



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Análisis comparativo de protocolos de enrutamiento para la
optimización del consumo energético en sensores inalámbricos**

AUTOR:

Ing. Robalino Yanez, Edison David

Componente práctico del examen complejo previo a la obtención del
Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

MSc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, 18 de octubre del 2022



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Robalino Yanez, Edison David** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 18 de octubre del 2022



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Robalino Yanez, Edison David**

DECLARÓ QUE:

El Componente práctico del examen complejo “**Análisis comparativo de protocolos de enrutamiento para la optimización del consumo energético en sensores inalámbricos**”, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster 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 científico del Componente práctico del examen complejo del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 18 de octubre del 2022

EL AUTOR

Robalino Yanez, Edison David



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Robalino Yanez, Edison David**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del examen complejo titulado: **“Análisis comparativo de protocolos de enrutamiento para la optimización del consumo energético en sensores inalámbricos”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 18 de octubre del 2022

EL AUTOR

Robalino Yanez, Edison David

REPORTE DE URKUND

The screenshot shows the URKUND interface. On the left, document details are displayed: 'Documento: Robalino_Edison_MKT2022.docx (D145679472)', 'Presentado: 2022-10-05 22:02 (-05:00)', 'Presentado por: fernandopm23@hotmail.com', 'Recibido: edwin.palacios_uccg@analysis.orkund.com', and 'Mensaje: Revisión trabajo EDISON ROBALINO. 0% de estas 17 páginas, se componen de texto presente en 0 fuentes.' On the right, a 'Lista de fuentes' table lists several sources from 'Universidad Católica de Santiago de Guayaquil'. The bottom of the interface shows a toolbar with icons for navigation and a status bar with '1 Advertencias', 'Reiniciar', and 'Compartir'.

Categoría	Enlace/nombre de archivo
	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil / D3
	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil / D2
	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil / D3
	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil / D7
	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil / D2

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA: Análisis comparativo de protocolos de enrutamiento para la optimización del consumo energético en sensores inalámbricos

AUTOR: Ing. Robalino Yanez, Edison David

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de Magister en Telecomunicaciones

TUTOR: M. Sc.

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

4 de septiembre del 2022

Dedicatoria

A Dios por ser la parte fundamental en este proceso de superación académica, a mi amada esposa Verónica Suárez, a mis hijas Noemí y Arleth; a mis padres por su labor, consejos, dedicación, apoyo y sacrificio incansable hasta el día de hoy, con un amor infinito y un sincero agradecimiento siendo el pilar fundamental para culminar estos estudios, enseñándome a no rendirme fácilmente ni dejarme vencer por ninguna situación negativa, siendo los mejores guías que Dios me envió.

Robalino Yanez, Edison David

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de culminar esta gran meta que a pesar de muchos obstáculos presentados tuve la fuerza, sabiduría para continuar y aprender de ellos. A toda mi familia, a la Universidad Católica Santiago de Guayaquil y la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo por brindarme la oportunidad de continuar mis estudios de cuarto nivel.

Agradezco al M. Sc. Fernando Palacios Meléndez por las enseñanzas impartidas durante este proyecto, por la dedicación y apoyo en este trabajo. Y a todas las personas que de alguna forma apoyaron en el desarrollo del presente trabajo, mis sinceros agradecimientos con todos.

A mis profesores que en transcurso de mi vida han aportado con sus conocimientos y sus consejos, aparte de ser excelentes docentes han sido muy buenos amigos, que colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

Robalino Yanez, Edison David



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
TUTOR

f.

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
REVISOR

f.

M. Sc. QUEZADA CALLE EDGAR RAUL
REVISOR

f.

M. Sc. ROMERO PAZ MANUEL DE JESÚS
DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas	XII
Resumen	XIII
Abstract	XIV
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes.	2
1.3. Definición del problema.....	3
1.4. Justificación del problema a investigar.	3
1.5. Objetivos	3
1.6. Hipótesis	4
1.7. Metodología y métodos de investigación.	4
Capítulo 2: Fundamentación Teórica.	5
2.1. Introducción a las comunicaciones inalámbricas de sensores.	5
2.2. Descripción general de las redes de sensores inalámbricos.	6
2.3. Estructura y funcionamiento de los nodos de una red de sensores.	7
2.4. Factores que influyen en el proceso de diseño de una red de sensores.	9
2.5. Pilas de protocolos en una red de sensores inalámbricas.	11
2.6. Redes de sensores inalámbricos móviles (Mobile WSN, MWSN).....	12
2.6.1. Tipos de redes de sensores inalámbricos móviles	14
2.6.2. Arquitectura jerárquica de redes de sensores móviles	16
2.7. Escenarios de aplicación de redes inalámbricas de sensores tradicionales y móviles.....	19
Capítulo 3: Simulación y análisis de resultados.	22
3.1. Descripción del modelo de simulación de una red de sensores inalámbricos.	22

