



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Análisis de parámetros de la relación efectiva señal-ruido (ESNR)  
basadas en WSN para el envío de paquetes**

AUTOR:

Jara Pacheco, Paúl Andre

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de  
**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

M. Sc. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo

Guayaquil, Ecuador

11 de Septiembre del 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.  
**Jara Pacheco, Paúl Andre** como requerimiento para la obtención del título  
de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

---

M. Sc. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo

DIRECTOR DE CARRERA

---

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 11 días del mes de septiembre del año 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Jara Pacheco, Paúl Andre**

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación “**Análisis de parámetros de la relación efectiva señal-ruido (ESNR) basadas en WSN para el envío de paquetes**” previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 11 días del mes de septiembre del año 2018

EL AUTOR

---

JARA PACHECO, PAÚL ANDRE



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**AUTORIZACIÓN**

**Yo, Jara Pacheco, Paúl Andre**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “**Análisis de parámetros de la relación efectiva señal-ruido (ESNR) basadas en WSN para el envío de paquetes**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 11 días del mes de septiembre del año 2018

EL AUTOR

---

JARA PACHECO, PAÚL ANDRE

# REPORTE DE URKUND

The screenshot shows the URKUND web interface. On the left, a sidebar contains document metadata: **Documento** (Jara\_Paul\_TTFinal.docx), **Presentado** (2018-09-03 02:53), **Presentado por** (fernandopm23@hotmail.com), **Recibido** (edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com), and **Mensaje** (Análisis TT Paúl Jara). The message content states that 1% of 22 pages are text from 1 source. On the right, a table titled 'Lista de fuentes' shows a single source: 'Cabezas\_Gloria\_Final1.docx'. Below the table is a toolbar with icons for home, search, quote, and navigation, along with buttons for 'Reiniciar', 'Exportar', and 'Compartir'. A yellow warning box at the bottom right indicates '1 Advertencia'.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL  
DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN  
TELECOMUNICACIONES

TEMA:

Análisis

de parámetros de la relación efectiva señal-ruido  
(ESNR) basadas en WSN para el envío de paquetes

AUTOR: Jara Pacheco, Paúl Andre

Trabajo de Titulación

## **DEDICATORIA**

Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Mi madre Saida, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyaste. Mamá gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto te lo debo a ti y a mi padre Paul por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

Mis abuelos Carola, Lola, Arnaldo y Gonzalo por quererme y apoyarme siempre, esto también se lo debo a ustedes.

Mi hermana, Nicole Jara, por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

**EL AUTOR**

**JARA PACHECO, PAÚL ANDRE**

## **AGRADECIMIENTO**

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en mis momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Le doy gracias a mis padres Paul y Saida, por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo, por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

De igual manera agradecer a mi profesor de Investigación y de titulación de grado, M. Sc. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo por su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida, por su rectitud en su profesión como docente, por sus consejos, que ayudan a formarte como persona e investigador

**EL AUTOR**

**JARA PACHECO, PAÚL ANDRE**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**M. Sc. BOHÓRQUEZ ESCOBAR, CELSO BAYARDO**  
TUTOR

f. \_\_\_\_\_

**M. Sc. HERAS SANCHEZ, MIGUEL ARMANDO**  
DIRECTOR DE CARRERA

f. \_\_\_\_\_

**M. Sc. ZAMORA CEDEÑO, NÉSTOR ARMANDO**  
COORDINADOR DE ÁREA



## Índice General

Índice de Figuras .....	XI
Resumen .....	XIII
<b>CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	<b>2</b>
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes. ....	3
1.3. Definición del Problema.....	4
1.4. Justificación del Problema.....	4
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.....	4
1.5.1. Objetivo General.....	4
1.5.2. Objetivos Específicos. ....	4
1.6. Hipótesis.....	5
1.7. Metodología de Investigación.....	5
<b>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b> .....	<b>6</b>
2.1. Arquitectura de red de sensores inalámbricos. ....	6
2.2. Aplicaciones de WSN.....	9
2.3. Localización en WSNs. ....	10
2.4. Clasificaciones de los algoritmos de localización. ....	13
2.5. Localización secuencial en WSNs.....	18
2.6. Estimadores para localización.....	20
2.7. Detección de ubicación en WSN.....	20
2.7.1. Autenticación del par de claves. ....	21
<b>CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA PROPUESTA.</b> .....	<b>22</b>
3.1. Modelo de sistema. ....	23
3.2. Modelo de canal y señal.....	23

3.2.1. Transmisión de señal piloto en la fase de enlace descendente	23
3.2.2. Envío de paquetes en la fase de enlace ascendente.	26
3.3. Determinación del nivel de umbral óptimo.	29
3.2.3. Plan ESNR propuesto con SC.	29
3.2.4. Plan ESNR propuesto por MRC.	32
3.4. Análisis de rendimiento.	34
3.4.1. Análisis de nivel de umbral óptimo.	35
3.4.2. Análisis del estado del canal.	37
3.4.3. Análisis de eficiencia espectral.	40
3.4.4. Análisis de calidad de señal.	43
3.4.5. Análisis de eficiencia energética.	45
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	47
4.1. Conclusiones.	47
4.2. Recomendaciones.	48
Bibliografía	50

## Índice de Figuras

### Capítulo 2

Figura 2. 1: Un ejemplo de nodos de sensor. ....	8
Figura 2. 2: Algunas aplicaciones de WSN. ....	10
Figura 2. 3: WSN móviles se aplican en la localización. ....	11
Figura 2. 4: Un ejemplo de WSNs cooperativas. ....	13
Figura 2. 5: Un ejemplo de WSNs no cooperativas. ....	13
Figura 2. 6: Clasificaciones de Algoritmos de Localización. ....	14
Figura 2. 7: Diagrama de flujo para algoritmos centralizados. ....	15
Figura 2. 8: Diagrama de flujo para algoritmos distribuidos. ....	15
Figura 2. 9: Diagrama de flujo de la localización basada en rango. ....	16
Figura 2. 10: Un ejemplo de localización de nodos utilizando el algoritmo secuencial. ....	19

### Capítulo 3

Figura 3. 1: Modelo propuesto del canal descendente y señalización para el esquema de ESNR. ....	24
Figura 3. 2: Modelo propuesto del canal ascendente y señalización para el esquema de ESNR. ....	28
Figura 3. 3: Cambio del nivel de umbral óptimo para $L=2$ con la cantidad de nodos de sensor. ....	36
Figura 3. 4: Cambio del nivel de umbral óptimo para $M=4$ con la cantidad de nodos de sensor. ....	37
Figura 3. 5: Cambio de la probabilidad de transmisión exitosa de paquetes por el número de nodos sensores. ....	38
Figura 3. 6: Cambio de la probabilidad de audición nula por la cantidad de nodos. ....	39
Figura 3. 7: Cambio de probabilidad de colisión por número de nodo del sensor. ....	39
Figura 3. 8: Cambio de la eficiencia espectral para MIMO 4x2 con la cantidad de nodos de sensor. ....	41

Figura 3. 9: Cambio de la eficiencia espectral para MIMO 4x4 con la cantidad de nodos de sensor. ....	42
Figura 3. 10: Cambio de la eficiencia espectral para MIMO 4x2 con valor promedio de SNR. ....	43
Figura 3. 11: Cambio del valor promedio de SNR del paquete exitoso para MIMO 4x2 con la cantidad de nodos de sensor. ....	44

## Resumen

Se predice que las WSNs serán la tecnología de detección futura y, por lo tanto, cada vez son más importantes en una amplia gama de áreas de aplicación. El diseño de capa a capa es un nuevo enfoque prometedor para optimizar las WSNs. El trabajo de titulación se enfoca en el uso de la información del estado del canal obtenido de la capa física para un tiempo óptimo de transmisión de paquetes en la capa MAC. Es posible en la arquitectura celular aumente la eficiencia espectral del canal inalámbrico sincronizando las transmisiones de aquellos con buena conectividad mientras se retrasa la comunicación de aquellos con mala calidad de canal usando la diversidad entre los nodos del sensor. Se propone una nueva estrategia basada en el nivel de umbral sin retroalimentación que utiliza la ganancia de diversidad multiusuario en el caso distribuido para la transmisión de paquetes de enlace ascendente. Se supone que los nodos de sensor solo conocen sus propios canales, y la transferencia de paquetes desde los nodos de sensor al nodo de control se inicia cuando la calidad de canal de cualquier nodo excede el nivel de umbral predeterminado en el período de tiempo actual. Para determinar el nivel de umbral óptimo, se maximiza la probabilidad de transmisión exitosa de paquetes, en la que solo un nodo sensor envía su propio paquete en un período de tiempo bajo el modelo de colisión simplificado. Se han examinado dos modelos de sistemas diferentes en este contexto.

**Palabras claves: REDES, SENSORES, INALÁMBRICO, CANALES, UMBRAL, NODOS**

# **CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **1.1. Introducción.**

La investigación sobre redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network, WSN) comenzó en algún momento de la década de 1980, y solo desde 2001 las redes de sensores inalámbricos generaron un mayor interés desde las perspectivas industriales y de investigación. Esto es como la disponibilidad actual de componentes en miniatura económicos, con poca potencia suministrada como procesadores, radios y sensores que a menudo se integraban en un solo chip. (SoC - sistema en un chip) (Shkurti et al., 2017)

En redes inalámbricas, el uso de algoritmos de enrutamiento de unidifusión tradicional es inapropiado debido a la naturaleza de difusión y la diversidad espacial de los enlaces inalámbricos. La selección de un conjunto de N nodos como próximo salto en redes inalámbricas en lugar de un nodo aumenta la probabilidad de entrega en relación con N. Este hecho llevó a que surja un nuevo esquema de enrutamiento en la red inalámbrica en los últimos años, nombrando el enrutamiento oportunista. (Ayoubi, Zanjireh, & Sadeghi, 2018)

La red de sensores inalámbricos es la red formada por nodos pequeños, livianos e inalámbricos llamados sensores. Una red de sensores consta de un nodo receptor y nodos de sensores que pueden ir de unos pocos cientos a miles en número. Estos nodos sensores detectan sus condiciones ambientales materiales y, en consecuencia, generan información que se transmite de manera inalámbrica al nodo receptor. (Nagpurkar & Jaiswal, 2015)

Según Xiao, Sun, Xiao, Wei, & Chen, (2018) las WSN a menudo se implementan para monitorear parámetros de entornos específicos, y las comunicaciones en WSN siempre se resuelven alrededor de los contenidos del sensor.

Una red de sensores inalámbricos consta de hasta miles de dispositivos de pequeño tamaño llamados nodos de sensor. El nodo del sensor es un dispositivo autoalimentado con capacidades de procesamiento de detección y comunicación inalámbrica. La tecnología de WSN se desarrolló para aplicaciones militares, pero ahora se usa ampliamente en muchos campos, como las aplicaciones médicas y sanitarias, las aplicaciones de envidiado y hábitat, las aplicaciones industriales y civiles, las aplicaciones de automatización y la aplicación de control. (Sabor, Sasaki, Abo-Zahhad, & Ahmed, 2016)

## **1.2. Antecedentes.**

En esta sección se presentan trabajos relacionados que sirven como antecedentes al tema de titulación. A continuación, se presenta un resumen de trabajos afines a las WSNs y que están publicados en revistas científicas:

- a. Los autores Xiao et al., (2018) publican su trabajo de investigación denominada “Transmisión de mensajes eficientes basados en contenido en WSN”. La investigación generaliza dos tipos de contenidos de detección: los valores continuos y los valores discretos, y un mecanismo de transmisión de mensajes eficiente basado en contenido (Content-based Efficient Message Transmission, CEMT) y a su vez propusieron la tipología de árbol típicas en WSN.
- b. Los autores Feng, Li, Jiang, & Jing, (2017)P publican su trabajo de investigación denominada “Programación de agregación de datos restringida por retardo en redes inalámbricas de sensores”. La investigación propone un algoritmo codicioso en WSNs. Este enfoque es maximizar el número de nodos programados en cada intervalo de tiempo desde la fecha límite hasta el intervalo de tiempo 1. Los resultados de simulación muestran que el algoritmo codicioso en WSNs supera la programación dinámica en el árbol de ruta más corta y el algoritmo ingenuo en términos de efectividad y retrasar.
- c. Los autores Venkatesh et al., (2018) publican su trabajo de investigación denominado “Enrutamiento oportunista geográfico basado en dos saltos en WSN”. La investigación selecciona un nodo

de sensor de reenvío para progresar en los paquetes de datos en función de la distancia geográfica. De manera similar, el enrutamiento multi-ruta usa múltiples rutas para lograr confiabilidad y retardo. Sin embargo, el enrutamiento oportunista geográfico da como resultado una menor tasa de entrega de paquetes y una alta latencia.

### **1.3. Definición del Problema.**

Durante la búsqueda de información de trabajos de titulación en la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones sobre la relación efectiva de señal-ruido (ESNR) y que utilice algún sistema de comunicación, no fue posible encontrar temas de titulación en el repositorio de la UCSG. De acuerdo a lo indicado, surge la necesidad de realizar un Análisis de parámetros de la relación efectiva señal-ruido (ESNR) basadas en redes de sensores inalámbricos para el envío de paquetes oportunistas.

### **1.4. Justificación del Problema.**

La justificación del presente trabajo de titulación se da por el modelo del sistema y modelado del canal y señal, esto permitió la propuesta de un esquema de entrega de paquetes oportunistas en una red de sensores inalámbricos.

### **1.5. Objetivos del Problema de Investigación.**

#### **1.5.1. Objetivo General.**

Realizar el análisis de parámetros de la relación efectiva señal-ruido (ESNR) basadas en WSN para el envío de paquetes

#### **1.5.2. Objetivos Específicos.**

- Describir la fundamentación teórica de las redes de sensores inalámbricos, sus arquitecturas y aplicaciones.
- Proponer el esquema de entrega de paquetes oportunista para organizar la entrega de paquetes en el canal de enlace ascendente en las redes de sensores inalámbricos de arquitectura celular.
- Analizar los parámetros de la relación efectiva señal-ruido (ESNR) basadas en una red de sensores inalámbricos para enviar paquetes.



## **1.6. Hipótesis.**

Mediante el análisis de parámetros de la relación efectiva señal-ruido (ESNR) basadas en WSN para el envío de paquetes se demostrará la funcionalidad del sistema propuesto en la entrega de paquetes.

## **1.7. Metodología de Investigación.**

Los métodos de investigación incluyen todas aquellas técnicas/métodos que se adoptan para realizar investigaciones. Por otro lado, la metodología de investigación es la forma en que los problemas de investigación se resuelven sistemáticamente. En la metodología de Investigación, el investigador se familiariza con los diversos pasos generalmente adoptados para estudiar un problema de investigación, junto con la lógica subyacente detrás de ellos. Por lo tanto, no solo es importante para las técnicas/métodos de investigación, sino también el enfoque científico denominado Metodología. (Maqbool, 2018)

La investigación puede ser investigación aplicada o investigación fundamental. El objetivo principal de la investigación aplicada es encontrar una solución para un problema inmediato al que se enfrenta una sociedad o una organización industrial/empresarial, mientras que la investigación fundamental o pura se ocupa principalmente de las generalizaciones y se concentra en la formulación de una teoría. Es decir, "reunir conocimiento por el bien del conocimiento" se denomina investigación "pura" o "básica" o "fundamental".

## **CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

### **2.1. Arquitectura de red de sensores inalámbricos.**

Las características de una red de sensores y los requisitos de diferentes aplicaciones tienen un impacto decisivo en el diseño de la red. Algunos de los factores que influyen en el diseño de la red son la tolerancia a fallas, la escalabilidad, los costos de producción, el entorno operativo, la topología de la red del sensor, las limitaciones del hardware, los medios de transmisión y el consumo de energía.

La tolerancia a fallas es la capacidad de la red para continuar su función, incluso si algunos nodos fallan o bloquean. Los nodos del sensor son propensos a fallas debido a condiciones ambientales adversas, falta de alimentación, etc. Esto no debería afectar la función general de la red.

En WSN, la cantidad de nodos puede estar en orden de decenas, cientos o miles. Por lo tanto, los protocolos diseñados para estas redes deberían ser capaces de manejar los nuevos esquemas de manera eficiente.

Debido a que los nodos de sensor generalmente se implementan en un entorno hostil u hostil en grandes cantidades y no se pueden reutilizar, es importante reducir el costo de los nodos de sensor para reducir el costo de toda la red.

En las redes de sensores, un nodo puede fallar, unirse o moverse, lo que daría lugar a cambios en la densidad del nodo y la topología de la red. Por lo tanto, los protocolos de red diseñados para redes de sensores deberían ser adaptables a dicha densidad y a los cambios de topología.

Los nodos sensores tienen capacidades limitadas de procesamiento y almacenamiento, y por lo tanto solo pueden realizar funcionalidades computacionales limitadas. Estas limitaciones de hardware presentan muchos desafíos en el desarrollo de software y el diseño de protocolos de red para redes de sensores.

