1. **Título**

Bueno, hola a todos, mi nombre es Francisco Porcel y les voy a presentar mi Trabajo Fin de Grado llamado “Optimización de la energía en redes de sensores”.

1. **Índice**

En esta diapositiva, podemos ver el índice de esta presentación. En primer lugar, comentaré los antecedentes que motivan la realización de este proyecto en el apartado de introducción; a continuación, explicaré los objetivos que se pretenden conseguir. Posteriormente, comentaré algunos conceptos teóricos básicos para poder entender los experimentos que se han llevado a cabo en este apartado llamado Casos de estudio. Finalmente, hablaré sobre la planificación que se ha seguido para poder acometer este proyecto y un presupuesto adecuado en caso de que se tratara de un proyecto profesional. Posteriormente, comentaré las líneas de investigación futuras y las conclusiones.

1. **Introducción**

En primer lugar, comenzaré por el apartado de introducción y me gustaría explicar lo que es una Wireless Sensor Network o WSN. Las WSNs consisten en una red de sensores autónomos y espacialmente distribuidos para medir condiciones del medioambiente, prevenir incendios, detectar químicos, misiones de vigilancia o detectar terremotos, entre otras muchas aplicaciones. Además, se espera que se usen en la nueva generación de dispositivos móviles 5G.

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 lugares en la que la presencia humana es arriesgada o incluso imposible.

El principal factor por el cual se consume energía en las WSNs es la potencia necesaria para poder transmitir los datos captados a través de la antena de los sensores, es decir, la comunicación. Para ello, en este proyecto se propone utilizar el beamforming para maximizar el tiempo de vida de los sensores. Mediante el beamforming se tratará de conformar haces en la dirección de radiación en la que se desee radiar, la de una estación base. Con ello, aumentará la directividad en esa dirección.

Sin embargo, conformar haces en un array de antenas no es tarea fácil cuando dichas antenas se encuentran arbitrariamente distribuidas en un plano o, incluso, en un espacio tridimensional.

Por ello, será necesario implementar una técnica de optimización que permita calcular las amplitudes y fases de cada antena, de manera que el diagrama de radiación del array que forman presente un lóbulo principal orientado en la dirección de la estación base. Esta técnica será los algoritmos genéticos.

1. **Objetivos del proyecto**
2. Como ya he comentado, el objetivo principal será prolongar la vida de los sensores con respecto a otra red que presente las mismas características.
3. Conseguir conformar el haz en escenarios bidimensionales.
4. Conseguir conformar el haz en escenarios tridimensionales.
5. Aumentar la eficiencia no solo en direcciones de radiación genéricas y comunes a todos los sensores, sino en la dirección de una estación base con coordenadas concretas, de forma que la dirección de radiación sea distinta para cada sensor.
6. Aumentar la eficiencia en escenarios con estaciones base y reducir la directividad en direcciones en las que existen nodos enemigos, para que les sea más difícil interceptar nuestras comunicaciones.
7. Hacer que el algoritmo sea lo suficientemente versátil como para poder simular escenarios distintos y aumentar la eficiencia en ellos.
8. **Análisis teórico: Beamforming**

Ahora, comentaré en qué consiste el beamforming. En esta diapositiva, se muestra un diagrama de radiación de una antena dipolo. Dado que se trata de una antena funcionando de manera independiente presenta como característica un gran ancho de haz, por lo que conlleva una baja directividad, de modo que se desaprovecha la potencia de radiación. Si agrupamos varias antenas lineales, se tendrá un array, cuyo diagrama de radiación puede modelarse.

1. **Análisis teórico: Beamforming**

Para ello, se emplea el beamforming, que consiste en disponer ciertas amplitudes y desfases entre los sensores para que el diagrama de radiación presente un lóbulo principal en la dirección de radiación deseada.

Como vemos aquí, se tienen siete sensores equiespaciados a lo largo de un eje radiando con la misma potencia. Si se varía el desfase progresivo entre ellos, se tendrá un lóbulo principal en la dirección que se desee, incrementando así la directividad en dicha dirección, aprovechando mejor la potencia.