3.2. Modelo energético	24
3.3. Modelo de flujo de datos	24
3.4. Modelo de consumo de energía	25
3.5. Análisis del algoritmo propuesto para eficiencia energética en una WSN.	27
3.6. Discusión de los resultados obtenidos.....	31
Conclusiones	32
Recomendaciones	33
Bibliografía.....	34

Índice de Figuras

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Arquitectura de una red inalámbrica de sensores (WSN).....	5
Figura 2. 2: Elementos que conforman un nodo sensor.	7
Figura 2. 3: Distribución y transmisión de datos de los nodos sensores.	8
Figura 2. 4: Estructura general de la pila de comunicaciones	11
Figura 2. 5: Arquitectura de una red inalámbrica de sensores móvil.	12
Figura 2. 6: Arquitectura de red de dos niveles con configuración ad-hoc. ..	16
Figura 2. 7: Arquitectura de red de dos niveles sin cobertura Ad-hoc.	17
Figura 2. 8: Arquitectura de tres niveles en una red inalámbrica de sensores móviles.	18

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Área o zona del despliegue de los nodos sensores.	22
Figura 3. 2: Agrupación y líder del primer grupo de nodos.	22
Figura 3. 3: Agrupación y líder del segundo grupo de nodos.	23
Figura 3. 4: Agrupaciones y líderes de todos los grupos de nodos.	23
Figura 3. 5: Enrutamiento inicial en el sensor líder del grupo.	24
Figura 3. 6: Esquema gráfico del modelo de radio en sensores inalámbricos.	26
Figura 3. 7: Resultados obtenidos para optimización del consumo de energía.	28
Figura 3. 8: Resultados obtenidos del rendimiento usando diferentes enrutamientos.	29
Figura 3. 9: Resultados obtenidos de la tasa de entrega de paquetes para diferentes enrutamientos.	29
Figura 3. 10: Diagrama de bloques de la codificación RS y BCH.	30

Índice de Tablas

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación para evaluar optimización del consumo de energía en los sensores.....	27
--	----

Resumen

El presente trabajo se desarrolla el examen complejo denominado “Análisis comparativo de protocolos de enrutamiento para la optimización del consumo energético en sensores inalámbricos”. El presente documento se divide en tres capítulos. En el capítulo 1 se caracteriza las generalidades del proyecto investigativo enfocado en la red de sensores inalámbricos. En el capítulo 2 se introducen los conceptos básicos de las redes de sensores inalámbricos (RSI, o Wireless Sensor Network (WSN)), es decir, el diseño de los nodos y el funcionamiento de la red, factores que desempeñan un papel importante en el proceso de diseño de una red de sensores inalámbricos (diseño de los nodos y pila de comunicaciones). También se presenta el diseño general de la pila de comunicaciones de las redes de sensores y las diferencias fundamentales entre las redes de sensores inalámbricas fijas y móviles y se analizan los tipos básicos de redes móviles con algunos ejemplos. En el capítulo 3, se presenta el diseño de la red de sensores inalámbrico y se evalúan comparativamente los protocolos de enrutamiento con el propósito de reducir el consumo energético y tiempo de vida útil de los sensores usando el software MatLab.

Palabras claves: Sensores, Redes, Protocolos, Eficiencia, Energético, Optimización.

Abstract

This paper develops the complex test called "Comparative analysis of routing protocols for energy consumption optimization in wireless sensors". This paper is divided into three chapters. Chapter 1 characterizes the generalities of the research project focused on wireless sensor network. Chapter 2 introduces the basic concepts of wireless sensor networks (WSN), i.e., node design and network operation, factors that play an important role in the design process of a wireless sensor network (node design and communication stack). The general design of the communication stack of sensor networks and the fundamental differences between fixed and mobile wireless sensor networks are also presented and the basic types of mobile networks are discussed with some examples. In Chapter 3, the design of the wireless sensor network is presented, and the routing protocols are comparatively evaluated for the purpose of reducing the energy consumption and lifetime of the sensors using MatLab software.