Los nodos del sensor están enlazados por un medio inalámbrico, que es ruidoso, propenso a errores y variable en el tiempo. La conectividad de la red puede interrumpirse con frecuencia debido al desvanecimiento del canal o la atenuación de la señal.

La reducción del consumo de energía es el factor más importante en el diseño de una red de sensores. Como los nodos de los sensores funcionan con baterías y con frecuencia es muy difícil o incluso imposible cambiar o recargar sus baterías, es crucial reducir el consumo de energía de los nodos de los sensores para prolongar su vida útil y la de toda la red.

Un nodo de sensor suele ser un dispositivo de bajo tamaño, peso y potencia (SWAP) con una antena, una CPU, un conector de expansión, un interruptor de alimentación, una radio y funciona con batería. La Figura 1.1 muestra un ejemplo de un nodo sensor. Una red de sensores, que consta de múltiples nodos de sensores, es un grupo de transductores especializados con una infraestructura de comunicaciones destinada a supervisar y registrar las condiciones en diversos lugares. Se puede usar para monitorear cantidades tales como ubicación, temperatura, humedad, presión, entre otros, y puede ser cableado o inalámbrico dependiendo de la conexión entre los nodos de los sensores.

En una red de sensores cableados, dos nodos de sensores están conectados a través de un cable. En una red inalámbrica de sensores (WSN), los nodos de los sensores se comunican entre sí a través de protocolos acordados. Por lo tanto, al comparar las redes de sensores cableadas con las redes WSN, las redes de sensores cableados son más seguras y rápidas que las redes inalámbricas de sensores en velocidad de transferencia de datos. Sin embargo, carecen de flexibilidad.

Mientras tanto, la implementación de una red de sensores cableados es más costosa que una WSN debido al costo de los cables, conectores y mano de obra. Además, una red de sensores con cable grande es más difícil de

administrar que una WSN. Por otro lado, los WSN son más flexibles y más eficientes que las redes de sensores cableados.

Un WSN puede estar totalmente conectado, en cuyo caso todos los nodos de los sensores se comunican entre sí, o parcialmente conectados, en cuyo caso un nodo sensor solo se comunica con sus vecinos. En una WSN totalmente conectada, los nodos de sensor intercambian información transmitiendo y recibiendo señales de todos los otros nodos. Por otro lado, en una WSN parcialmente conectada, cada nodo sensor recopila información limitada.

Por lo tanto, una WSN totalmente conectada se beneficia de un conocimiento global de la red y proporciona resultados más precisos que una WSN parcialmente conectada, pero cuesta más en términos de energía y ancho de banda. Un WSN puede ser homogéneo o heterogéneo. En una red homogénea, todos los nodos del sensor son idénticos en términos de duración de la batería, rango de comunicación y complejidad del hardware.

Por otro lado, en redes heterogéneas, los nodos de sensor tienen diferentes rangos de comunicación y funciones. En términos generales, los algoritmos que están diseñados para redes homogéneas no son adecuados para redes heterogéneas.



Figura 2. 1: Un ejemplo de nodos de sensor.  
Elaborado por: Autor.

El nodo del sensor está desarrollado por Genetlab y se ha utilizado para la detección de intrusos en los sistemas de vigilancia de las fronteras y las instalaciones.

Comparando con los dispositivos tradicionales, las mayores ventajas de WSN son una mayor robustez y escalabilidad. En general, las WSN tienen una ventaja energética en comparación con otros dispositivos, ya que los sensores son pequeños, tienen un bajo costo de energía y ventaja de detección ya que un campo de sensor más denso mejora las probabilidades de detectar una fuente de señal dentro del rango.

Aunque las principales fuerzas motrices para las WSN son la tolerancia a fallas, la ganancia de energía y la ganancia de capacidad espacial, las WSN tienen límites de ancho de banda. Mientras tanto, debido a las aplicaciones móviles, una de las limitaciones más importantes en los nodos sensores es el bajo consumo de energía requerido.

Por lo tanto, los protocolos de red del sensor deben centrarse principalmente en la conservación de energía. Además, para garantizar que los nodos funcionen de manera eficiente, estos nodos deben operar en densidades volumétricas elevadas, tener un bajo costo de producción y ser prescindibles, ser autónomos y operar sin supervisión y ser adaptables al entorno.

## **2.2. Aplicaciones de WSN.**

Las WSNs se implementan tanto en aplicaciones civiles como militares. La figura 1.2 muestra algunas aplicaciones de WSN, como la vigilancia de seguridad, la salud y el bienestar, el hogar inteligente, y contraincendios. Las WSNs se implementan en **(a)** salud y bienestar, **(b)** hogares inteligentes, **(c)** protección contra incendios, **(d)** seguimiento militar, y **(e)** aplicaciones de vigilancia de seguridad, entre otras aplicaciones. Otras aplicaciones se pueden dar para la protección en bosques, y de seguimiento.

Se puede revisar en diferentes revistas científicas para una revisión general de la literatura sobre las aplicaciones de WSNs, que incluyen aplicaciones militares, monitoreo en interiores, monitoreo al aire libre y robótico. Mientras tanto, Tavares, Velez, & Ferro, (2008) analizan las aplicaciones en automóviles. Las aplicaciones en el área de la salud humana, atención médica y rescate de emergencia las analizan (Sun, Chen, Guo, & Liu, 2005)



Figura 2. 2: Algunas aplicaciones de WSN.  
Elaborado por: Autor.

Otra aplicación de WSNs son los sistemas de alarma meteorológica y de desastres. También, en las WSNs se aplican en los sistemas de control de la contaminación del aire. Las redes de sensores inalámbricos móviles (*Mobile WSN, MWSN*) han llamado la atención en los últimos años. Por ejemplo, los teléfonos celulares se utilizan para la localización móvil, tal como se muestra en la figura 1.3.

### 2.3. Localización en WSNs.

En muchas aplicaciones, los datos medidos del sensor son significativos solo cuando la ubicación de los sensores se conoce con precisión. Hoy en día, la técnica más utilizada para fines de localización es el sistema de

posicionamiento global (*Global Position System, GPS*), que fue desarrollado en 1973 para superar las limitaciones de los anteriores. Por ejemplo, la figura 2.3 muestra una WSN para localización en el cual, al enviar señales acústicas entre los anclajes y el dispositivo en un lugar desconocido, la ubicación puede ser estimada.



Figura 2. 3: WSN móviles se aplican en la localización.  
Fuente: (Curtis, Banavar, Zhang, Spanias, & Weber, 2014)

Otros sistemas de navegación se han utilizado para fines militares e industriales. El GPS ofrece localización 3D basada en línea de vista directa (LOS) con al menos cuatro satélites, proporcionando una precisión de hasta tres metros. Sin embargo, el GPS tiene algunas limitaciones. En primer lugar, el GPS no se puede implementar en entornos hostiles. Por ejemplo, en presencia de bosques densos, montañas u otros obstáculos que bloquean el LOS desde el satélite GPS, el GPS no puede funcionar.

En segundo lugar, el GPS no puede implementarse bajo el ambiente interior. En tercer lugar, aunque el costo de los equipos de GPS ha ido disminuyendo a lo largo de los años, todavía no es adecuado para tableros de sensores, teléfonos e incluso PDAs producidos en masa. Por otro lado, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) en EEUU ha exigido a los proveedores de servicios inalámbricos que ubiquen a los usuarios de dispositivos móviles a una distancia de 10 metros para las llamadas al 911.

Por lo tanto, la estimación precisa de la posición debe realizarse incluso en entornos desafiantes. Para superar las limitaciones de GPS, los investigadores han desarrollado técnicas totalmente libres de GPS para localizar nodos y técnicas donde pocos nodos, comúnmente llamados anclajes, usan GPS para determinar su ubicación y, al transmitirlo, ayudan a otros nodos a calcular su propia posición sin usar GPS. Por lo tanto, se formula el problema de la estimación de la ubicación utilizando WSN.

Para localizar un nodo, se utilizan varios nodos de referencia, denominados anclajes con ubicaciones conocidas, y también para localizar nodos con ubicaciones desconocidas. La localización en WSN se ha utilizado en muchas aplicaciones, como el seguimiento de inventario, el seguimiento de incendios forestales, la domótica y la monitorización de pacientes.

Cuando ambos anclajes y otros nodos se comunican con el nodo que necesita ser localizado, la red de sensores se denomina WSN cooperativa. En general, las WSN se pueden clasificar como WSN cooperativas y no cooperativas. El concepto de WSN cooperativas se basa en la comunicación directa entre nodos, lo que significa que los nodos pueden comunicarse entre sí y en los problemas de localización, un nodo puede estimar su ubicación.

Por ejemplo, la figura 2.4 muestra la funcionalidad de una WSN cooperativa, aquí  $d_{12}$ ,  $d_{13}$  y  $d_{23}$  son las distancias entre nodos. Mientras, que la figura 2.5 muestra la operatividad de una WSN no cooperativa, aquí el nodo 1 se comunica con el anclaje 3, 4 y 5, mientras, que el nodo 2 se comunica con el anclaje 6, 7 y 8. Es decir, que los nodos no se comunican entre sí. Por otro



lado, en WSN no cooperativas, no hay comunicaciones entre nodos. Los nodos solo pueden comunicarse con anclajes y estimar su ubicación a través de anclajes.

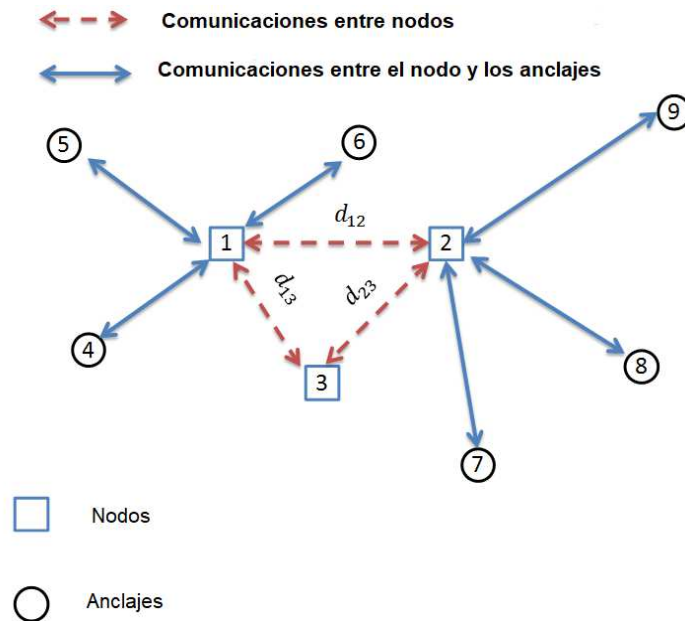


Figura 2. 4: Un ejemplo de WSNs cooperativas.  
Fuente: (Mardini, Khamayseh, & Salayma, 2011)

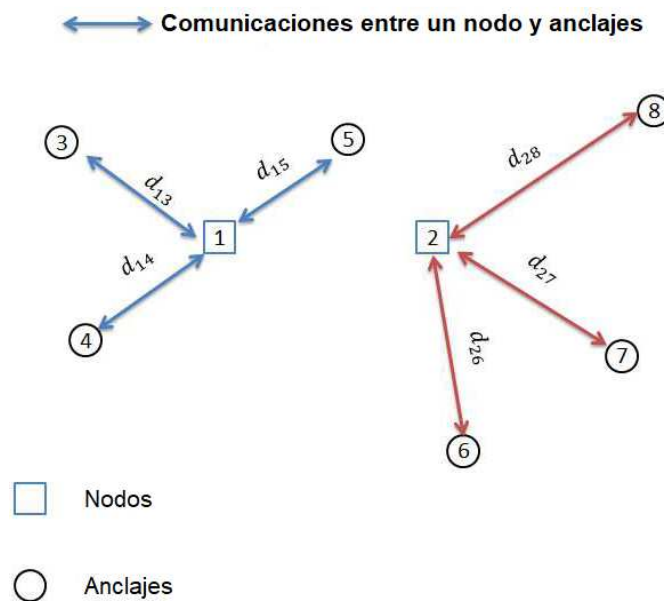


Figura 2. 5: Un ejemplo de WSNs no cooperativas.  
Fuente: (Mardini et al., 2011)

## 2.4. Clasificaciones de los algoritmos de localización.

Los algoritmos de localización se pueden clasificar en tres categorías. La figura 1.6 muestra las clasificaciones de los algoritmos de localización. De

acuerdo con la capacidad computacional en cada anclaje, los algoritmos de localización se pueden clasificar como algoritmos centralizados y distribuidos.

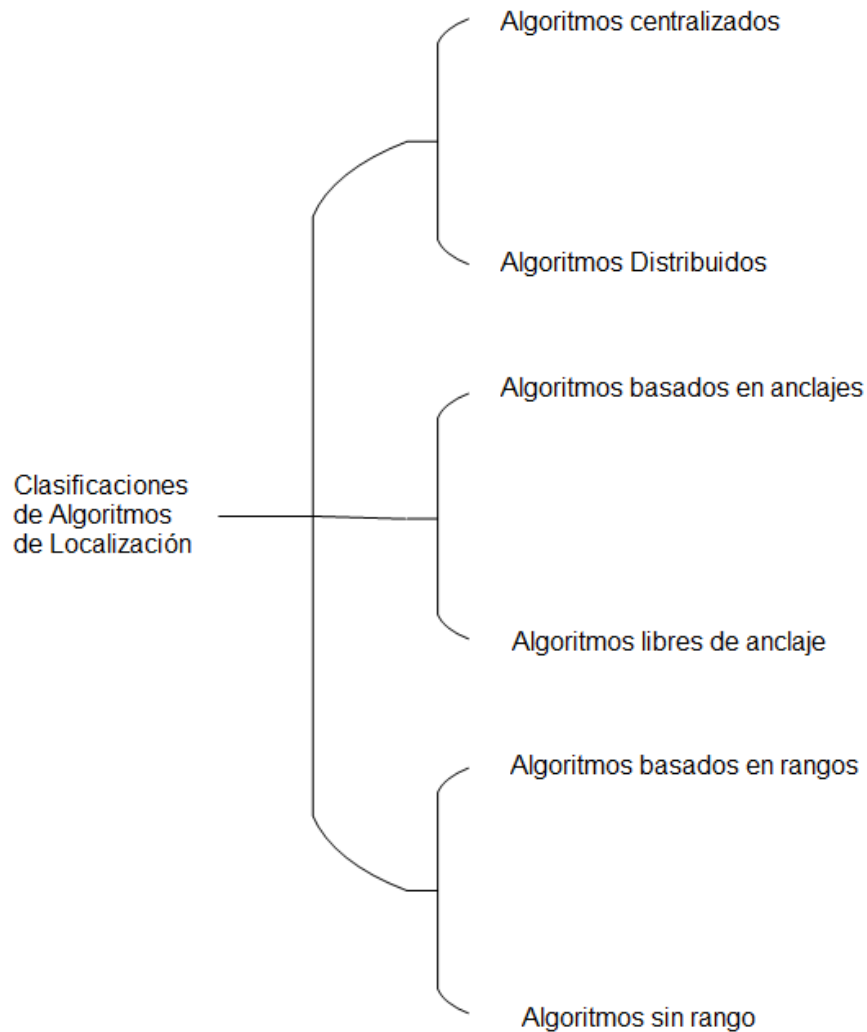


Figura 2. 6: Clasificaciones de Algoritmos de Localización.  
Fuente: (Zhang, Tepedelenlioglu, Banavar, & Spanias, 2017)  
Elaborado por: Autor.

Para los algoritmos centralizados (véase la figura 2.7) se utiliza un centro de fusión (*Fusion Center, FC*) para recopilar toda la información de los nodos del sensor y a la vez es responsable de la mayoría de los cálculos. Los nodos del sensor recopilan mediciones, luego los datos medidos se pasan a un FC. Es decir, que el FC se encarga de calcular parámetros de interés.

Para algoritmos distribuidos (véase la figura 2.8) cada nodo de sensor intercambia información con su vecino o un grupo de nodos de sensor, y también se encarga de calcular o estimar parámetros localmente. Es decir, que los datos medidos se usan para el cálculo en cada nodo sensor.

Un FC es opcional, y si existe, se utiliza para recopilar parámetros calculados o estimados de cada nodo del sensor. Los algoritmos centralizados requieren más energía que los algoritmos distribuidos debido a las transmisiones entre los nodos sensores y un FC. Por otro lado, los algoritmos centralizados proporcionan resultados más precisos en comparación con los algoritmos distribuidos.