Las técnicas existentes suponen que los sensores se dispongan de forma muy especial para poder llevar a cabo el beamforming. Sin embargo, una WSN no presentará estas condiciones especiales de distribución de los sensores. La toolbox de MATLAB utilizada en el proyecto permite calcular el campo de cualquier array. Sin embargo, para poder utilizarla, es necesario asignar las fases y amplitudes óptimas a cada antena, es decir, es necesario algún algoritmo de optimización. Solución: algoritmos genéticos.

1. **Análisis teórico: Algoritmos genéticos**

Los algoritmos genéticos nos permitirán asignar a los sensores unas fases y amplitudes óptimas para llevar a cabo el beamforming.

Consisten en una búsqueda heurística que imita las ideas evolutivas de la selección natural y la genética, ideadas por Charles Darwin. 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. Esta población serán las variables de amplitud y fase.

De esta manera, en cada generación se varía la amplitud y la fase de cada antena, quedándose con el conjunto que mejor tiempo de vida presente. Solución a optimizar: maximizar el tiempo de vida del sensor que primero se agote, si prolongamos dicho tiempo de vida, prolongaremos también el del resto de sensores.

1. **Análisis teórico: Tiempo de vida**

A continuación, se explicará cómo calcular la mejora del tiempo de vida de los sensores, o lo que denominaremos como eficiencia y es el mínimo tiempo de vida de los sensores que usan beamforming entre el mínimo tiempo de vida de sensores situados en las mismas posiciones y con las mismas características que radian de forma independiente. Así, si la eficiencia es superior a la unidad significa que estamos prolongando el tiempo de vida de los sensores.

El tiempo de vida de cada sensor que usa beamforming se define como tal, siendo este término la carga de batería disponible, este de aquí es la potencia de radiación de ese sensor y esta será la ganancia del beamforming. Como vemos, la diferencia que existe entre el tiempo de vida de los sensores que usan beamforming frente al tiempo de vida de aquellos que no lo usan es el término de ganancia.

La ganancia obtenida al usar beamforming se define aquí abajo como la directividad en la radiación deseada del array de sensores que usan beamforming entre la directividad al no usar beamforming, por 1 partido de la cantidad de sensores que usan beamforming por el tiempo de sincronismo entre sensores.

Así, como vemos, una alta directividad en la dirección deseada para los sensores que usan beamforming supondrá un aumento del tiempo de vida de los sensores. Sin embargo, una cantidad elevada de sensores podría llegar a reducir este tiempo de vida, debido al parámetro XB, que se debe al tiempo que han de transmitir los sensores que usan beamforming. El tiempo de sincronismo también aumenta a medida que aumenta la cantidad de sensores.

1. **Análisis teórico: ejemplo**

A continuación, expondré un ejemplo para clarificar en qué consiste esto del beamforming. Como vemos, aquí se encuentran cinco sensores equiespaciados dispuestos en un eje, radiando todos con la misma potencia (20 dBV) y con un desfase progresivo de 180º. La dirección en la que se desea radiar viene indicada por la línea negra. La directividad en esa dirección es alta debido a que existe un lóbulo principal en esa dirección, 6.981 dBi.

Sin embargo, en esta imagen se tienen los mismos sensores con las mismas características de amplitud y fases, pero distribuidos aleatoriamente en un plano. Como vemos, ya no se presenta un lóbulo en la dirección de radiación deseada y la directividad en esa dirección será de -6.875 dBi, de manera que se está desperdiciando la potencia de radiación en direcciones que no nos interesan. Si aplicáramos el beamforming a este mismo escenario…

1. **Análisis teórico: ejemplo**

se puede conseguir este diagrama de radiación, cuya directividad en la dirección deseada es más de 13 dBi superior. Como vemos, se ha conseguido situar un lóbulo principal en la dirección de radiación deseada. Además, se ha reducido la potencia de radiación de cada sensor por debajo de los 3 dBV. En esta tabla, vemos la potencia de cada sensor, junto con el desfase y el tiempo de vida de cada uno.