Keywords: Sensors, Networks, Protocols, Efficiency, Energy, Optimization.

Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.

1.1. Introducción.

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) no han dejado de generar un gran interés en las dos últimas décadas debido a la amplia gama de aplicaciones que permiten. Su autonomía, simplicidad de implementación y aspecto miniaturizado hacen posible su integración en una amplia gama de aplicaciones a pequeña y gran escala. (Alvarado Medellín et al., 2019)

Las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) según Cama-Pinto et al., (2016) consisten de un conjunto de sensores de diferentes características distribuidos en el espacio e interconectados a través de una red inalámbrica que forman nodos, las cuales se encargan de supervisar cooperativamente condiciones físicas o ambientales.

Las ciudades inteligentes, donde las tecnologías de la información y la comunicación se utilizan cada vez más en la vida cotidiana, ofrecen muchas oportunidades para las aplicaciones de las redes de sensores inalámbricas a gran escala (LS-WSN). De hecho, ante el fuerte crecimiento demográfico, el principal reto de estas ciudades es ofrecer servicios innovadores y de alto rendimiento que mejoren el entorno vital. ambiente de vida. En la mayoría de los casos, estas ciudades utilizan medios tecnológicos como el Internet de las Cosas (IoT), Big Data, Open Data y aplicaciones web/móviles. (Abba Ari et al., 2020)

En conclusión, las redes de sensores inalámbricos están compuestas por dispositivos electrónicos diseñados para medir una magnitud física del entorno en el que están desplegados y transmitir estas mediciones a un centro de información.

1.2. Antecedentes.

El presente trabajo del componente práctico del examen complejo se enfoca en la optimización del consumo energético en los sensores inalámbricos. Actualmente, existen diversas investigaciones que se enfocan

en la reducción del consumo de energía en las baterías de los sensores. Por ejemplo, Abbas & Otayf, (2021) propuso un método innovador para el consumo óptimo de energía en redes de sensores inalámbricas. El método presentado se basa en la comparación de protocolos de enrutamiento que contribuyen eficazmente a la reducción del consumo de energía en este tipo de redes. En esta comparación se ha observado la capacidad de esos protocolos de enrutamiento para reducir esa energía, pero en diferentes condiciones. Así, se concluye que se puede conseguir una reducción significativa del consumo de energía, de aproximadamente un 50%, con el método propuesto.

1.3. Definición del problema

Necesidad de implementar diferentes escenarios de simulación mediante el uso de protocolos de enrutamiento que permita la optimización del consumo energético en una red de sensores inalámbricos.

1.4. Justificación del problema a investigar.

Las similitudes con las redes inalámbricas tradicionales son limitadas y justifican el desarrollo de protocolos de comunicación adaptados. Las redes inalámbricas tradicionales suponen que el número de nodos de comunicación es pequeño y que sus recursos de hardware son abundantes. En cambio, los nodos sensores tienen energía, memoria y, en menor medida, recursos informáticos limitados, los despliegues son de alta densidad y las aplicaciones de las redes de sensores inducen patrones de tráfico específicos para la recogida de mediciones. La mayoría de los estudios han establecido diferentes enfoques, algoritmos, clústeres y protocolos para archivar la máxima eficiencia energética en el consumo de energía en la tecnología de sensores inalámbricos.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General:

Analizar comparativamente protocolos de enrutamiento para la optimización del consumo energético en sensores inalámbricos

1.5.2. Objetivos específicos:

- Describir la fundamentación teórica de las redes de sensores inalámbricos.
- Elaborar los algoritmos en MatLab de los protocolos de enrutamiento en una red de sensores inalámbricos.
- Evaluar comparativamente los resultados obtenidos en los escenarios de simulación de una red de sensores inalámbricos implementados en MatLab.

1.6. Hipótesis

Mediante simulación numérica en el software MatLab se comprobará que el algoritmo propuesto del protocolo de enrutamiento se obtiene el menor consumo de energía en los sensores inalámbricos. En el capítulo 3 se presenta el diseño y análisis de resultados a través del simulador numérico MatLab.

