.624 | -5.518 | -65.218 |
| **50** | 3.381 | 0.713 | -4.505 | -57.125 |

Tabla XXX30. Caso 1. Resultados globales. Clusters: 3.

Analizando la tabla XXX30, 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%.

**---Clusters fijados**

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 = 45º, phi = 0º; en segundo lugar, el ángulo theta = 45º, phi = 45º.





|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Eficiencia, antenas isotrópicas** | | | | **Eficiencia, antenas dipolo** | | | |
| ***φ* = 0** | | ***φ* = 45º** | | ***φ* = 0** | | ***φ* = 45º** | |
| **Nº de sensores** | **Media** | ***σ*** | **Media** | ***σ*** | **Media** | ***σ*** | **Media** | ***σ*** |
| **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. Caso 1. Clusters: optimizados.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Resultados globales clusters optimizados** | | **Respecto a 1 cluster** | | | |
| **Nº de sensores** | **Media** | ***σ*** | **Media** | **% (media)** | ***σ*** | **%**  **(*σ)*** |
| **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 XXX50. Caso 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 XXX50. 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 XXX15), 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 XXX, 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.

**--Comparativa 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.



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 XXXAPARTADO\_DE\_ESTE\_CASO\_DE\_ESTUDIO\_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 XXX\_CASOS\_NUEVOS, 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.