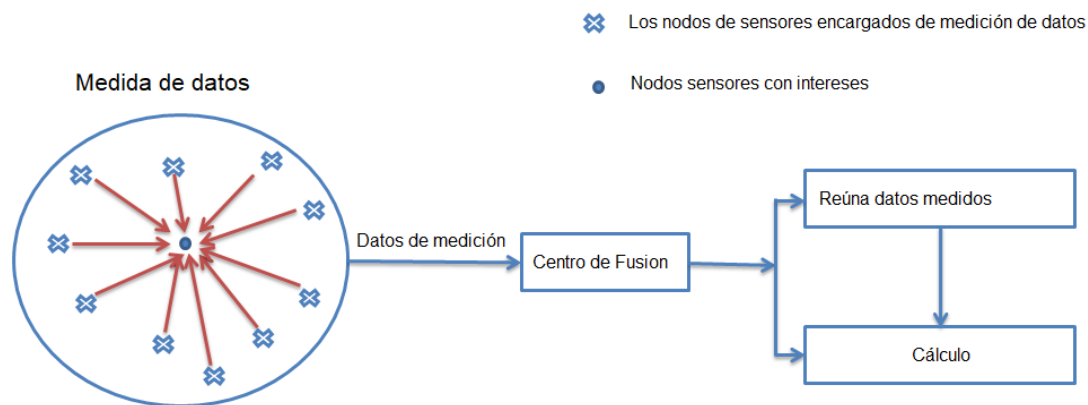


Figura 2. 7: Diagrama de flujo para algoritmos centralizados.  
Fuente: (Zhang et al., 2017)

Sin embargo, en grandes WSNs, la utilización eficiente de la energía es crucial para grandes áreas y comunicaciones de larga distancia. Para implementar algoritmos centralizados de manera más eficiente en WSNs grandes,

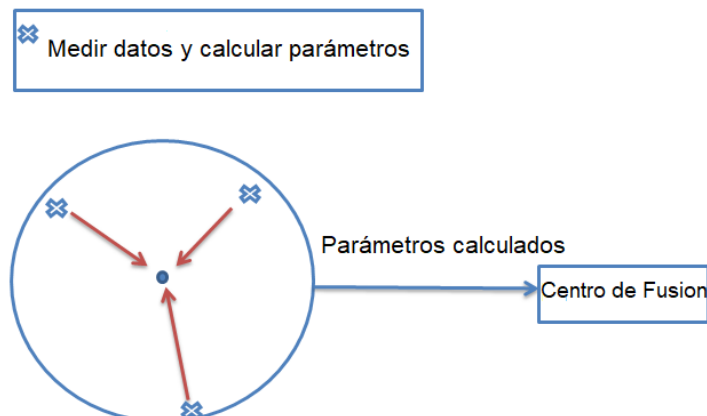


Figura 2. 8: Diagrama de flujo para algoritmos distribuidos.  
Fuente: (Zhang et al., 2017)

Muchos investigadores se centran en el desarrollo de un protocolo de eficiencia energética para WSN. Comparando un sistema distribuido con un sistema centralizado, un sistema distribuido es intrínsecamente más sólido

que un sistema centralizado, como la menor cantidad posible de errores de enlace. Los algoritmos distribuidos también son mucho más escalables en la implementación práctica y pueden ser la única forma de alcanzar las grandes escalas necesarias para algunas aplicaciones.

De acuerdo con la dependencia de las mediciones de rango, los esquemas de localización se pueden clasificar como enfoques basados en rango y enfoques libres de rango. En el esquema de localización basado en el rango, los parámetros relacionados con la ubicación se miden en primer lugar. La figura 2.9 muestra el diagrama de flujo del enfoque de localización basado en rango.

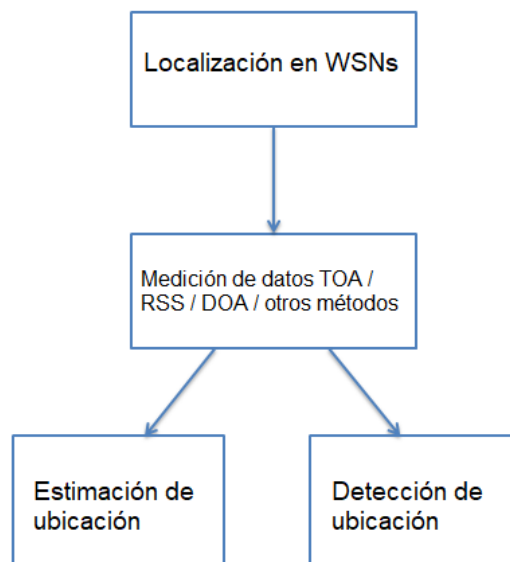


Figura 2. 9: Diagrama de flujo de la localización basada en rango.  
Fuente: (Zhang et al., 2017)

Las técnicas basadas en rangos comúnmente utilizadas incluyen: **(a)** tiempo de llegada (*Time Of Arrival, TOA*), **(b)** intensidad de la señal recibida (*Received Signal Strength, RSS*), **(c)** diferencia de tiempo de llegada (*Time Difference Of Arrival, TDOA*), **(d)** dirección de llegada (*Direction Of Arrival, DOA*), gran apertura matricial (*Large Aperture Array, LAA*) y **(e)** otras técnicas híbridas.

La técnica TOA es una de las técnicas más populares utilizadas para la localización. Aquí, se mide el retardo de tiempo desde el nodo transmisor al

nodo receptor, que puede ser transmisión de una vía o transmisión bidireccional. Para la transmisión unidireccional, se requiere la sincronización de tiempo entre el transmisor y el receptor.

Para la transmisión bidireccional, no hay necesidad de sincronización de tiempo entre el transmisor y el receptor, y el tiempo de transmisión real es la mitad del tiempo medido. Sin embargo, el esquema de transmisión bidireccional requiere más energía y ancho de banda que la transmisión unidireccional, y tiene limitaciones en grandes WSN. A diferencia de TOA, TDOA mide la diferencia entre los tiempos de llegada en los nodos receptores, lo que elimina la necesidad de sincronización entre el transmisor y el receptor. Sin embargo, se sabe que esta técnica sufre si no hay suficiente ancho de banda.

En RSS, se utiliza un modelo de pérdida de ruta para estimar la ubicación en las mediciones de pérdida de potencia. Esta es una técnica simple y barata de implementar, pero adolece de problemas en presencia de deficiencias en el canal, como el desvanecimiento por trayectos múltiples y frecuencia plana. El enfoque DOA emplea matrices de apertura pequeña en cada nodo del sensor para estimar la dirección de la fuente transmitida.

Este método utiliza la diversidad espacial de manera más óptima para lograr un mejor rendimiento de localización y no requiere que los nodos se sincronicen, pero tiene mayores requisitos de hardware y procesamiento. Finalmente, en el enfoque LAA, los nodos utilizados para la localización se agregan para formar un sistema de matriz. Este enfoque es robusto a desvanecimiento plano de frecuencia y puede ser extendido para superar la interferencia co-canal. Por otro lado, los algoritmos sin rango incluyen técnicas de conteo de vecindarios y saltos.

Los algoritmos de localización libres de anclaje comúnmente utilizados incluyen DV-hop, en el cual cada nodo cuenta el número mínimo de saltos a los vecinos, y calcula la distancia multiplicando el número de saltos con la distancia promediada entre dos saltos. Los algoritmos basados en rangos

tienen una mayor precisión en comparación con el rango libre, pero requieren hardware adicional.

Según el número de anclajes que se utiliza para localizar un nodo, los algoritmos de localización se pueden clasificar como algoritmos basados en anclajes y algoritmos libres de anclaje. En algoritmos basados en anclajes, varios nodos de referencia, denominados anclajes con ubicaciones conocidas se utilizan para localizar nodos con ubicaciones desconocidas.

En este esquema, la exactitud de la estimación depende en gran medida del número de anclajes y el rendimiento se mejora cuando se agregan más anclajes a la red. En el esquema de anclaje libre, no hay un nodo de ancla con una ubicación perfectamente conocida. Los nodos se comunican entre sí para estimar las ubicaciones relativas en lugar de calcular las ubicaciones absolutas.

Comparando el esquema basado en anclaje con el esquema libre de anclaje, el esquema basado en anclaje proporciona resultados más precisos que el esquema libre de anclaje. Sin embargo, dado que los receptores de GPS son caros, para obtener ubicaciones precisas de anclaje, el costo de hardware para el esquema basado en anclaje es mucho más alto que el esquema de anclaje libre.

## **2.5. Localización secuencial en WSNs.**

El descubrimiento de WSNs puede realizarse de forma centralizada o distribuida. En el enfoque centralizado, todas las mediciones se transmiten a un FC para estimar ubicaciones desconocidas. El principal inconveniente de este enfoque es que los anclajes deben estar dentro del área de cobertura de todos los nodos, lo que dará lugar a un costo de energía indeseablemente grande. Por otro lado, las redes de sensores distribuidos permiten que los nodos solo se comuniquen con una pequeña porción de vecinos.

Por lo tanto, los algoritmos distribuidos son más eficientes en el consumo de energía. Uno de los algoritmos de localización distribuidos, que se

denomina algoritmo de localización secuencial, que intenta superar la potencia limitada en WSN permitiendo que los nodos que se han localizado previamente se utilicen para localizar otros nodos.

La figura 2.10 muestra un ejemplo de localización de nodos utilizando algoritmo secuencial. En la figura, los nodos negros están en ubicaciones conocidas o previamente estimadas. El nodo 5 se localiza usando los nodos 1, 2, 3 y 4 solamente. Una vez que los nodos están localizados, se convierten en anclajes para localizar nodos blancos vecinos. El principal inconveniente de este enfoque es que los errores de localización se propagarán a través de la red durante el proceso de localización iterativo.

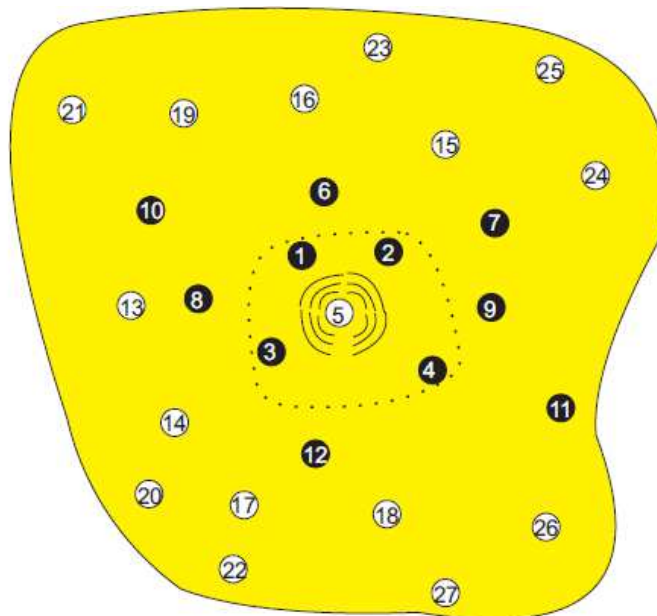


Figura 2. 10: Un ejemplo de localización de nodos utilizando el algoritmo secuencial.

Fuente: (Zhang et al., 2017)

Esto se debe a que se supone que las ubicaciones estimadas de los nodos son las ubicaciones reales. Sin embargo, debido a los errores asociados en la localización de los nodos, este puede no ser el caso. Esto hace que el orden en que se localizan los nodos sea muy importante, así como el algoritmo de localización utilizado. También, se puede comparar el rendimiento de los algoritmos de localización TOA, TDOA, RSS, DOA y LAA utilizando el enfoque de localización secuencial.

## 2.6. Estimadores para localización.

Después de estimar los parámetros relacionados con la ubicación, la ubicación se puede calcular utilizando los parámetros medidos. Para calcular la ubicación del nodo, se han propuesto muchos algoritmos en la literatura. Si se sabe que los datos están bien descritos por un modelo estadístico particular, entonces el estimador de máxima verosimilitud (*Maximum Likelihood Estimator, MLE*) puede derivarse e implementarse. Como MLE puede alcanzar asintóticamente el límite inferior de Cramer-Rao (*Cramer-Rao Lower Bound, CRLB*), este sería el estimador óptimo.

Sin embargo, hay algunas dificultades con este enfoque. En primer lugar, es posible que la búsqueda de maximización pueda encontrar un máximo local no un máximo global. En segundo lugar, si las mediciones se obtienen del modelo supuesto, ya no se garantiza que los resultados sean óptimos. En tercer lugar, en un WSN grande, encontrar un máximo global es computacionalmente intenso, lo que hace que el cálculo sea mucho más lento que otros enfoques. Por lo tanto, para superar las dificultades, se han aplicado otros enfoques.

Una forma de evitar los máximos locales es formular la estimación de la ubicación como un problema de optimización convexa. Se presentan restricciones convexas que se pueden usar para requerir que la estimación de ubicación de un sensor esté dentro de un radio  $r$  de un segundo sensor. Se sugiere la programación lineal utilizando una "métrica de taxi" para proporcionar un medio rápido de obtener estimaciones aproximadas de localización. Se pueden considerar restricciones más generales si se utilizan técnicas de programación semi-definidas (*Semi-Definite Programming, SDP*).

## 2.7. Detección de ubicación en WSN.

En algunas aplicaciones, como en una red de vigilancia, la precisión de la lectura de los nodos es crucial. Una vez que un nodo se comporta de manera anormal, la ubicación del nodo con actividad anormal necesita ser localizado. Para detectar el nodo malicioso, muchos investigadores trabajan en el diseño de algoritmos y protocolos. En la literatura, las investigaciones



han estado trabajando en el diseño de algoritmos y protocolos para detectar los nodos anormales.

A través de la detección de transmisión de mensajes maliciosos en una red se pueden detectar nodos maliciosos. También, se puede estudiar un protocolo de detección de nodo distribuido. En otras aplicaciones, la ubicación del nodo es conocida por todos los anclajes, pero se desconoce si el nodo está activo o no. En muchas aplicaciones, como la detección de incendios en edificios, cada nodo se coloca dentro de una habitación y la ubicación es conocida por todos los anclajes.

Los anclajes detectan un evento en función de si el nodo está transmitiendo. En ausencia de transmisión, cada ancla recibe solo ruido. En presencia del nodo, cada ancla recibe señal con ruido. Por lo tanto, la detección de ubicación en WSN se formula como un problema de prueba de hipótesis binarias, que se aplica para resolver el problema.

#### **2.7.1. Autenticación del par de claves.**

Es muy difícil garantizar que las claves que se utilizan en la comunicación sean las claves genuinas. Los intrusos pueden falsificar identificadores y generar un par de claves para engañar a los nodos pares y hacer que reemplacen a los originales. Después del reemplazo de las claves, los nodos pueden usar las claves falsas y toda la red puede verse comprometida.

### CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA PROPUESTA.

El esquema de entrega de paquetes oportunista propuesto en este estudio de titulación para organizar la entrega de paquetes en el canal de enlace ascendente en las redes de sensores inalámbricos de arquitectura celular se explica en detalle en el presente capítulo. Si el esquema propuesto se aplica en el modelo de sistema MIMO equipado con múltiples antenas, así como en el nodo de control, se pueden obtener más ganancias de rendimiento utilizando la ganancia de diversidad multiusuario existente, así como la ganancia de diversificación espacial.

Si se usan múltiples antenas en los nodos de detección, la cadena de RF se expandirá, por lo que el consumo de energía en los circuitos del receptor/transmisor aumentará proporcionalmente con el número de antenas. Por otro lado, al aumentar la confiabilidad de la conexión usando las repeticiones de las señales enviadas/recibidas de las rutas de desvanecimiento independientes, la energía consumida en la transmisión de paquetes puede reducirse en comparación con el sistema con una única antena en los nodos sensores.

Cuando el esquema propuesto se aplica en el modelo de sistema MIMO, el valor de SNR efectiva (ESNR) se obtiene evaluando las señales obtenidas de las múltiples antenas en los nodos de sensor usando las técnicas de combinación lineal como la combinación de selección (*Selection Combining, SC*) y la combinación de relación máxima (*Maximum Ratio Combining, MRC*) para determinar las condiciones del canal.

Dependiendo de la técnica seleccionada para la combinación lineal, la optimización del nivel de umbral que determina las decisiones de entrega de paquetes de los nodos del sensor se ha realizado de dos maneras diferentes. Con la ayuda de las expresiones de nivel de umbral óptimas encontradas con las técnicas SC y MRC, el plan propuesto se aplicó utilizando la métrica ESNR.

### 3.1. Modelo de sistema.

El modelo de sistema interesado también es una sola celda de la red de sensores inalámbricos de arquitectura celular, en la que un nodo de control sirve a los nodos del sensor  $K$ . Mientras que el nodo de control está equipado con  $M$  antenas, hay  $L$  antenas en los nodos del sensor. Se considera que el nodo de control es más fuerte en términos de procesamiento de señal y capacidades de comunicación que los nodos de sensor.

En función de esto, se supone que el número de antenas en el nodo de control es igual o mayor que el número de antenas en los nodos sensores,  $M \geq L$ . Además, como en el nodo de control, se proporciona flexibilidad en el tamaño físico y restricciones de consumo de energía para el uso de antenas múltiples en nodos sensores.