1.7. Metodología y métodos de investigación.

El presente trabajo se utiliza un diseño de investigación descriptivo, exploratorio y explicativo. El primero permite realizar una revisión literaria del estado del arte de las comunicaciones de sensores inalámbricos fijos y móviles. El segundo nos permitió explorar los diferentes algoritmos encontrados durante la revisión literaria y la puesta en práctica mediante el software MatLab. Y explicativo porque mediante el análisis de los resultados obtenidos se observa la optimización en el consumo energético en las baterías de los sensores inalámbricos.

Capítulo 2: Fundamentación Teórica.

2.1. Introducción a las comunicaciones inalámbricas de sensores.

En una red de sensores inalámbricos (WSN) típica, hay un gran número de sensores distribuidos en la zona de interés (véase la figura 2.1), cada uno de los cuales es capaz de recoger la información traducida. Estos sensores envían la información recogida a la estación base (Base Station, BS). En una WSN, uno de los principales retos es la energía limitada como resultado de las limitaciones físicas de las unidades de suministro de energía. (Dalal & Kukarni, 2021)

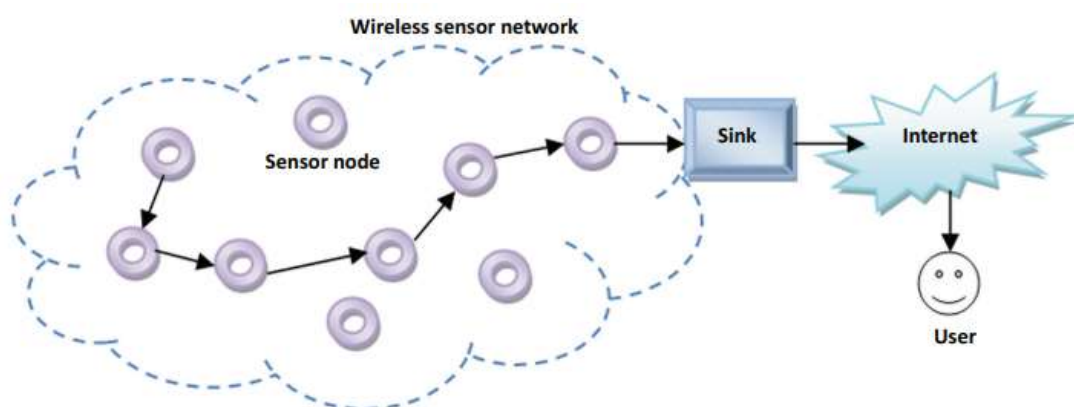


Figura 2. 1: Arquitectura de una red inalámbrica de sensores (WSN).
Fuente: (Abbas & Otayf, 2021)

En general, no es posible reemplazar o recargar los sensores, ya que se espera que sean reubicados o que funcionen fuera del sitio. Esto nos lleva a la necesidad de utilizar la energía de la manera más eficiente. Los sensores y las plataformas de sensores deben gestionarse para utilizar los recursos de los sensores de forma eficaz y eficiente. Se necesita una estructura de sensores autoorganizada, tolerante a los fallos y con un funcionamiento óptimo. Las pérdidas de sensores, la regeneración del número y la incertidumbre dificultan la búsqueda del número óptimo de sensores. (Abdulkarem et al., 2020)

Además, esta optimización se hace aún más difícil debido a las limitaciones de recursos, el tráfico desequilibrado, la sobrecarga de datos, la dinámica de la red, el balance energético, los múltiples tipos de tráfico, la criticidad de los paquetes, etc. Por ello, se han realizado numerosos estudios

en este ámbito. En esta sección se investigarán los métodos de consumo de energía en las redes de sensores inalámbricas.

En la investigación de Alvarado et al., (2017) analizaron la elección del mejor modelo de protocolo energético para una topología y despliegue aleatorios en una red de sensores, considerando la fase de establecimiento de clústeres y la transmisión estable de datos, en relación con diferentes tipos de consumo de energía, distancias e interferencias. Adicional, los autores escogieron dos protocolos de enrutamiento para simular en el software MATLAB, el primer protocolo de enrutamiento utilizado fue la jerarquía de agrupación adaptativa de baja energía (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH) que utiliza la rotación aleatoria de las cabezas de clúster en la red y este protocolo considera todos los parámetros que serán probados. El segundo protocolo utilizado fue el algoritmo de número óptimo de cabezas de clúster (Optimal Number of Cluster Heads, ONCH) según este algoritmo la mejor manera de obtener energía segura de una mejor manera es optimizando el número de cabezas de clúster en la red teniendo en cuenta el número de nodos, radio, diferentes coeficientes de enrutamiento y el consumo de energía.