De este modo, se está malgastando gran cantidad de potencia (en el malo), ya que la estación base estará recibiendo una menor potencia. Al usar beamforming, en este escenario con mayor directividad en la dirección deseada, la eficiencia alcanzada es de 4, de manera que utilizando el beamforming se prolongaría la vida de los sensores 4 veces. De esta manera, supongamos que esta misma red en una situación real se despliega en cierto lugar con el fin de que sus baterías duren 1 año; si usaran beamforming, durarían 4 años.

1. **Casos de estudio: Perspectiva general**

A continuación, pasaré a explicar los distintos escenarios que se estudian a lo largo del proyecto. Como podemos ver, la realización práctica de este proyecto se basa en 10 casos de estudio. Los cuatro primeros consisten en WSNs cuya estación base se encuentra muy alejada, de forma que se puede suponer que la dirección en la que ha de radiar cada sensor es la misma. Así, la amplitud del diagrama de radiación en dicha dirección para cada sensor será la misma. Para las antenas que no sean isotrópicas, esto será de vital importancia. En el resto de casos de estudio, se supondrán estaciones base con coordenadas específicas, de manera que la dirección en la que los sensores deberían radiar sería distinta para todos ellos.

La cantidad de sensores para los distintos experimentos se muestra en esta columna, contando con redes de 2 sensores hasta redes de 50 sensores. Además, se considerarán escenarios formados por sensores con antenas isotrópicas o antenas dipolo. Un aspecto importante de un típico escenario WSN es la carga de la batería, que puede ser igual para todos los sensores o que varíe de unos sensores a otros. Se realizarán también experimentos en espacios bidimensionales y tridimensionales.

1. **Casos de estudio 1 – 4, dirección genérica**

A continuación, comentaré las conclusiones extraídas a partir de los primeros cuatro casos de estudio. Cabe mencionar que han sido muy útiles para sentar las bases del proyecto. En ellos, se ha realizado un estudio en el cual se deseaba aumentar el tiempo de vida de los sensores de una WSN en la que era necesario que radiaran en una dirección genérica. Las conclusiones que pueden extraerse de dichos casos es que, con el algoritmo implementado en este proyecto, sin importar la dirección de radiación ni el tipo de antena (isotrópica o dipolo), el objetivo se conseguía de igual manera y aproximadamente con los mismos resultados.

Además, se han obtenido resultados mejores en escenarios en los que no era posible asegurar que todos los sensores dispusieran exactamente de la misma carga de batería. Se ha observado también que el algoritmo ha asignado adecuadamente una menor potencia de radiación a los sensores con menor carga de batería, mientras que ha asignado una mayor potencia de radiación a aquellos con mayor carga, con el fin de obtener tiempos de vida más equilibrados.

Así, en el mejor de estos casos, la eficiencia media máxima alcanzada ha sido alrededor de 21 en un escenario con 50 sensores distribuidos en un espacio tridimensional con carga de batería aleatoria, como vemos en la gráfica negra. De esta forma, podría llegar a prolongarse la batería de los sensores hasta más de 21 veces. Así, si la batería de los sensores de una WSN que no usara beamforming durara un año, por ejemplo, al utilizar la tecnología estudiada en este proyecto, la batería de estos sensores podría durar hasta 21 años.

1. **Casos de estudio: 1 – 4, eficiencia máxima**

Hasta ahora, siempre que se ha mencionado la eficiencia, ha sido referida a los sensores que primero agotarían su batería, es decir, la eficiencia mínima. A continuación, se plantea el estudio de la eficiencia referida a aquel sensor que más tiempo tome en agotar su batería. Una vez realizado el análisis desde ese punto de vista, se tienen estas gráficas que aumentan de forma lineal en función de la cantidad de sensores. Así, para un escenario en 3D con carga fija (cuya eficiencia alcanzada era de 11), la eficiencia máxima obtenida ha sido de 57, de manera que el sensor que más tardaría en agotar su batería lo haría 57 veces más tarde que un sensor de una WSN que no utilizara beamforming.