### 3.2. Modelo de canal y señal.

En el modelo de sistema MIMO considerado, la matriz de canales  $L \times M$  entre el nodo del sensor “ $k$ ” y el nodo de control que se denota por  $H_k = [h_{k,1}, h_{k,2}, \dots, h_{k,L}]^H$ . Cada línea de la matriz del canal es el vector del canal de dimensión  $M \times 1$  entre el nodo de control  $h_{k,l}$  por el nodo del sensor  $k$  y la antena  $l$ . Cada elemento del vector de canal  $h_{k,l,m}$ ;  $m = 1, \dots, M$ ;  $l = 1, \dots, L$  y  $k = 1, \dots, K$  es el coeficiente de ganancia del canal entre el nodo de control  $m$  por el nodo del sensor  $k$  y la antena  $l$ . Los coeficientes de ganancia del canal son variables aleatorias y homogéneas distribuidas al azar con simetría circular, media cero, varianza de  $\bar{\gamma}$  y distribución gaussiana compleja.

#### 3.2.1. Transmisión de señal piloto en la fase de enlace descendente

El canal de enlace descendente y el patrón de señal del plan ESNR propuesto se muestran en la figura 3.1. En la fase de enlace descendente, el nodo de control genera aleatoriamente el vector de formación de haz  $w^p = [w_1^p \dots w_M^p]^T$  de tamaño  $M \times 1$  para la transmisión de señal piloto en un intervalo de tiempo  $p$  dado. Este vector de configuración de suavizado tiene la misma distribución que el vector de canal desde el nodo de control  $k$  hasta

la antena  $l$  del nodo del sensor, y la señal piloto está normalizada para mantener constante la potencia de transmisión.

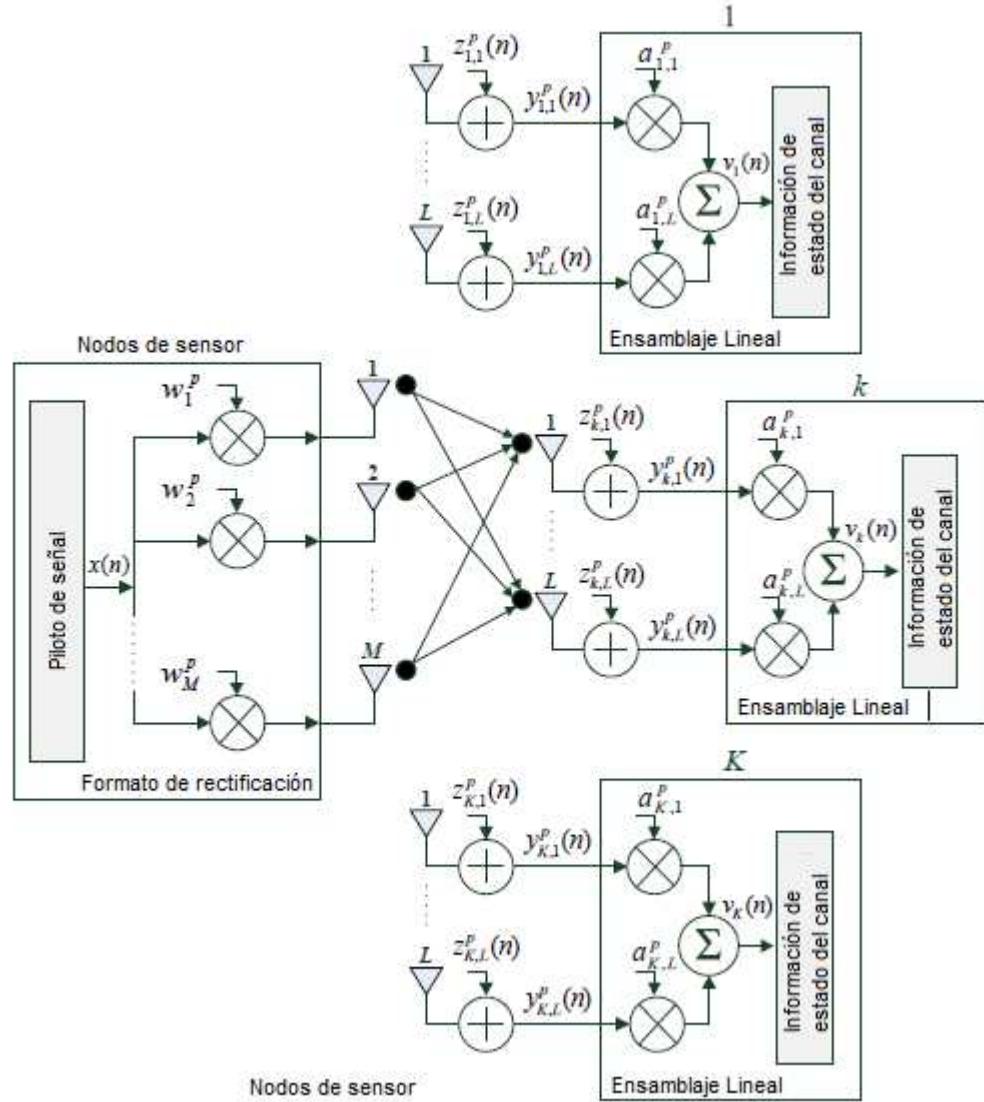


Figura 3. 1: Modelo propuesto del canal descendente y señalización para el esquema de ESNR.  
Elaborado por: Autor.

La señal piloto  $x(n)$  se multiplica por el vector de formación de haz, con la potencia de transmisión  $P_x = E[x^*(n)x(n)]$ . En este caso, la expresión  $k$  es la señal recibida por el nodo del sensor,

$$y_k^p(n) = (\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p) x(n) + z_k^p(n) \quad n = 1, \dots, N_{DL}$$

Aquí, los elementos del vector  $z_k^p(n) = [z_{k,1}^p(n) \dots z_{k,L}^p(n)]$  representan una suma compleja de ruido gaussiano blanco con una simetría circular, media cero, varianza  $\sigma^2$ . Sin embargo, si el nodo del sensor  $k$  está

representado por el vector de canal compuesto  $q_k^p = (H_k w^p)$ , la expresión de la señal recibida sería,

$$y_k^p(n) = q_k^p x(n) + z_k^p(n)$$

Obsérvese que, al cambiar aleatoriamente el vector de conformación del haz en cada intervalo de tiempo, el vector de canal compuesto del nodo de sensor  $k$  cambia de un intervalo de tiempo a otro. En este caso, la señal de la antena  $l$  del nodo del sensor  $k$  se define como,

$$y_{k,l}^p(n) = (\mathbf{h}_{k,l}^H w^p) x(n) + z_{k,l}^p(n)$$

Si la pérdida de trayecto y otros factores perturbadores se combinan en el vector de canal y el valor medio de SNR es  $\bar{\gamma} = P_x / \sigma^2 = 1$  (0 dB) y que se define como la relación de la potencia de señal piloto transmitida a la potencia de ruido, el valor de SNR medido desde la antena  $l$  del nodo de sensor  $k$ .

$$\gamma_{k,l}^p = (\mathbf{W}^p)^H \mathbf{h}_{k,l} \mathbf{h}_{k,l}^H \mathbf{w}^p$$

Los valores de ESNR se obtienen evaluando las señales de todas las antenas en los nodos del sensor mediante técnicas de combinación lineal. De esta forma, las señales de las antenas independientes se multiplican por el vector de ponderación  $a_k^p = [a_{k,1}^p \dots a_{k,L}^p]^T$  en la dimensión  $L \times 1$ , la forma de señal del nodo sensor  $k$  es,

$$V_k^p(n) = (a_k^p)^H y_k^p(n) = \sum_{l=1}^L (a_{k,l}^p)^* y_{k,l}^p(n)$$

Si se realiza la combinación de diversidad utilizando la técnica SC, el nodo del sensor  $k$  solo determina que el valor de SNR recibido es máximo,

$$l^* = \arg \max (\gamma_{k,l}^p)$$

La última ecuación determina el valor de ESNR evaluando la señal recibida de la antena. En este caso, los elementos del vector de ponderación,

$$a_{k,l}^p = \begin{cases} 1 & l = l^* \\ 0 & \text{otro} \end{cases}$$

En consecuencia, la señal recibida en el nodo sensor  $k$  es,

$$v_k^p(n) = (a_{k,l^*}^p)^* y_{k,l^*}^p(n) = (\mathbf{h}_{k,l^*}^H \mathbf{w}^p) x(n) + z_{k,l^*}^p(n)$$

Por lo tanto, el valor de ESNR medido en el nodo del sensor  $k$  es,

$$\gamma_k^p = (\mathbf{w}^p)^H \mathbf{h}_{k,l^*} \mathbf{h}_{k,l^*}^H \mathbf{w}^p = \gamma_{k,l^*}^p = \max_{1 \leq l \leq L} \{\gamma_{k,l}^p\}$$

En la técnica SC, solo se considera la señal recibida más fuerte en los nodos del sensor, mientras que las señales de las otras antenas se ignoran. Por otro lado, en la técnica MRC, que produce resultados óptimos cuando se usa la diversidad del receptor, el vector de ponderación  $a_k^p$  se determina de modo que el valor ESNR se maximice teniendo en cuenta la amplitud y fase de las señales de las diferentes antenas.

Para maximizar el valor de ESNR, los elementos del vector de ponderación deben ser iguales al vector de canal compuesto  $q_k^p = (H_k \mathbf{w}^p)$  de los nodos de sensor. Sin embargo, el vector de ponderación mantiene constante la potencia de transmisión de paquetes de los nodos del sensor en el canal del enlace ascendente,

$$a_k^p = \left( \frac{\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p}{\|\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p\|} \right)$$

En consecuencia, la señal recibida en el nodo sensor  $k$ ,

$$\begin{aligned} v_k^p(n) &= \left( \frac{\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p}{\|\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p\|} \right)^H [(\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p) x(n) + \mathbf{z}_k^p(n)] \\ &= \frac{(\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p)^H (\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p)}{\|\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p\|} x(n) + \frac{(\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p)^H}{\|\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p\|} \mathbf{z}_k^p(n) \end{aligned}$$

De esta forma, el valor de ESNR medido en el nodo del sensor  $k$  es,

$$\gamma_k^p = E[\|\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p\|^2] = \sum_{l=1}^L \gamma_{k,l}^p$$

### 3.2.2. Envío de paquetes en la fase de enlace ascendente.

El canal de enlace ascendente y el modelo de señalización del plan ESNR propuesto se muestran en la figura 3.2. En la fase de enlace

ascendente, los nodos de sensor comparan las ganancias de canal para la transmisión de paquetes al nivel de umbral predeterminado en base al método de combinación lineal preferido. El paquete  $s_k^p(n)$  que tiene  $k$  nodos de sensor con ganancia de canal en el nivel de umbral en un intervalo de tiempo  $p$  dado envía el paquete  $P_s = P_x$  igual a la potencia de señal piloto utilizada en el canal de enlace descendente al nodo de control. El vector de señal recibido en la dimensión  $M \times 1$  obtenida en el nodo de control

$$\mathbf{t}^p(n) = (\mathbf{H}_k^H \mathbf{a}_k^p) s_k^p(n) + \mathbf{z}^p(n) \quad n = \dots, N_{UL}$$

Donde,  $\mathbf{z}^p(n) = [z_1^p(n) \dots z_M^p(n)]^T$  incluye elementos simétricos circularmente, complejo, con una media cero y varianza  $\sigma^2$  con tamaño  $M \times 1$  y el vector de ruido gaussiano aditivo blanco está representado por símbolos. Del mismo modo, si la señal recibida desde la antena  $m$  del nodo de control,

$$t_m^p(n) = (\mathbf{h}_{k,m}^H \mathbf{a}_k^p) s_k^p(n) + z_m^p(n)$$

Aquí  $h_{k,m}$  es el control de todas las antenas del nodo sensor  $k$  a la antena  $m$  del nodo con dimensión  $L \times 1$  con vector de canal en  $z_m^p$  del nodo de control de la antena  $m$ .

Al aplicar la diversidad del receptor en el nodo de control, la combinación lineal de las señales de todas las antenas aumenta el valor de ESNR de los paquetes recibidos. El vector de ponderación utilizado en la fase de enlace ascendente es idéntico al vector de conformación de flujo utilizado en la fase de enlace descendente. La expresión de señal combinada, obtenida como la suma ponderada de las señales de todas las antenas del nodo de control es,

$$r^p(n) = (\mathbf{w}^p)^H \mathbf{t}^p(n) = \sum_{m=1}^M (w_m^p)^* t_m^p(n)$$

La señal combinada usando las dos últimas ecuaciones, quedaría:

$$\begin{aligned} r^p(n) &= (\mathbf{w}^p)^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{a}_k^p s_k^p(n) + (\mathbf{w}^p)^H \mathbf{z}^p(n) \\ &= \sum_{m=1}^M [(w_m^p)^* (\mathbf{h}_{k,m}^H \mathbf{a}_k^p) s_k^p(n) + (w_m^p)^* z_m^p(n)] \end{aligned}$$

De esta forma, el valor de ESNR para el paquete recibido en el nodo de control es,

$$\gamma^p = E \left[ \left\| (\mathbf{w}^p)^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{a}_k^p \right\|^2 \right]$$

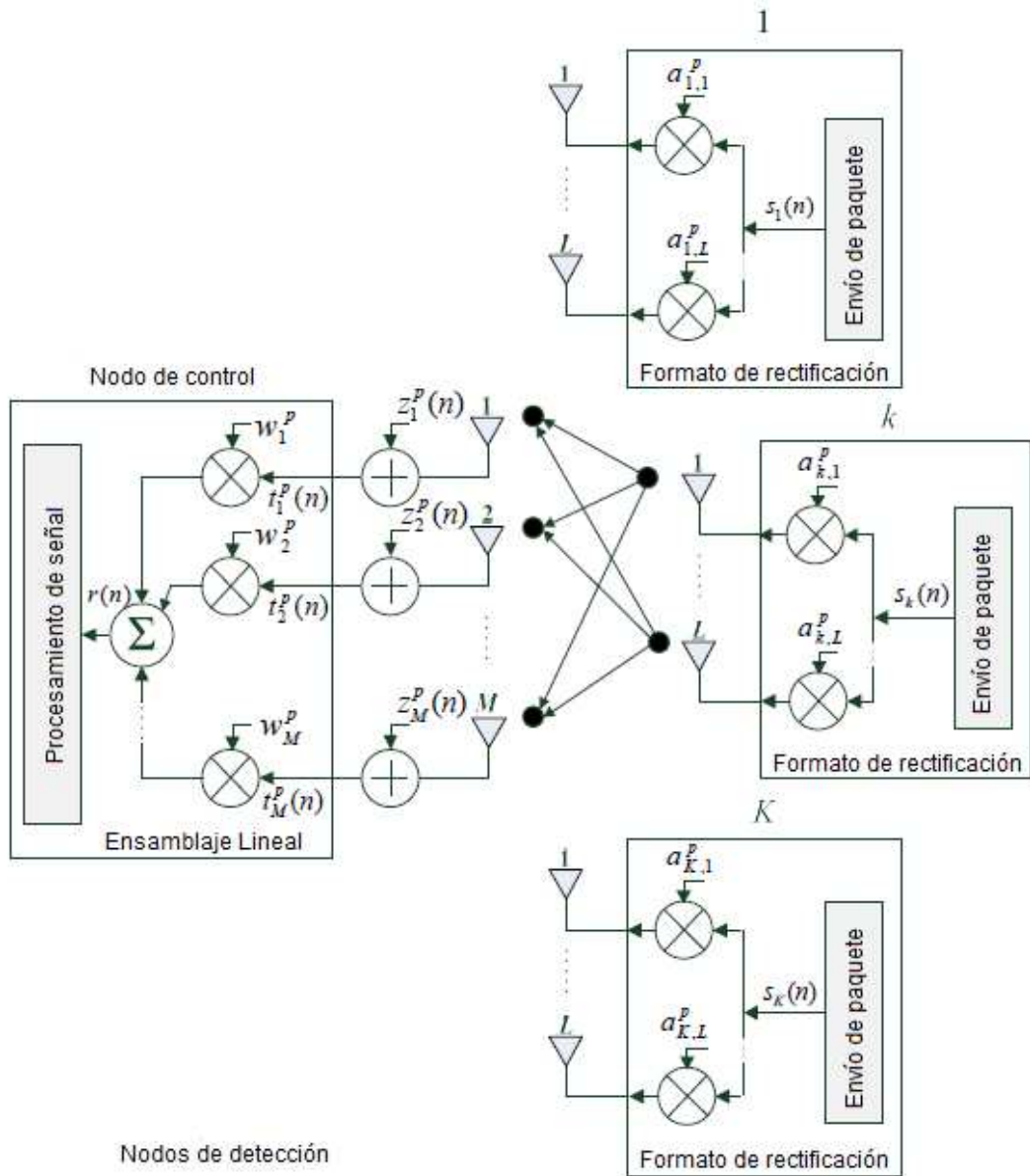


Figura 3. 2: Modelo propuesto del canal ascendente y señalización para el esquema de ESNR.