En la investigación de (Agarwal et al., 2018) se simula y analiza el funcionamiento del protocolo LEACH con la ayuda de MATLAB. Este protocolo fue analizado en términos de varios parámetros significativos de la WSN como el tiempo de vida de la red, el rendimiento, el flujo de paquetes a la estación base. Los resultados mostraron que la selección aleatoria de cada nodo para convertirse en CH disminuye el consumo de energía. El tiempo de vida de la red variaba significativamente con la ubicación de la estación base en el campo. La posición central fue la óptima para mejorar el rendimiento de LEACH.

2.2. Descripción general de las redes de sensores inalámbricos.

Los dispositivos en una red inalámbrica de sensores se utilizan para observar los fenómenos que ocurren en el área de estudio de interés (aplicaciones militares, por ejemplo, el campo de batalla, y aplicaciones

civiles, por ejemplo, el seguimiento de los cambios en los factores ambientales, tales como los niveles de contaminación, etc.) (Dalal & Kukarni, 2021; Deepika & Niranjana, 2018)

Gracias a los avances tecnológicos, es posible construir dispositivos sensoriales de pequeño tamaño, en gran número y con poca inversión. La tendencia mundial es aspirar a construir un dispositivo sensorial del orden de los milímetros con un coste inferior a 1 dólar por unidad. Esto permitirá el uso de nodos sensores a una escala sin precedentes, aumentando la precisión de las lecturas (distribuidas) y, por lo tanto, aproximar las observaciones remotas al mundo real.

2.3. Estructura y funcionamiento de los nodos de una red de sensores.

Un nodo sensor inalámbrico típico utilizado en las redes de sensores inalámbricos se compone de (véase la figura 2.2): un módulo inalámbrico (responsable de la comunicación con otros elementos de la red), un módulo de procesamiento de datos (normalmente un microcontrolador (uC)) y un dispositivo de procesamiento de señales digitales (DSP), un sistema que soporta cálculos complejos (por ejemplo FPGA), un módulo de alimentación (estabilizadores, sistemas de captación de energía ambiental), un módulo de sensores (que incluye un sensor o conjunto de sensores, por ejemplo, acústicos, ópticos, magnetómetros, acelerómetros, químicos, etc.) y un módulo de localización de nodos (por ejemplo, GPS), e incluso un módulo de movimiento (desplazamiento de un nodo sensor). (M. A. Matin & Islam, 2012)

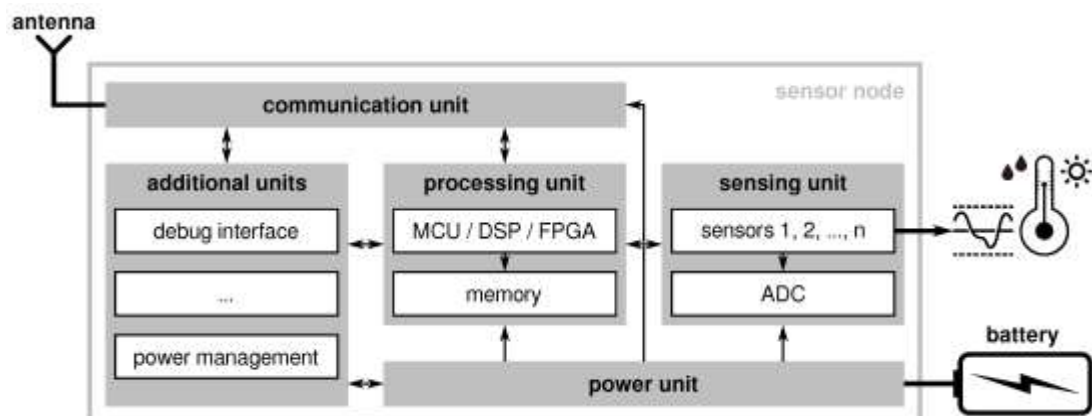


Figura 2. 2: Elementos que conforman un nodo sensor.