1. **Casos de estudio: 5, 1 estación base**

A continuación, pasaré a explicar el caso de estudio 5, en el que la WSN ha de radiar en la dirección de una estación base. En todos los experimentos realizados ha sido mayor la eficiencia obtenida con antenas dipolo que con antenas isotrópicas, debido a las diferencias que existen entre los diagramas de radiación. En un escenario similar al que se obtenía la eficiencia de 21 en los cuatro primeros casos de estudio, en el caso de estudio 5, la eficiencia media obtenida para solo 20 sensores ha sido de 29 para antenas dipolo. De esta forma, ha sido mayor la eficiencia obtenida en un caso en el que la WSN ha de radiar en la dirección de una estación base concreta (que es más real) que en un caso en el que ha de radiar en una dirección genérica.

1. **Casos de estudio: 6, 2 estaciones base**

En el caso de estudio 6, se ha explorado la posibilidad de que la WSN deba enviar la información no solo a una estación base, sino a dos estaciones base distintas. Para ello, sería necesario establecer un lóbulo principal en las direcciones de dichas estaciones base. De esta manera, se obtendrá un valor de eficiencia en función de cada dirección, prevaleciendo como más significativa la mínima de ellas. Como vemos en estos diagramas de radiación, se ha situado un lóbulo en cada dirección.

1. **Casos de estudio: 6, 2 estaciones base**

Los resultados obtenidos han sido muy buenos, habiendo sido el mejor de ellos en un escenario tridimensional, con 20 sensores y carga aleatoria, la eficiencia ha sido de 5.9. En esta columna se tiene la eficiencia obtenida en el caso 5 y cabe destacar que la eficiencia se ha reducido bastante con respecto a los resultados obtenidos en escenarios con una sola estación base. Sin embargo, esto era de esperar, pues se han tenido que situar dos lóbulos principales y no solo uno, con la consiguiente reducción de directividad en dichas direcciones.

1. **Casos de estudio: 7, nodos enemigos**

En el caso de estudio 7, se plantea la posibilidad de utilizar el beamforming para establecer nulos en el diagrama de radiación en lugar de lóbulos principales. Con ello, se pretende que a los nodos enemigos situados en las direcciones de dichos nulos les sea muy difícil captar la información de la WSN, pues recibirán muy poca potencia. En este caso, para obtener buenos resultados, se necesitará que la eficiencia sea inferior a la unidad, lo cual significará que la directividad en esa dirección sea más baja. Los resultados obtenidos han sido muy buenos, del orden de 10-3 con dos nodos enemigos.

Sin embargo, en el caso de estudio 7 no se concibe la posibilidad de que una estación base a la que hubiera que enviar la información se encontrara en la dirección de un nulo del diagrama de radiación, haciendo que la eficiencia se redujera.

1. **Casos de estudio: 8 y 9, estaciones y nodos**

Por ello, en los casos de estudio 8 y 9 se llevan a cabo distintas simulaciones con escenarios en los que existen múltiples estaciones base y múltiples nodos enemigos.

En primer lugar, se considera un escenario con 1 estación base y 5 nodos enemigos. Como vemos en esta primera tabla, la directividad en la dirección de la estación base es elevada, mientras que la directividad en la dirección de los nodos enemigos se encuentra por debajo de los 0 dBi.

En ese mismo escenario, la eficiencia en la dirección de la estación base es muy superior a la unidad y la eficiencia para los nodos enemigos es muy inferior a la unidad.

Si se decide considerar un escenario con 3 estaciones base y 2 nodos enemigos, los resultados que se obtienen son también similares, como vemos en esta tabla de aquí abajo.