Elaborado por: Autor.

Si el vector de ponderación dado para SC se reemplaza por la ecuación anterior, el valor de ESNR sería,

$$\gamma^p = (\mathbf{w}^p)^H \mathbf{h}_{k,l} \mathbf{h}_{k,l}^H \mathbf{w}^p$$



Del mismo modo, si el vector de ponderación dado para MRC se sustituye en la ecuación antepenúltima, el valor de ESNR sería,

$$\gamma^p = E[\|\mathbf{H}_k \mathbf{w}^p\|^2]$$

Hay que tener en cuenta que tanto en las técnicas SC como MRC, se proporciona interferencia de canal ya que los valores de ESNR para los enlaces ascendentes y descendentes son los mismos.

### 3.3. Determinación del nivel de umbral óptimo.

Al determinar el nivel de umbral óptimo en el plan ESNR propuesto, se optimiza para maximizar la probabilidad de paquetes exitosos como en los planes SNR y NSNR propuestos previamente. La probabilidad de transmisión exitosa de paquetes en el canal se expresa aprovechando la expresión de función de densidad de probabilidad (*Probability Density Function, PDF*) para la métrica ESNR, dependiendo de la técnica de combinación lineal seleccionada, de modo que solo uno de los nodos tenga la posibilidad de tener ganancia de canal por encima del nivel umbral y por debajo de los demás.

El plan ESNR propuesto para simplificar la narración se llama plan ESNR sugerido por el MRC, y si el plan ESNR propuesto por el SC se implementa utilizando la combinación del plan ESNR propuesto y también la combinación de tasa máxima.

#### 3.2.3. Plan ESNR propuesto con SC.

Cuando el plan propuesto se aplica con SC, la expresión PDF para la métrica ESNR sería,

$$f_{\gamma}^{SC}(\gamma) = (L/\bar{\gamma})(1 - e^{-\gamma/\bar{\gamma}})^{L-1} e^{-\gamma/\bar{\gamma}}$$

Con la ayuda de la expansión PDF binomial, quedaría

$$f_{\gamma}^{SC}(\gamma) = (L/\bar{\gamma}) \sum_{j=0}^{L-1} (-1)^j \binom{L-1}{j} e^{-(1+j)\gamma/\bar{\gamma}}$$

Aquí, el coeficiente binomial es,

$$\binom{L-1}{j} = \frac{(L-1)!}{(L-j-1)!j!}$$

Que incluye  $\bar{\gamma}$  en el nodo perceptual del sensor,  $L$  representa el valor promedio de SNR a la salida de cada uno de los sensores. En consecuencia, la probabilidad de que cualquier nodo sensor tenga un valor ESNR en el nivel umbral es,

$$P_{SC}(\gamma > \beta) = \int_{\beta}^{\infty} (L/\bar{\gamma})(1 - e^{-\gamma/\bar{\gamma}})^{L-1} e^{-\gamma/\bar{\gamma}} d\gamma = 1 - (1 - e^{-\beta/\bar{\gamma}})^L$$

La probabilidad de que solo uno de los nodos de sensor tenga un valor de ESNR en el nivel de umbral (por debajo de los demás) para una transmisión de paquetes exitosa es,

$$P_{SC}(\beta) = K \left[ 1 - (1 - e^{-\beta_{SC}/\bar{\gamma}})^L \right] \left[ (1 - e^{-\beta_{SC}/\bar{\gamma}})^L \right]^{K-1}$$

El nivel de umbral óptimo, que maximiza la probabilidad de transmisión exitosa de paquetes al tomar derivadas basadas en el nivel de umbral de esta expresión de probabilidad y ecualización a cero es,

$$\beta_{SC} = -\bar{\gamma} \ln \left( 1 - \sqrt[L]{\frac{K-1}{K}} \right)$$

Para el esquema de ESNR propuesto por el SC utilizando la expresión de nivel de umbral óptimo obtenida, el paquete exitoso, la escucha inactiva y las probabilidades de colisión son,

$$P_{SC}(\beta_{SC}) = K \left[ 1 - e^{-\beta_{SC}/\bar{\gamma}} \right]^K = \left( 1 - \frac{1}{K} \right)^{K-1}$$

$$P_{SC}^{nulo}(\beta_{SC}) = \left[ (1 - e^{-\beta_{SC}/\bar{\gamma}})^L \right]^K = \left( 1 - \frac{1}{K} \right)^K$$

$$P_{SC}^{colisión}(\beta_{SC}) = 1 - P_{SC} - P_{SC}^{nulo} = 1 - \left( 1 - \frac{1}{K} \right)^{K-1} - \left( 1 - \frac{1}{K} \right)^K$$

Como se puede ver, estas expresiones son las mismas que las obtenidas con los planes SNR y NSNR propuestos previamente.

La métrica ESNR del sistema se usa cuando la eficiencia espectral se calcula en el plan ESNR propuesto con SC. Para la métrica ESNR del sistema, la expresión PDF es,

$$f_{\hat{\gamma}_{SC}}(\gamma) = [1 - P_{SC}(\beta_{SC})\delta(\gamma) + \left( \frac{P_{SC}(\beta_{SC})}{1 - \left(1 - e^{-\frac{\beta_{SC}}{\bar{\gamma}}}\right)^L} \right) \left( \frac{L}{\bar{\gamma}} \right) \left(1 - e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}\right)^{L-1} \times e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} u(\gamma - \beta_{SC})]$$

Mientras que la eficiencia espectral en el plan ESNR propuesto con SC, utilizando la expresión PDF es,

$$\begin{aligned} \psi_{SC} &= \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\hat{\gamma}_{SC}}(\gamma) d\gamma \\ &= \frac{P_{SC}(\beta_{SC})L}{\text{En}2 \left[ 1 - \left(1 - e^{-\frac{\beta_{SC}}{\bar{\gamma}}}\right)^L \right]} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{(-1)^j \binom{L-1}{j}}{1+j} \\ &\quad \times \left[ \ln(1 + \beta_{SC}) e^{-(1+j)\beta_{SC}/\bar{\gamma}} + e^{-(1+j)/\bar{\gamma}} E_1\left(\frac{(1 + \beta_{SC})(1 + j)}{\bar{\gamma}}\right) \right] \end{aligned}$$

Si se expresa la expresión de eficiencia espectral en SC y plan TDMA estático sería,

$$\begin{aligned} \psi_{SC}^{estático} &= \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\gamma_k^{SC}}(\gamma) d\gamma \\ &= \frac{L}{\ln 2} \sum_{j=0}^{L-1} (-1)^j \binom{L-1}{j} e^{(1+j)/\bar{\gamma}} \frac{E_1\left(\frac{(1 + j)}{\bar{\gamma}}\right)}{1+j} \end{aligned}$$

Para la métrica de ESNR de paquetes exitosos utilizada al calcular el valor de SNR promedio de los paquetes exitosos en el plan de ESNR propuesto con SC, para lo cual la expresión de PDF sería,

$$f_{\bar{\gamma}}(\gamma) = \frac{L \left(1 - e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}\right)^{L-1} e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}}{\gamma \left[ 1 - \left(1 - e^{-\frac{\beta_{SC}}{\bar{\gamma}}}\right)^L \right]} u(\gamma - \beta_{SC})$$

Aquí de nuevo, usando la expresión de expansión binomial PDF es,

$$f_{\bar{\gamma}_{SC}}(\gamma) = \frac{L}{\gamma \left[ 1 - \left( 1 - e^{-\frac{\beta_{SC}}{\bar{\gamma}}} \right)^L \right]} \sum_{j=0}^{L-1} (-1)^j \binom{L-1}{j} e^{-\frac{(1+j)\gamma}{\bar{\gamma}}} u(\gamma - \beta_{SC})$$

El valor promedio de SNR de los paquetes exitosos es,

$$\rho_{SC} = \int_0^{\infty} \gamma f_{\bar{\gamma}_{SC}}(\gamma) d\gamma = \frac{\bar{\gamma}L}{\left[ 1 - \left( 1 - e^{-\frac{\beta_{SC}}{\bar{\gamma}}} \right)^L \right]} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{(-1)^j \binom{L-1}{j}}{(1+j)^2} \Gamma_c \left( 2, \frac{(1+j)\beta_{SC}}{\bar{\gamma}} \right)$$

El valor promedio de SNR de los paquetes exitosos en el SC y en el esquema TDMA estático es,

$$\rho_{SC}^{estático} = \int_0^{\infty} \gamma f_{\gamma_{SC}}(\gamma) d\gamma = \bar{\gamma}L \sum_{j=0}^{L-1} \frac{(-1)^j \binom{L-1}{j}}{(1+j)^2}$$

Si se examinan las expresiones encontradas, la eficiencia espectral y el valor medio de SNR de los paquetes exitosos en el plan ESNR propuesto por SC son la función de L, K y parámetros. Por otro lado, la eficiencia espectral y el valor medio de SNR de los paquetes exitosos en el SC y el esquema TDMA estático solo varían dependiendo de los parámetros L y  $\bar{\gamma}$ .

### 3.2.4. Plan ESNR propuesto por MRC.

Cuando se aplica el plan propuesto con MRC, la expresión PDF para métrica ESNR es,

$$f_{\gamma}^{MRC}(\gamma) = \frac{\gamma^{L-1} e^{-\gamma/\bar{\gamma}}}{\bar{\gamma}^L (L-1)!}$$

En consecuencia, la probabilidad de que cualquier nodo sensor tenga un valor ESNR en el nivel umbral es,

$$P_{MRC}(\gamma > \beta) = \int_{\beta}^{\infty} \frac{\gamma^{L-1} e^{-\gamma/\bar{\gamma}}}{\bar{\gamma}^L (L-1)!} d\gamma = \frac{\Gamma_c(L, \beta/\bar{\gamma})}{(L-1)!}$$

Para una transmisión de paquetes exitosa, solo uno de los nodos de sensor tiene el valor de ESNR en el nivel de umbral (debajo de los demás) es,

$$P_{MRC}(\beta) = K \left( \int_{\beta}^{\infty} \frac{\gamma^{L-1} e^{-\gamma/\bar{\gamma}}}{\bar{\gamma}^L (L-1)!} d\gamma \right) \left( \int_0^{\beta} \frac{\gamma^{L-1} e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}}{\bar{\gamma}^L (L-1)!} d\gamma \right)^{K-1}$$

El nivel de umbral óptimo para maximizar la probabilidad de transmisión exitosa de paquetes, como se describe a continuación,

$$\frac{\Gamma_c(L, \beta/\bar{\gamma})}{(L-1)} = \frac{1}{K}$$

Debido a la estructura complicada de la expresión obtenida, el nivel de umbral  $\beta_{MRC}$  óptimo no se puede encontrar en forma cerrada, por lo que se calcula numéricamente.

La métrica ESNR del sistema  $\hat{\gamma}_{MRC}$  se usa cuando el MRC calcula la eficiencia espectral en el plan ESNR propuesto. Para la métrica ESNR del sistema, la expresión PDF es,

$$\Omega = e^{-\beta_{MRC}/\bar{\gamma}} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{\left(\frac{\beta_{MRC}}{\bar{\gamma}}\right)^j}{j!}$$

Incluyendo,

$$f_{\bar{\gamma}_{MRC}}(\gamma) = [1 - P_{MRC}(\beta_{MRC})\delta(\gamma)] + \left(\frac{P_{MRC}(\beta_{MRC})}{\Omega}\right) \frac{\gamma^{L-1} e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}}{\bar{\gamma}^L (L-1)!} u(\gamma - \beta_{MRC})$$

Sistema obtenido para la métrica ESNR del plan ESNR propuesto por MRC utilizando la expresión PDF, para lo cual la expresión de eficiencia espectral es,

$$\psi_{MRC} = \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\bar{\gamma}_{MRC}}(\gamma) d\gamma$$

Mientras que la eficiencia espectral se calcula numéricamente porque la expresión PDF de la métrica de ESNR no se puede obtener de nuevo en forma

cerrada. Por otro lado, en la expresión de eficiencia espectral en el plan TDMA estático sería,

$$\begin{aligned}\psi_{MRC}^{estático} &= \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\gamma_k}^{MRC}(\gamma) d\gamma \\ &= \frac{1}{\ln 2} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{\left(-\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{L-j-1}}{(L-j-1)!} \left[ e^{1/\bar{\gamma}} E_1(1/\bar{\gamma}) + \sum_{m=1}^{L-j-1} (m-1)! \bar{\gamma}^m \right]\end{aligned}$$

Para la métrica de ESNR de paquete exitosa, que se utiliza al calcular el valor de SNR promedio de los paquetes exitosos en el plan de ESNR recomendado por MRC, para el PDF de MRC es,

$$f_{\hat{\gamma}_{MRC}}(\gamma) = \left(\frac{1}{\Omega}\right) \frac{\gamma^{L-1} e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}}{\bar{\gamma}^L (L-1)!} u(\gamma - \beta_{MRC})$$

El valor promedio de SNR de los paquetes exitosos es,

$$\rho_{MRC} = \int_0^{\infty} \gamma f_{\hat{\gamma}_{MRC}}(\gamma) d\gamma = \frac{1}{\Omega} \int_{\beta_{MRC}}^{\infty} \frac{\bar{\gamma}}{\Omega(L-1)} \Gamma_c(L+1, \beta_{MRC}/\bar{\gamma})$$

El valor promedio de SNR en plan TDMA estático con MRC es,

$$\rho_{MRC}^{estático} = \int_0^{\infty} \gamma f_{\gamma_{MRC}}(\gamma) d\gamma = \bar{\gamma}L$$

La eficiencia espectral y el valor promedio de SNR de paquetes exitosos en el plan ESNR recomendado por MRC son función de los parámetros L, K y  $\bar{\gamma}$ , mientras que MRC solamente los parámetros L y  $\bar{\gamma}$  son efectivos en el esquema TDMA estático.

### 3.4. Análisis de rendimiento.

En este trabajo de titulación, el éxito del plan ESNR propuesto usando técnicas SC y MRC fue probado por simulaciones computarizadas estadísticas (del tipo Monte Carlo) además de las expresiones analíticas encontradas. En el análisis del rendimiento, se han examinado diversas medidas de calidad de servicio, como la eficiencia espectral, la calidad de la

señal de paquete exitosa, la eficiencia energética y la equidad. Los resultados obtenidos se muestran gráficamente para diferentes valores de número de antena  $M$  en el nodo de control, número  $L$  de antenas en los nodos sensores y número  $K$  de nodos sensores.

El esquema de ESRN propuesto muestra el efecto de la diversidad de antenas en el rendimiento del sistema mediante el uso de antenas múltiples en nodos de sensores en comparación con el esquema de SNR propuesto revisado en la sección anterior. El plan ESRN propuesto, sin embargo, también se compara con el esquema TDMA estático, que utiliza las técnicas SC y MRC.

Para proporcionar una aproximación a los resultados obtenidos con expresiones analíticas, se eligió el número de tramas en el simulador (número de repeticiones de experimentos de Monte Carlo) como 1000. Además, cada trama se divide en un número igual de intervalos de tiempo por el número de nodos de sensor para crear las condiciones de prueba adecuadas para una comparación equitativa con el esquema TDMA estático.

En el análisis de rendimiento, el número de nodos sensores se cambia a  $K=1, \dots, 250$  considerando sistemas  $4 \times 4$ ,  $4 \times 2$  y  $2 \times 2$  para  $M=2.4$  y  $L=2.4$ , siempre que se cumpla  $M \geq L$ . El valor promedio de SNR se toma como  $\bar{\gamma} = 1(0 \text{ dB})$  por conveniencia en los cálculos realizados.

#### 3.4.1. Análisis de nivel de umbral óptimo.

En este trabajo de titulación, las expresiones de nivel de umbral óptimo para el esquema ESNR propuesto por SC y MRC se obtienen mediante las ecuaciones de  $P_{MRC}(\gamma > \beta)$  y  $\psi_{MRC}$ , respectivamente. Mediante cálculos analíticos que utilizan estas expresiones, se examina la variación del nivel de umbral óptimo de acuerdo con los parámetros del sistema.

$$P_{MRC}(\gamma > \beta) = \int_{\beta}^{\infty} \frac{\gamma^{L-1} e^{-\gamma/\bar{\gamma}}}{\bar{\gamma}^L (L-1)!} d\gamma = \frac{\Gamma_c(L, \beta/\bar{\gamma})}{(L-1)!}$$

$$\psi_{MRC} = \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\bar{\gamma}_{MRC}}(\gamma) d\gamma$$

La figura 3.3 muestra la variación del nivel de umbral óptimo según el número de nodos de sensor en los sistemas 4x2 y 2x2. En el esquema de ESNR propuesto, el nivel de umbral óptimo es independiente del número M de antenas en el nodo de control. A medida que aumenta el número de nodos de sensor, el nivel de umbral óptimo aumenta como en el esquema de SNR propuesto, por lo que la transmisión de paquetes es más selectiva.