Fuente: (Widhalm et al., 2021)

Los nodos sensores se utilizan para observar los fenómenos que ocurren en el área de estudio (campo de batalla para aplicaciones militares, seguimiento de los cambios en los factores ambientales, por ejemplo, los niveles de los componentes de la contaminación del aire para aplicaciones civiles). La observación no se produce en un único nodo, sino con la ayuda de una red de nodos (observación distribuida), en la que los nodos individuales forman la llamada red ad-hoc. La observación se lleva a cabo mediante el envío de una solicitud a la red o mediante el envío de las lecturas de los nodos individuales de forma espontánea (periódicamente o provocada por un evento) al observador (sumidero).

Los nodos sensores suelen estar distribuidos aleatoriamente por la zona observada, tal como se observa en la figura 2.2. Cada sensor inalámbrico tiene la capacidad de recoger datos sensoriales y transmitirlos al nodo coordinador. En el caso de redes grandes, por ejemplo, divididas en subredes, el nodo coordinador puede ser el nodo que gestiona el flujo de datos en una parte determinada de la red. En estas redes de área amplia, los nodos gestores intercambian los datos recogidos entre sí y los transmiten al nodo coordinador final. El nodo coordinador puede comunicarse con el nodo que gestiona toda la red a través de Internet o de enlaces por satélite.

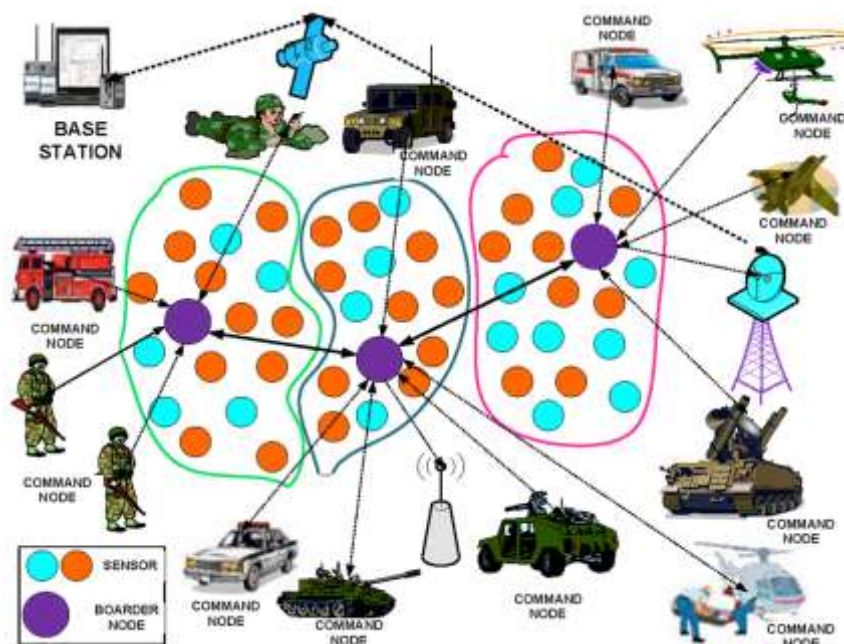


Figura 2. 3: Distribución y transmisión de datos de los nodos sensores.

Fuente: (Razaque & Elleithy, 2014)

2.4. Factores que influyen en el proceso de diseño de una red de sensores.

En el diseño del nodo, de una red de sensores y de la comunicación de los nodos (pila de comunicación) influyen directamente factores como:

- a. la tolerancia de la red al fallo de los nodos: los nodos sensores pueden dejar de funcionar correctamente o apagarse debido al agotamiento de la batería, a daños físicos o a interferencias de radio. El mal funcionamiento de un nodo no debe afectar al funcionamiento de toda la red de sensores.
- b. la escalabilidad de la red: el número de nodos sensores distribuidos por la zona de estudio puede alcanzar los miles y, en casos extremos, incluso superar el millón. Por el contrario, la densidad con la que se distribuyen los nodos es del orden de unos pocos a unos pocos cientos en un área con un radio de 10 m o menos. La tarea de los ingenieros es diseñar la red de tal manera que pueda hacer frente a una gran y un número variable de nodos.
- c. el coste de fabricación del nodo: dado que una red de sensores se construye a partir de un gran número de nodos, el coste de un solo elemento de la red debe ser lo suficientemente bajo como para que la vigilancia de la zona de estudio mediante una red de sensores inalámbricos sea económicamente viable.
- d. las limitaciones de hardware: en la mayoría de las redes de sensores, todos los módulos que componen un nodo sensor deben caber en una caja pequeña, a veces incluso de menos de 1 cm³. Además, el nodo sensor debe consumir poca energía, permitir su funcionamiento en redes con un gran número de nodos, ser barato de fabricar, ser un dispositivo autónomo y poder adaptarse a variaciones en las condiciones de funcionamiento.
- e. la topología de la red de sensores: la densidad de distribución de los nodos sensores puede alcanzar valores del orden de 20 nodos por m³, los nodos pueden ser estacionarios o formar una red de sensores móviles. Por lo tanto, el conocimiento del despliegue de nodos es importante en la gestión de redes de sensores. Se distinguen tres etapas de cambio de topología de la red: despliegue inicial de nodos,