1. **Planificación y costes**

En este apartado, se explicarán brevemente las distintas fases del desarrollo del proyecto. Consisten en:

* Revisión de la bibliografía. Se estudia el ahorro de energía en WSNs y la forma de emplear los algoritmos genéticos para optimizar la vida de las baterías.
* Creación de los scripts de simulación, mediante los cuales se llevan a cabo los experimentos y que podemos encontrar en el enlace en el anexo del documento.
* Simulación de los experimentos, tras compilarlos en ejecutables.
* Se analizan los resultados tras terminar las simulaciones.
* Finalmente, se da paso a la redacción de la memoria.

De esta forma, se concluye que el tiempo necesario para poder realizar este proyecto ha sido aproximadamente de seis meses y medio. Entonces, se presenta un presupuesto en caso de que se tratara de un proyecto profesional. Con este tiempo, y suponiendo que el sueldo mensual fuera de 1 250€, junto con el coste de la herramienta MATLAB, se tiene el siguiente presupuesto, con un coste total de 8170 €.

1. **Líneas de investigación futuras**

A pesar de que en todos los casos de estudio se ha conseguido el objetivo primordial del proyecto, es decir, prolongar el tiempo de vida de las baterías de los sensores, existen ciertos aspectos que podrían mejorarse en futuras investigaciones.

Por ejemplo, podrían considerarse escenarios con antenas que tengan rotaciones distintas, o con otros tipos de antena, como la parche o la helicoidal.

Los algoritmos genéticos han resultado ser algoritmos de optimización lentos, pues han de calcular el campo generado por el array muchas veces en cada generación. Una posible línea de investigación futura podría ser implementar la optimización con un algoritmo de optimización distinto.

Otro aspecto a tratar en un futuro sería la división en clusters. A lo largo del proyecto se ha estudiado un algoritmo de división en clusters basado en distancia, el cual no tenía en cuenta las características de un array de antenas; tan solo tenía en cuenta la distancia relativa entre sensores. Dados los resultados que se han obtenido, se ha comprobado que no es adecuado. Otra forma de organizar en clusters podría servir para organizar de forma agrupada sensores con el mismo tipo de antena.

En el estudio de los diagramas de radiación de los distintos arrays mostrados a lo largo del proyecto, se ha observado un lóbulo principal muy estrecho. En una situación real, este lóbulo tan estrecho solo sería factible si la posición de los sensores fuera muy precisa y exactamente igual a la que se ha tenido en cuenta a la hora de realizar la simulación. Por ello, por motivos de tolerancia, sería interesante en futuras investigaciones hacer que este lóbulo principal sea más ancho, permitiendo así ligeras derivas en la posición de los sensores.

Por último, uno de los siguientes pasos en línea con este proyecto sería el de poder implementar en un dispositivo físico la tecnología que se ha propuesto y comprobar que los resultados se pueden llevar a cabo en un escenario real.

1. **Conclusiones**

La conclusión principal es que se ha cumplido el objetivo del proyecto en todos los casos de estudio analizados, es decir, en todos los casos se ha conseguido prolongar la vida de las baterías de los nodos que componen la red. Es también muy destacable que el beamforming haya podido llevarse a cabo adecuadamente y sin excepción a pesar de la arbitraria distribución de los nodos en la red, tanto en un espacio bidimensional como tridimensional. El resto de objetivos también se ha cumplido.

De esta forma, incluso con redes pequeñas de dos sensores, también se ha conseguido prolongar su tiempo de vida. En redes con 50 sensores, se ha conseguido una eficiencia mínima de casi 30.

Se ha conseguido salvar el límite impuesto por el tiempo de transmisión de los sensores que usan beamforming. Siendo *T* el tiempo necesario para que un sensor independiente transmita la información, el tiempo durante el cual deben transmitir los sensores con beamforming es *XB*·*T*, con XB la cantidad de sensores, de manera que las baterías se gastarían XB veces más rápido. Sin embargo, aun así, la eficiencia ha sido superior a la unidad.