La figura 3.4 muestra la variación del nivel de umbral óptimo de acuerdo con la cantidad de nodos de sensor en los sistemas 4x4 y 4x2. Cuando aumenta el número de antenas en los nodos de detección, el nivel de umbral óptimo aumenta. El nivel de umbral óptimo logrado en el plan de ESNR sugerido por MRC es más alto que el nivel de umbral óptimo calculado en el SC y el plan de ESNR propuesto para el mismo recuento de nodos de sensor.

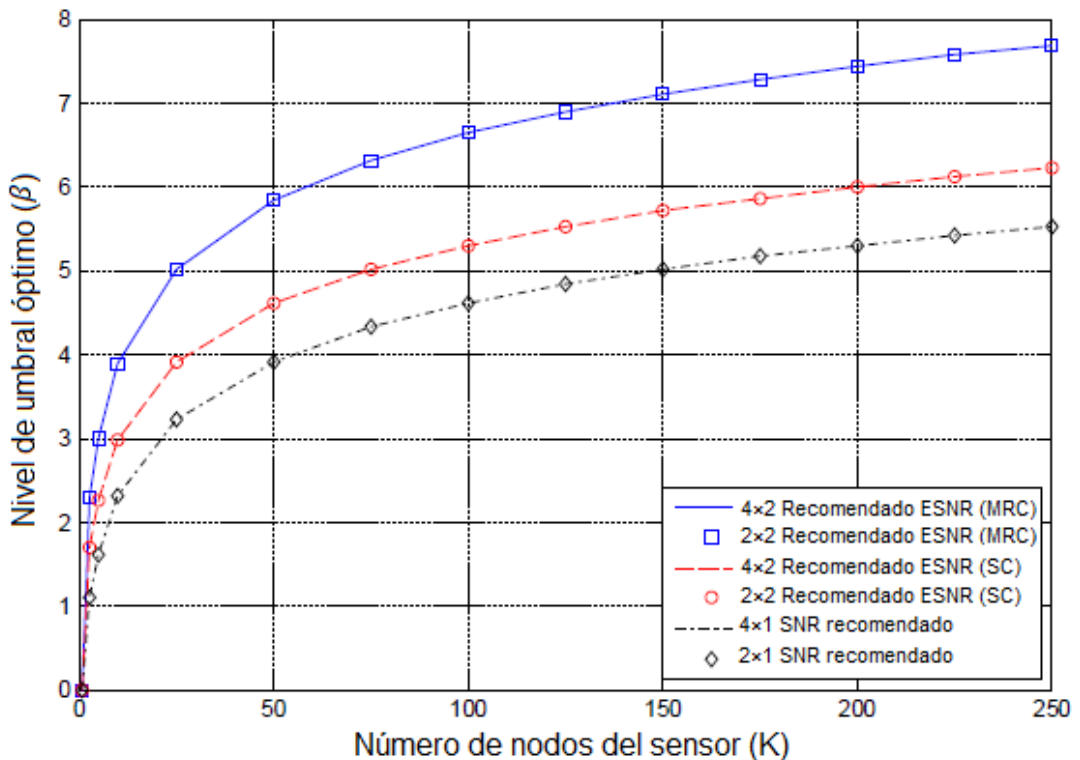


Figura 3. 3: Cambio del nivel de umbral óptimo para L=2 con la cantidad de nodos de sensor.

Elaborado por: Autor.



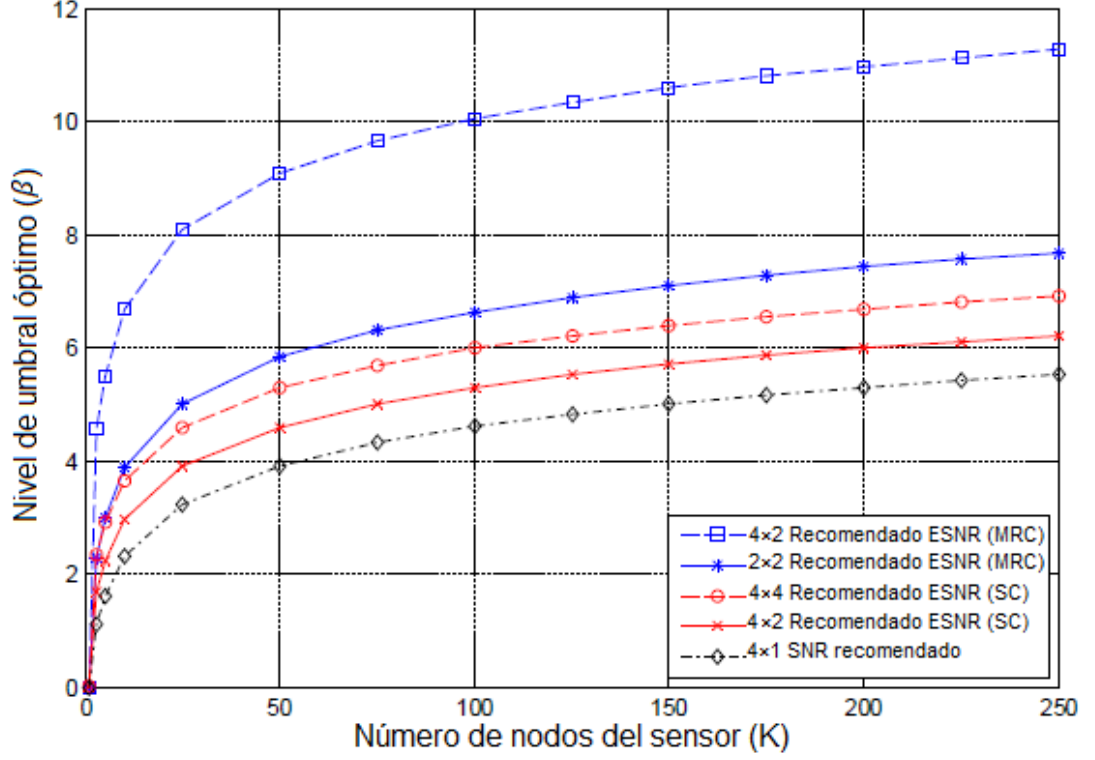


Figura 3. 4: Cambio del nivel de umbral óptimo para M=4 con la cantidad de nodos de sensor.

Elaborado por: Autor.

### 3.4.2. Análisis del estado del canal.

Dentro del alcance de este trabajo de titulación, en el plan ESNR propuesto por SC, las ecuaciones

$$P_{SC}(\beta_{sc}) = K[1 - e^{-\beta_{sc}/\bar{\gamma}}]^K = \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{K-1}$$

$$P_{SC}^{nulo}(\beta_{sc}) = \left[(1 - e^{-\beta_{sc}/\bar{\gamma}})^L\right] = \left(1 - \frac{1}{K}\right)^K$$

$$P_{SC}^{colisión}(\beta_{sc}) = 1 - P_{SC} - P_{SC}^{in} = 1 - \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{K-1} - \left(1 - \frac{1}{K}\right)^K$$

respectivamente dan expresiones de paquete exitoso, probabilidad de escucha nulo (vacío) y probabilidad de colisión. Sin embargo, dado que el nivel de umbral óptimo no puede obtenerse analíticamente en el esquema de ENSR propuesto por MRC, se ha realizado un cálculo numérico de las probabilidades del estado del canal.

Para sistemas 4x2 y 4x4, la probabilidad de transmisión exitosa de paquetes, la probabilidad de escucha inactiva y la probabilidad de colisión con respecto al número de nodos sensores se muestran en las figuras 3.5, 3.6 y 3.7, respectivamente. Las probabilidades de estado del canal son las mismas en los planes ESNR propuestos por SC y MRC, la probabilidad de transmisión exitosa de paquetes es 0.368, la probabilidad de escucha inactiva es 0.367 y la probabilidad de colisión es cercana a 0.265.

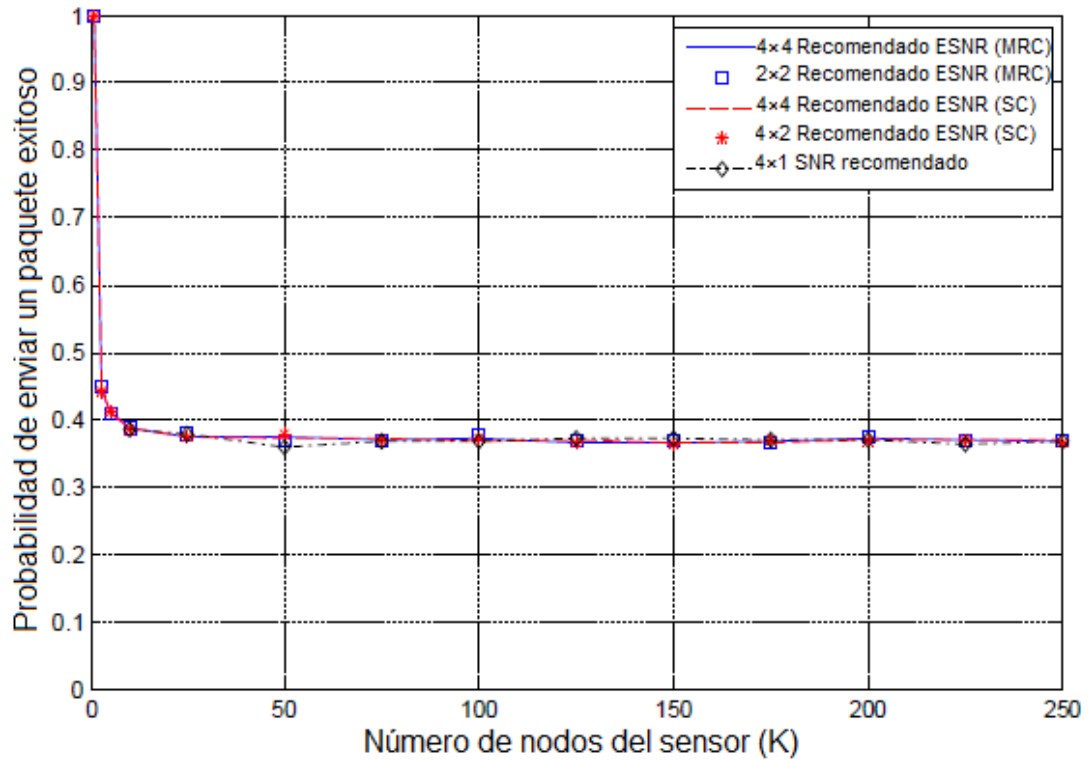


Figura 3. 5: Cambio de la probabilidad de transmisión exitosa de paquetes por el número de nodos sensores.

Elaborado por: Autor.

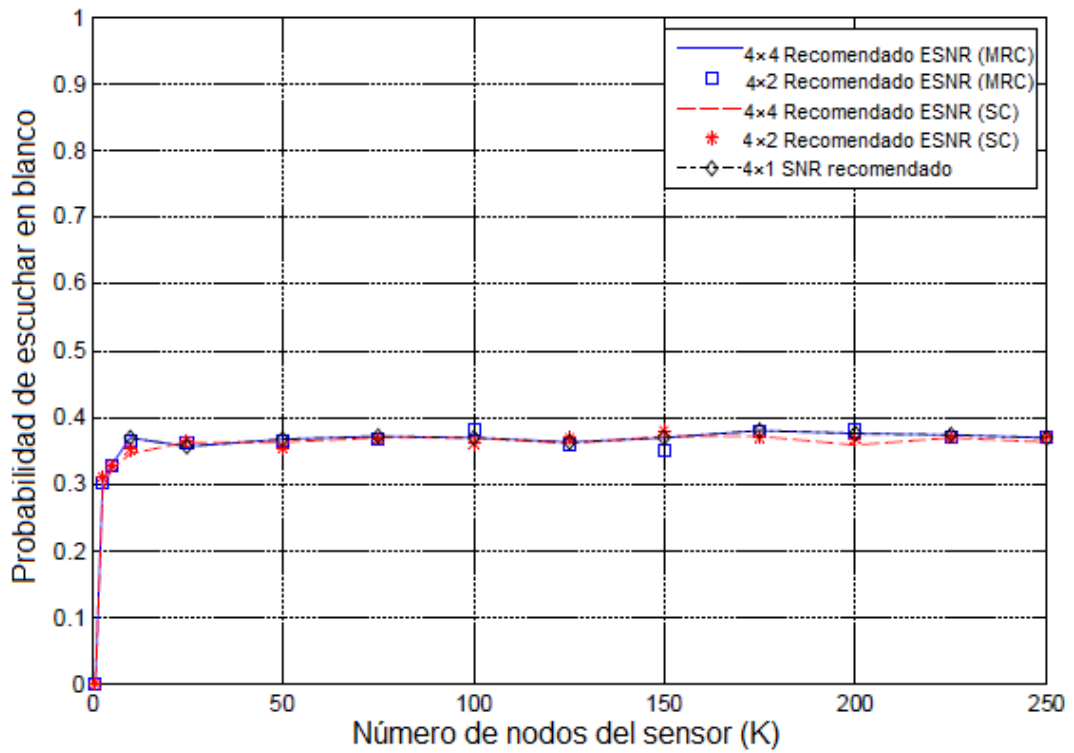


Figura 3. 6: Cambio de la probabilidad de audición nula por la cantidad de nodos  
Elaborado por: Autor.

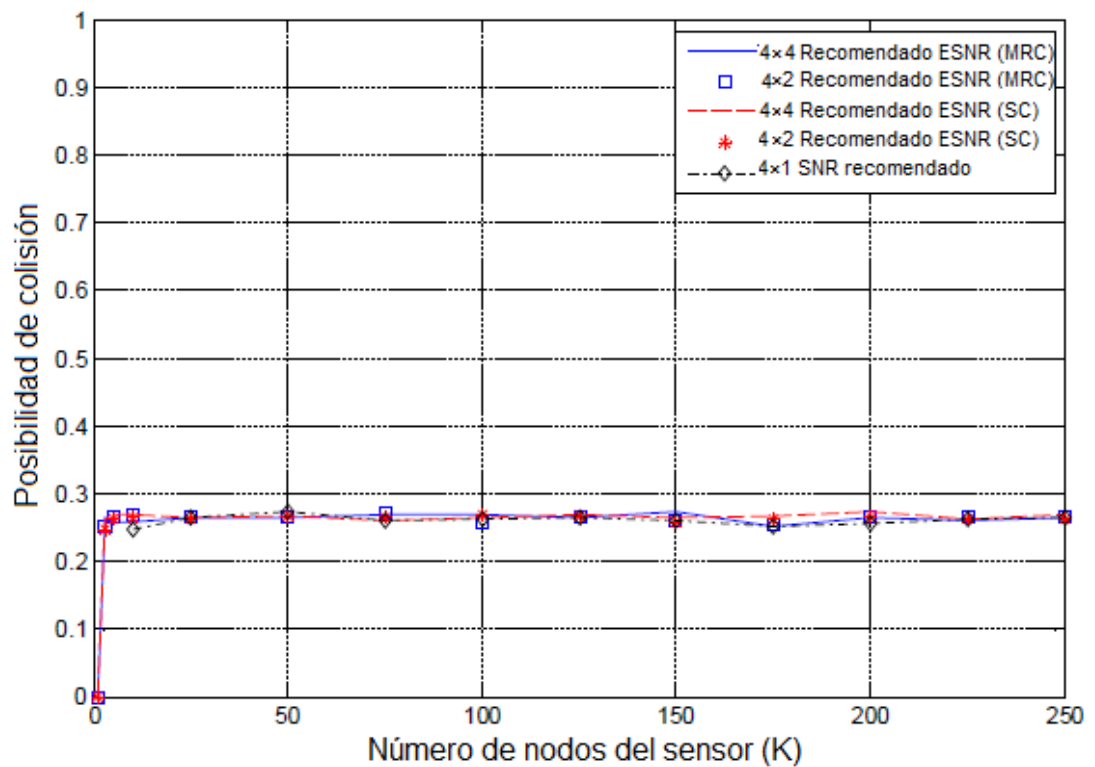


Figura 3. 7: Cambio de probabilidad de colisión por número de nodo del sensor  
Elaborado por: Autor.