topología después del despliegue de nodos y cambio de topología de nuevo. La primera etapa del cambio de topología está relacionada con la forma de desplegar los nodos sensoriales. Los nodos pueden desplegarse de uno en uno o en masa (lanzados desde un avión, disparados desde un cañón, desplegados por un misil o cohete, etc.). Una vez desplegada, pueden producirse cambios en la topología de la red debido al mal funcionamiento de los nodos, a las interrupciones de la comunicación, al agotamiento de la batería o puede deberse a las tareas que realiza la red (movimiento de nodos). En última instancia, la topología de la red puede modificarse (restaurarse), sustituyendo los nodos que funcionan mal o las tareas que los nodos de las redes móviles).

- f. el entorno operativo: los nodos sensores suelen estar densamente distribuidos. Pueden estar cerca del fenómeno que se observa o ubicados dentro del fenómeno que tiene lugar. Los sensores pueden vigilar los fenómenos que tienen lugar en el interior de los equipos, en el fondo del océano, en terrenos contaminados química o biológicamente, o utilizarse para observar un campo de batalla.
- g. el medio de comunicación: los nodos sensores se comunican entre sí de forma inalámbrica. Para ello se utilizan técnicas de comunicación por radio u óptica (por ejemplo, infrarrojos). Una de las principales desventajas de las técnicas ópticas utilizadas es el requisito de visibilidad directa de los nodos que se comunican entre sí. Cuando el alcance es lo más importante, el estándar de comunicación inalámbrica utilizado es el IEEE 802.11 (WiFi). WiFi no está hecho para las redes de sensores y se está desarrollando todo el tiempo para satisfacer, entre otras cosas, la movilidad. Otros estándares populares desarrollados desde cero para aplicaciones de redes de sensores son IEEE 802.15.4, ZigBee (basado en el estándar IEEE 802.15.4), WirelessHART, ISA100.11, IETF 6LoW-PAN, IEEE 802.15.3. La banda sin licencia ISM (Industrial, Scientific, Medical), a menudo utilizada por algunas de las normas mencionadas.
- h. las necesidades energéticas de los nodos: los nodos sensores inalámbricos, debido a su tamaño, suelen llevar baterías con una

capacidad inferior a 500 mAh y un voltaje de 1.2 V. En muchos casos, la sustitución de la batería no es posible. En las comunicaciones inalámbricas Ad-hoc multisalto, cada nodo tiene un doble papel, es decir, genera datos (lecturas sensoriales) y es un enrutador de datos. El mal funcionamiento de un nodo puede provocar cambios importantes en la topología de la red y la necesidad de reorganizar el encaminamiento de los datos. Por esta razón, el diseño de las redes de sensores requiere el uso de técnicas de ahorro y gestión de la energía a nivel de nodo y de red, es decir, protocolos de intercambio de datos y algoritmos de procesamiento de datos energéticamente eficientes. Por lo tanto, el tiempo de vida del nodo, y en consecuencia de toda la red de sensores, depende en gran medida de la duración de la batería.

2.5. Pilas de protocolos en una red de sensores inalámbricas.

La estructura para la comunicación de los nodos esclavos y maestros (observadores) en las redes de sensores inalámbricas se muestra en la figura 2.4.