### 3.4.3. Análisis de eficiencia espectral.

En este trabajo de titulación, las expresiones de eficiencia espectral para el esquema ESNR propuesto por SC y MRC se obtienen mediante las ecuaciones

$$\begin{aligned}\psi_{SC} &= \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\hat{\gamma}_{SC}}(\gamma) d\gamma \\ &= \frac{P_{SC}(\beta_{SC})L}{\ln 2 \left[ 1 - \left( 1 - e^{-\frac{\beta_{SC}}{\bar{\gamma}}} \right)^L \right]} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{(-1)^j \binom{L-1}{j}}{1+j} \\ &\quad \times \left[ \ln(1 + \beta_{SC}) e^{-(1+j)\beta_{SC}/\bar{\gamma}} + e^{-(1+j)/\bar{\gamma}} E_1((1 + \beta_{SC})(1 + j)/\bar{\gamma}) \right] \\ \psi_{MRC} &= \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\bar{\gamma}_{MRC}}(\gamma) d\gamma\end{aligned}$$

Además, las expresiones de eficiencia espectral para SC y MRC y esquemas TDMA estáticos vienen dados por las ecuaciones,

$$\begin{aligned}\psi_{SC}^{estático} &= \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\gamma_k^{SC}}(\gamma) d\gamma \\ &= \frac{L}{\ln 2} \sum_{j=0}^{L-1} (-1)^j \binom{L-1}{j} e^{(1+j)/\bar{\gamma}} \frac{E_1((1 + j)/\bar{\gamma})}{1 + j} \\ \psi_{MRC}^{estático} &= \int_0^{\infty} \log_2(1 + \gamma) f_{\gamma_k^{MRC}}(\gamma) d\gamma \\ &= \frac{1}{\ln 2} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{\left(-\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{L-j-1}}{(L-j-1)!} \left[ e^{1/\bar{\gamma}} E_1(1/\bar{\gamma}) + \sum_{m=1}^{L-j-1} (m-1)! \bar{\gamma}^m \right]\end{aligned}$$

La figura 3.8 muestra la variación de la eficiencia espectral con respecto al número de nodos de sensor en un sistema de 4x2. En el esquema de ESNR propuesto, cuando aumenta el número de nodos de sensor, aumenta la eficiencia espectral porque aumenta la ganancia de diversidad de usuarios múltiples. La eficacia espectral en el esquema de ESNR propuesto con MRC

es más que el esquema de ESNR propuesto con SC en el mismo recuento de nodos de sensor. Hay que tener en cuenta que los cálculos analíticos y los resultados de la simulación son exactamente los mismos.

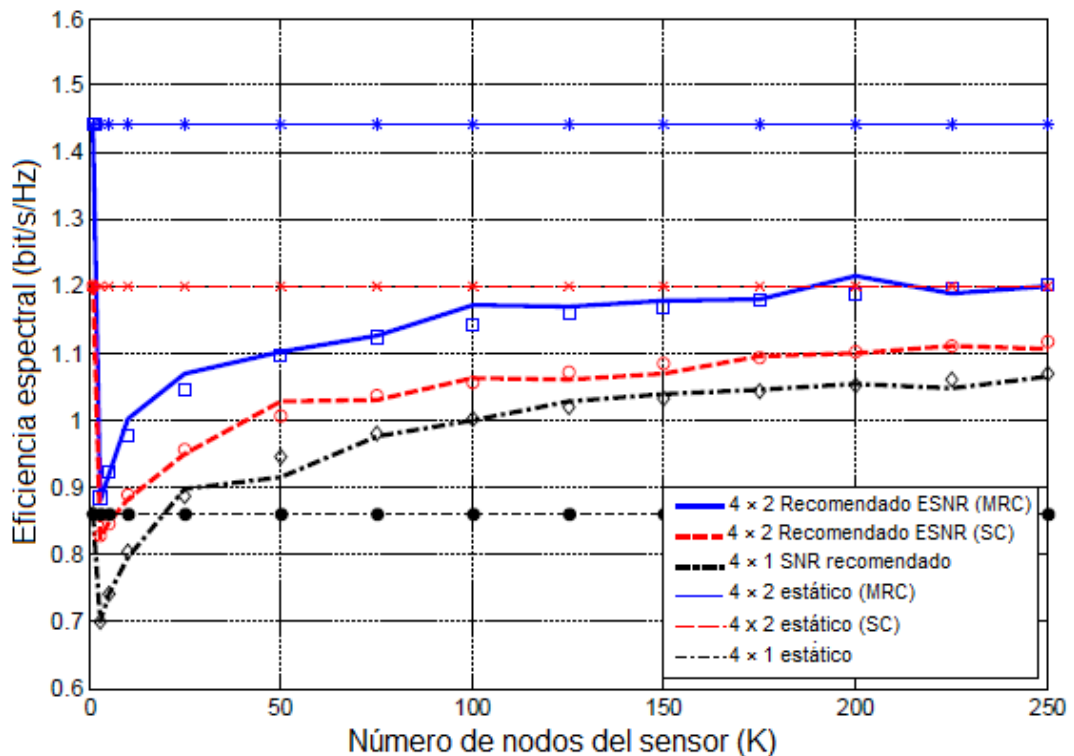


Figura 3. 8: Cambio de la eficiencia espectral para MIMO 4x2 con la cantidad de nodos de sensor.

Elaborado por: Autor.

La figura 4.9 muestra la variación de la eficiencia espectral con respecto al número de nodos de sensor en un sistema 4x4. En el esquema de ESNR propuesto, cuando aumenta el número de antenas en los nodos de detección, se proporciona más aumento de la eficiencia espectral que con el esquema de SNR propuesto con sistema 4x1. Por otro lado, en el plan ESNR propuesto por SC y MRC, la eficiencia espectral es menor que SC y MRC con respecto al plan TDMA estático.

Las figuras 4.8 y 4.9 muestran los resultados de las simulaciones y los marcadores muestran los resultados analíticos. En el plan ESNR propuesto y el plan TDMA estático para mostrar los resultados analíticos, se usaron marcadores para los valores para MRC  $\square$  y  $*$ , para SC,  $\circ$  y  $\times$ , para SNR  $\diamond$  y  $\bullet$ , respectivamente.

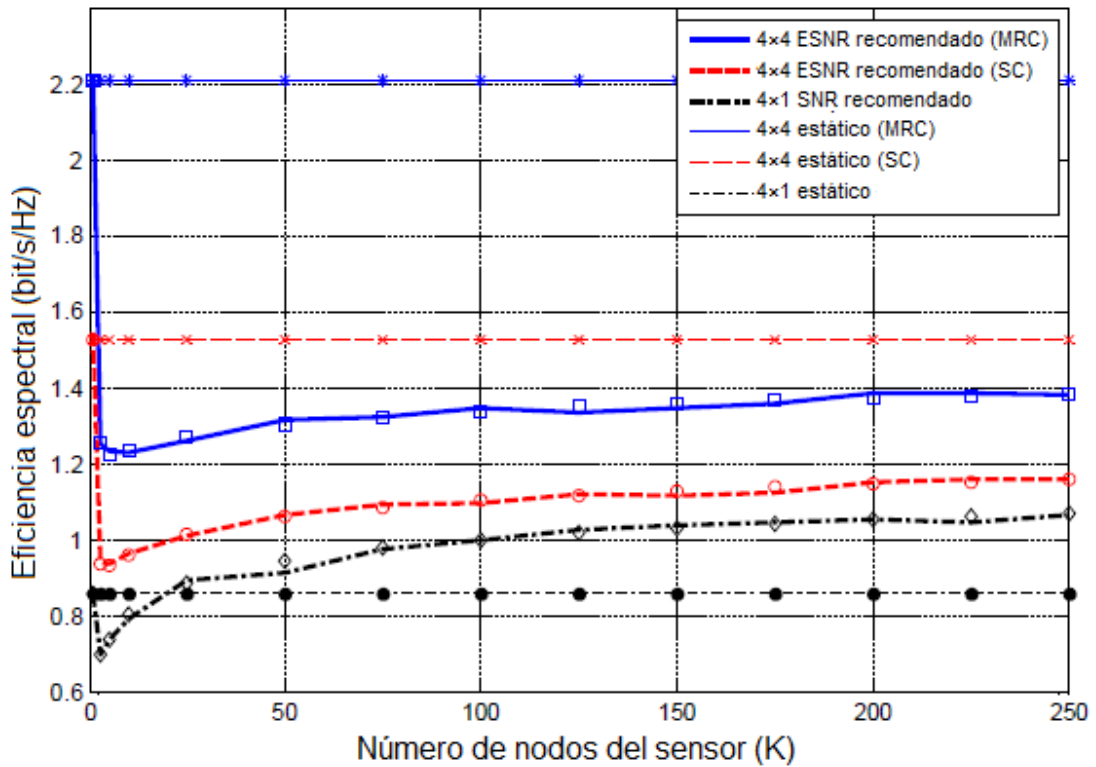


Figura 3. 9: Cambio de la eficiencia espectral para MIMO 4x4 con la cantidad de nodos de sensor.

Elaborado por: Autor.

Sin embargo, para ver el efecto del valor promedio de SNR sobre la eficiencia espectral, el análisis de eficiencia espectral se extendió al exceder los valores numéricos del nodo del sensor que podrían encontrarse en la práctica. La figura 3.10 muestra la variación de la eficiencia espectral con respecto al número de nodos de sensor para valores de  $\bar{\gamma} = -3, 0, +3 \text{ dB}$  en un sistema de 4x2.

La eficiencia espectral aumenta cuando el valor promedio de SNR aumenta tanto en el plan ESNR propuesto como en el plan TDMA estático. Sin embargo, debido a las desventajas de escucha y colisiones nulas, el aumento de la eficiencia espectral en el esquema ESNR propuesto en este estudio de titulación no es tan alto como el esquema TDMA estático. El rendimiento del esquema propuesto es menor que el esquema TDMA estático, especialmente en condiciones de canal donde la SNR promedio es alta.

El plan ESNR propuesto para  $\bar{\gamma} = +3 \text{ dB}$  no puede captar el plan TDMA estático en la escala dada. Por otro lado,  $K = 100$  en el esquema ESNR propuesto con SC para  $\bar{\gamma} = -3 \text{ dB}$  se obtiene una mayor eficacia espectral que el plan TDMA estático sobre  $K = 700$  en el plan ESN propuesto con MRC.

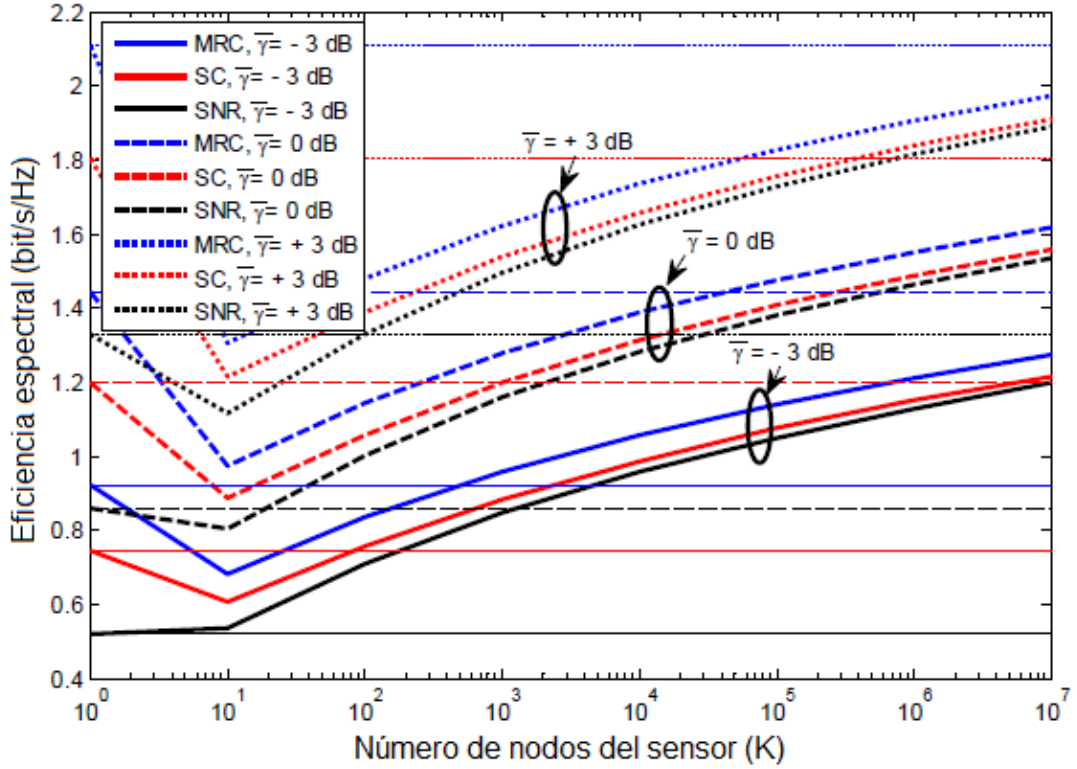


Figura 3. 10: Cambio de la eficiencia espectral para MIMO 4x2 con valor promedio de SNR.

Elaborado por: Autor.

#### 3.4.4. Análisis de calidad de señal.

En este trabajo de titulación, el valor promedio de SNR de los paquetes exitosos para el esquema de ESNR propuesto por SC y MRC viene dado por las ecuaciones

$$\rho_{SC} = \int_0^{\infty} \gamma f_{\bar{\gamma}_{SC}}(\gamma) d\gamma = \frac{\bar{\gamma}L}{\left[1 - \left(1 - e^{-\frac{\beta_{SC}}{\bar{\gamma}}}\right)^L\right]} \sum_{j=0}^{L-1} \frac{(-1)^j \binom{L-1}{j}}{(1+j)^2} \Gamma_c\left(2, \frac{(1+j)\beta_{SC}}{\bar{\gamma}}\right)$$

$$\rho_{MRC} = \int_0^{\infty} \gamma f_{\bar{\gamma}_{MRC}}(\gamma) d\gamma = \frac{1}{\Omega} \int_{\beta_{MRC}}^{\infty} \frac{\bar{\gamma}}{\Omega(L-1)} \Gamma_c(L+1, \beta_{MRC}/\bar{\gamma})$$

Además, las expresiones SNR promedio de los paquetes exitosos para el SC y MRC y el esquema TDMA estático están dados por las ecuaciones,

$$\rho_{SC}^{estático} = \int_0^{\infty} \gamma f_{\gamma_{SC}}(\gamma) d\gamma = \bar{\gamma} L \sum_{j=0}^{L-1} \frac{(-1)^j \binom{L-1}{j}}{(1+j)^2}$$

$$\rho_{MRC}^{estático} = \int_0^{\infty} \gamma f_{\gamma_{MRC}}(\gamma) d\gamma = \bar{\gamma} L$$

La figura 3.11 muestra el valor promedio de SNR de los paquetes exitosos en el sistema 4x2 de acuerdo con la cantidad de nodos de sensor. Cuando la cantidad de nodos sensores aumenta en el esquema ESNR propuesto por SC y MRC, también aumenta el valor promedio de SNR de los paquetes exitosos. Por otro lado, la calidad de señal de los paquetes exitosos en el esquema TDMA estático es independiente del número de nodos de sensor. El valor promedio de SNR en el plan ESNR propuesto por MRC es más alto que el plan de SNR propuesto en SC con el mismo recuento de nodos de sensor.

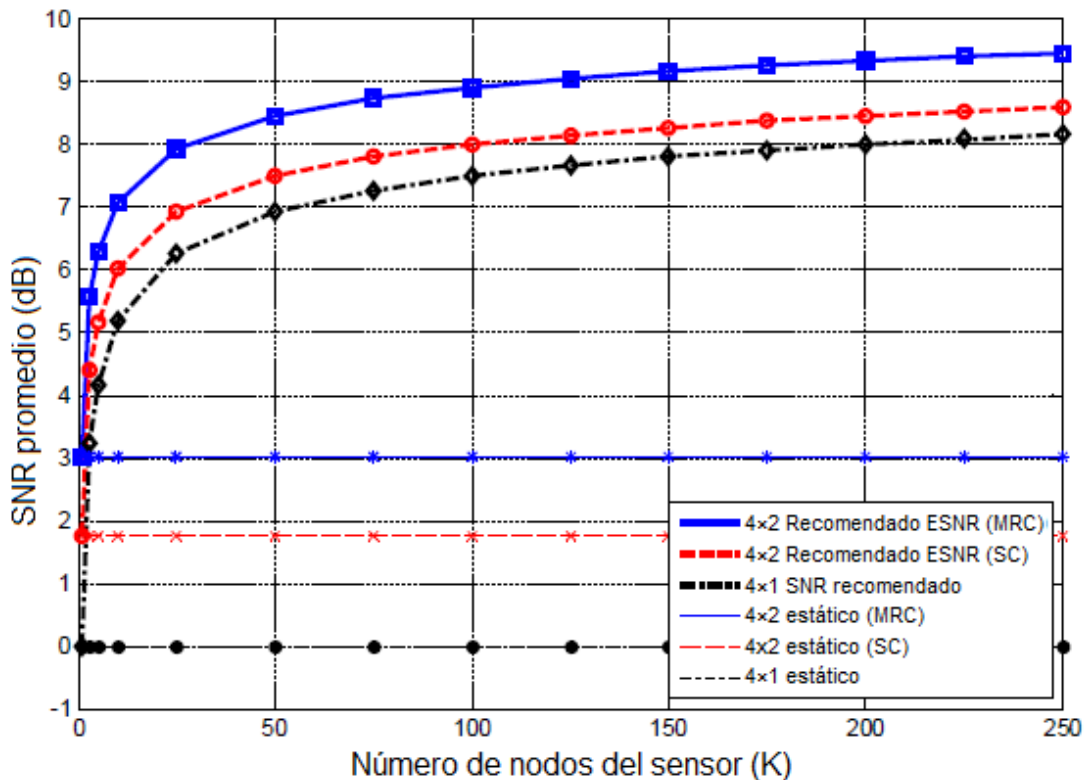


Figura 3. 11: Cambio del valor promedio de SNR del paquete exitoso para MIMO 4x2 con la cantidad de nodos de sensor.

Elaborado por: Autor.



La figura 3.12 muestra el valor promedio de SNR de los paquetes exitosos en un sistema 4x4 de acuerdo con la cantidad de nodos de sensor. Cuando el número de antenas en los nodos del sensor aumenta en el esquema de ESNR propuesto con SC y MRC, la calidad de la señal aumenta de acuerdo con el plan de SNR propuesto por el sistema 4x1. En el plan propuesto de ESRM, el valor promedio de SNR de los paquetes exitosos es más alto que el plan TDMA estático.

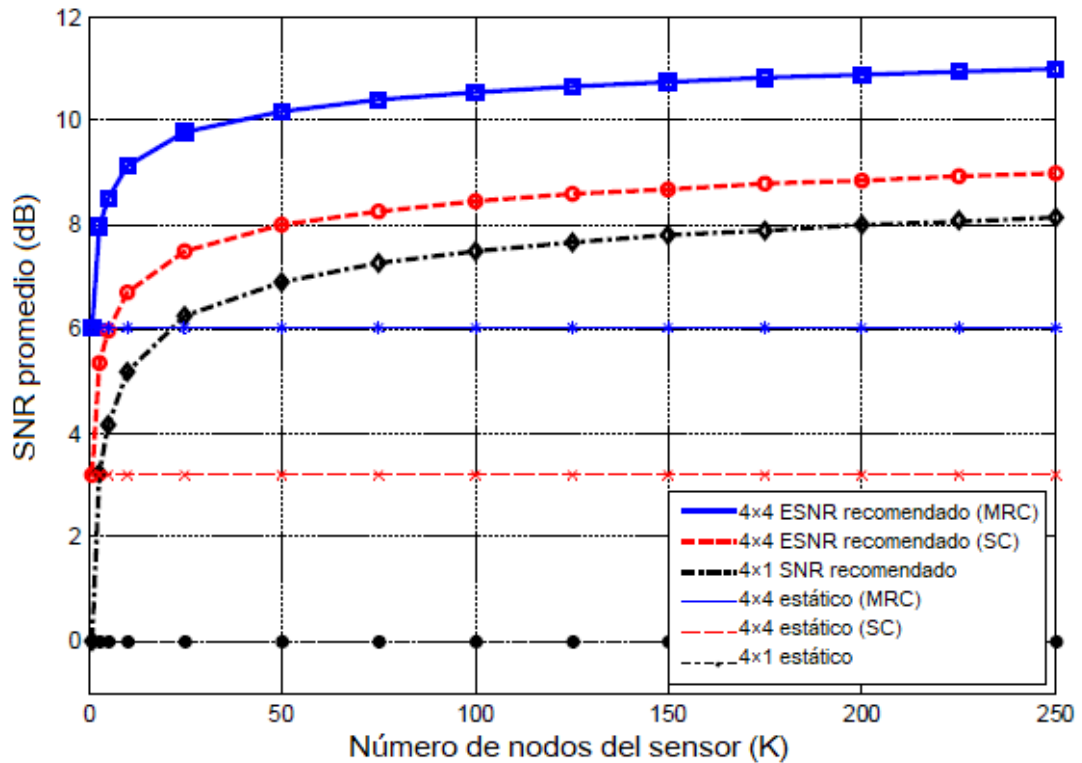


Figura 3. 12: Cambio del valor de SNR medio de paquete exitoso para MIMO 4x4 con el número de nodos de sensor.

Elaborado por: Autor.

En las figura 3.11 y 3.12, las líneas muestran los resultados simulados y los marcadores muestran los resultados analíticos. En el plan ESNR propuesto y el plan TDMA estático para mostrar los resultados analíticos, se usaron los valores de  $\square$  y  $*$  para MRC;  $\circ$  y  $\times$  para SC; y  $\diamond$  y  $\bullet$  para SNR, respectivamente.

### 3.4.5. Análisis de eficiencia energética.

Se realizó un análisis de eficiencia energética basado en una simulación por computadora para examinar la energía desperdiciada debido a una

colisión en la entrega del paquete. La eficiencia energética se mide como la relación entre el número de paquetes enviados con éxito, como se definió previamente, y el número total de intentos de transmisión de paquetes.

La figura 3.13 muestra la variación de la eficiencia energética de acuerdo con la cantidad de nodos sensores en los sistemas 4x4 y 4x2. Como en el esquema de SNR propuesto en el sistema 4x1, la eficiencia energética es cercana al 58.13% porque las probabilidades de estado del canal son las mismas en el plan de ESR propuesto con SC y MRC.

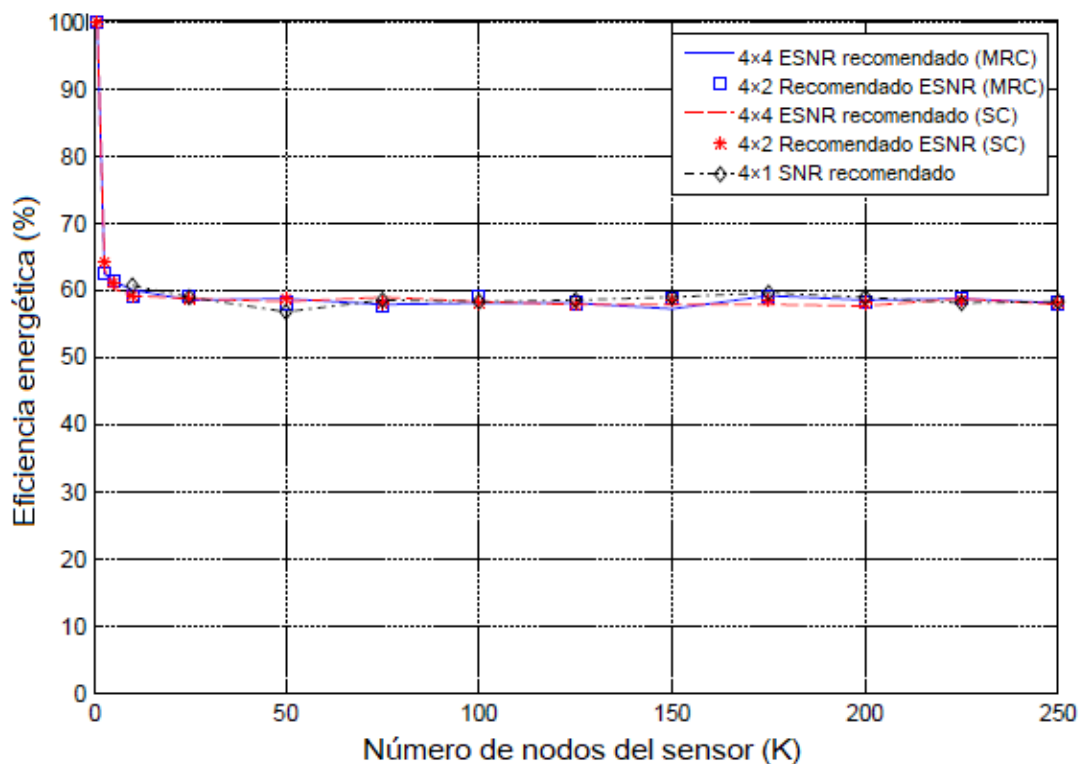


Figura 3. 13: Cambio de eficiencia energética por número de nodo de sensor  
Elaborado por: Autor.

## **CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **4.1. Conclusiones.**

- Se ha desarrollado un nuevo esquema de transmisión de paquetes para organizar el intercambio de canales de nodos sensores en el canal de enlace ascendente de las redes de sensores inalámbricos de arquitectura celular, aprovechando la diversidad multiusuario, la formación oportunista de haces y las técnicas de diversidad espacial. En la base del esquema propuesto, se usa el enfoque de diseño entre capas en el que la información de estado del canal obtenido en la capa física se usa cuando los nodos del sensor en la capa MAC toman decisiones de transmisión de paquetes.
  
- Debido a las restricciones en el canal de enlace ascendente de las redes de sensores inalámbricos, no es posible centrar la información de estado del canal de los nodos del sensor. En este trabajo de titulación, la información de estado de canal propuesta se usa en el caso en que los nodos de sensor están ubicados por sí mismos, de modo que se aplica una diversidad distribuida de usuarios múltiples para aumentar la capacidad total del canal.
  
- Dado que el esquema propuesto no requiere retroalimentación periódica del nodo del sensor al nodo de control, la carga de la señal de control se reduce y, al mismo tiempo, se habilita la transmisión del paquete autónomo central. Dado que la transmisión de paquetes no está organizada por el nodo de control, las pérdidas ocurren debido a colisiones y situaciones de escucha nulas. Como resultado, la máxima ganancia no puede lograrse a partir de la diversidad de usuarios múltiples como en el caso de la programación oportunista centralizada.
  
- Por otro lado, cuando los nodos de sensor con buen estado de canal continuo pueden enviar paquetes, la eficacia espectral según el esquema de temporización cíclica y la calidad de señal de los paquetes recibidos con éxito son ventajosos.

- En caso de que los nodos sensores estén equipados con múltiples antenas, el esquema propuesto se aplica con la métrica ESNR. El análisis de rendimiento realizado con la ayuda de expresiones analíticas y resultados de simulación mostró que el plan ESNR propuesto ofrece mejores resultados en términos de eficiencia espectral y calidad de señal que el plan SNR propuesto previamente.
- Cuando aumenta el número de antenas en los nodos de detección, la eficiencia espectral y la calidad de la señal del paquete exitoso aumentan con la potencia de la señal recibida. El esquema ESNR propuesto dio un mayor rendimiento en términos de eficiencia espectral y calidad de señal que la técnica SC cuando se aplica con la técnica MRC. La eficiencia espectral en el plan ESNR propuesto está por debajo del plan TDMA estático para la cantidad de nodos de sensor que se pueden considerar en la práctica, a diferencia del plan de SNR propuesto. Por otro lado, los paquetes exitosos recibidos en el plan ESNR propuesto han aumentado significativamente la calidad de la señal en comparación con el plan TDMA estático.
- En el esquema ESNR propuesto, no hay efecto en el nivel de umbral óptimo del número de antenas en el nodo de control y, en consecuencia, en la eficacia espectral y la calidad de la señal de paquete exitosa. Pero los resultados de la simulación muestran que el rendimiento de equidad aumentará cuando la cantidad de antenas en el nodo de control aumente. La eficiencia energética para el plan ESNR propuesto es la misma que los planes SNR y NSNR propuestos previamente.

#### **4.2. Recomendaciones.**

- El esquema de transmisión de paquetes propuesto se prueba en el canal de desvanecimiento Rayleigh solo con diferentes métricas. En estudios futuros, sería útil examinar el éxito del esquema propuesto en diferentes modelos de canales, como el canal de desvanecimiento de Rician.

- En el diseño entre capas creado mediante la optimización de las capas física y MAC juntas, es posible aumentar la eficiencia energética y extender la vida útil de la red mediante el control de la potencia adaptativa en los nodos del sensor junto con el plan de temporización oportunista.

## Bibliografía

- Ayoubi, K., Zanjireh, M. M., & Sadeghi, H. (2018). Fragmented opportunistic routing Algorithm in WSN. *Revista Publicando*, 5(15), 1–17.
- Curtis, P., Banavar, M. K., Zhang, S., Spanias, A., & Weber, V. (2014). Android acoustic ranging. En *IISA 2014, The 5th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications* (pp. 118–123). Chania, Crete, Greece: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IISA.2014.6878721>
- Feng, C., Li, Z., Jiang, S., & Jing, W. (2017). Delay-constrained data aggregation scheduling in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 13(6), 155014771771659. <https://doi.org/10.1177/1550147717716591>
- Maqbool, M. (2018). Research Methodology. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.20475.00800>
- Mardini, W., Khamayseh, Y., & Salayma, M. (2011). Optimal Power Consumption in Cooperative WSNs for a random Distance using a linear propagation model. *Procedia Computer Science*, 5, 489–496. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2011.07.063>
- Nagpurkar, A. W., & Jaiswal, S. K. (2015). An overview of WSN and RFID network integration. En *2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS)* (pp. 497–502). Coimbatore, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECS.2015.7124956>
- Sabor, N., Sasaki, S., Abo-Zahhad, M., & Ahmed, S. M. (2016). A Graphical-based educational simulation tool for Wireless Sensor Networks. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 69, 55–79. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.09.004>
- Shkurti, L., Bajrami, X., Canhasi, E., Limani, B., Krrabaj, S., & Hulaj, A. (2017). Development of ambient environmental monitoring system through

wireless sensor network (WSN) using NodeMCU and “WSN monitoring”. En *2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)* (pp. 1–5). Bar, Montenegro: IEEE. <https://doi.org/10.1109/MECO.2017.7977235>

Sun, G., Chen, J., Guo, W., & Liu, K. J. R. (2005). Signal processing techniques in network-aided positioning: a survey of state-of-the-art positioning designs. *IEEE Signal Processing Magazine*, 22(4), 12–23. <https://doi.org/10.1109/MSP.2005.1458273>

Tavares, J., Velez, F., & Ferro, J. (2008). Application of Wireless Sensor Networks to Automobiles. *Measurement Science Review*, 8(3). <https://doi.org/10.2478/v10048-008-0017-8>

Venkatesh, Akshay, A. L., Kushal, P., Venugopal, K. R., Patnaik, L. M., & Iyengar, S. S. (2018). Two-Hop-Based Geographic Opportunistic Routing in WSNs. En R. Chaki, A. Cortesi, K. Saeed, & N. Chaki (Eds.), *Advanced Computing and Systems for Security* (Vol. 667, pp. 89–108). Singapore: Springer Singapore. Recuperado de [http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-8183-5\\_6](http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-8183-5_6)

Xiao, R., Sun, B., Xiao, Y., Wei, Y., & Chen, W. (2018). Content-Based Efficient Messages Transmission in WSNs. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2018/2725961>

Zhang, X., Tepedelenlioglu, C., Banavar, M. K., & Spanias, A. (2017). *Node localization in wireless sensor networks*.



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Jara Pacheco, Paúl Andre** con C.C: # 092563928-8 autor del Trabajo de Titulación: **Análisis de parámetros de la relación efectiva señal-ruido (ESNR) basadas en WSN para el envío de paquetes** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 11 de Septiembre de 2018

f. \_\_\_\_\_

Nombre: Jara Pacheco, Paúl Andre

C.C: 092563928-8



## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Análisis de parámetros de la relación efectiva señal-ruido (ESNR) basadas en WSN para el envío de paquetes		
<b>AUTOR(ES)</b>	JARA PACHECO, PAÚL ANDRE		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. CELSO BAYARDO, BOHÓRQUEZ ESCOBAR		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería en Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	11 de septiembre de 2018	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	62
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Sistemas Microcontroladores y Comunicaciones Inalámbricas		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Redes, Sensores, Inalámbricos, Canales, Umbral, Nodos		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>	<p>Se predice que las WSNs serán la tecnología de detección futura y, por lo tanto, cada vez son más importantes en una amplia gama de áreas de aplicación. El diseño de capa a capa es un nuevo enfoque prometedor para optimizar las WSNs. El trabajo de titulación se enfoca en el uso de la información del estado del canal obtenido de la capa física para un tiempo óptimo de transmisión de paquetes en la capa MAC. Es posible en la arquitectura celular aumente la eficiencia espectral del canal inalámbrico sincronizando las transmisiones de aquellos con buena conectividad mientras se retrasa la comunicación de aquellos con mala calidad de canal usando la diversidad entre los nodos del sensor. Se propone una nueva estrategia basada en el nivel de umbral sin retroalimentación que utiliza la ganancia de diversidad multiusuario en el caso distribuido para la transmisión de paquetes de enlace ascendente. Se supone que los nodos de sensor solo conocen sus propios canales, y la transferencia de paquetes desde los nodos de sensor al nodo de control se inicia cuando la calidad de canal de cualquier nodo excede el nivel de umbral predeterminado en el período de tiempo actual. Para determinar el nivel de umbral óptimo, se maximiza la probabilidad de transmisión exitosa de paquetes, en la que solo un nodo sensor envía su propio paquete en un período de tiempo bajo el modelo de colisión simplificado. Se han examinado dos modelos de sistemas diferentes en este contexto.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593968209917	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:pauljara93@outlook.com">pauljara93@outlook.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-68366762		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec">edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			