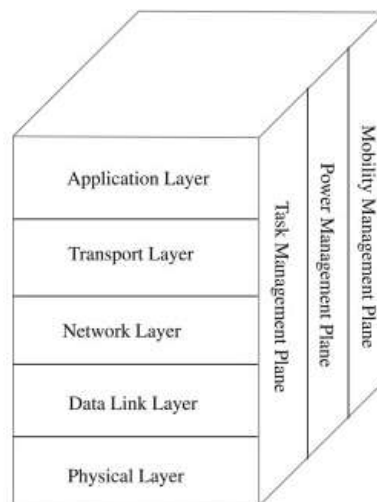


Figura 2. 4: Estructura general de la pila de comunicaciones

Fuente: (Dhongdi et al., 2017)

La capa de comunicación se construye a partir de una capa física (Physical Layer), una capa de enlace de datos (Data Link Layer), una capa de red (Network Layer), una capa de transporte (Transport Layer) y una capa de aplicación (Application Layer). Las capas también incluyen esquemas de

gestión de la energía, gestión de la movilidad y gestión de las tareas que apoyan la coordinación de las tareas emitidas a la red y su funcionamiento de una manera eficiente y de bajo consumo.

La capa física se encarga de las técnicas adecuadas para la modulación, transmisión y recepción de datos a través del medio radioeléctrico. El gran número de otros nodos y la movilidad de estos contribuyen a las interferencias en el medio. La tarea de la capa de enlace de datos (protocolos MAC) es gestionar el medio de forma eficiente desde el punto de vista energético y evitar colisiones en la transmisión de datos de los nodos sensores. La capa de red se ocupa del encaminamiento de los datos que proporciona la capa de transporte entre los nodos. La capa de transporte, por su parte, soporta el flujo de datos en respuesta a las peticiones de la aplicación de la red de sensores. Dependiendo de la aplicación a la que se destine la red de sensores, se ejecutan diferentes tipos de software en la capa de aplicación.

2.6. Redes de sensores inalámbricos móviles (Mobile WSN, MWSN).

La principal diferencia entre las redes de sensores inalámbricas móviles (MWSN) y las fijas es la movilidad de (algunos o todos) los nodos y el observador. En comparación con las redes de sensores estándar, la movilidad incrementa principalmente la vida útil de toda la red y posibilita un mejor cumplimiento respecto a los requisitos de tiempo que se imponen a las operaciones que realiza. La figura 2.5 muestra la arquitectura de una red inalámbrica de sensores móviles.

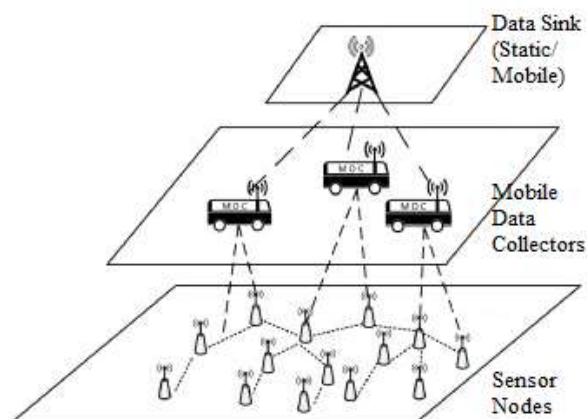


Figura 2. 5: Arquitectura de una red inalámbrica de sensores móvil.

Fuente: (Abuarqoub et al., 2017)

El diseño de las redes móviles difiere poco de las redes fijas, siendo las principales diferencias:

- ✓ Debido a la movilidad de los elementos de la red, las MWSN se caracterizan por ser una topología más dinámica. Normalmente, se supone que la movilidad del observador (sumidero o sink) se produce de forma aleatoria. La movilidad de la red tiene un impacto significativo en la elección de los parámetros para el funcionamiento de los protocolos MAC y la capa de hardware (capa física).
- ✓ Se supone que los sumideros de acceso (gateway sinks) están equipados con una fuente de alimentación inagotable y recursos de procesamiento y almacenamiento ilimitados. Las baterías agotadas de los nodos móviles pueden recargarse o sustituirse por otras nuevas. Los observadores móviles, en cambio, tienen acceso a la infraestructura de procesamiento y almacenamiento de datos.
- ✓ La movilidad de los elementos de la red impone importantes limitaciones al funcionamiento de los protocolos de encaminamiento y de la capa de acceso al medio (MAC). Por lo tanto, la mayoría de las soluciones utilizadas en las redes de sensores fijas no son directamente aplicables debido a su escaso rendimiento en el caso de los cambios de topología dinámicos que se producen en las redes móviles.
- ✓ La gran dinámica de las redes de sensores inalámbricos móviles contribuye a la baja fiabilidad de los enlaces de radio entre los elementos de la red. Este es el caso más frecuente en la vigilancia de sitios remotos, donde el establecimiento de la conectividad con el mínimo requerido de QoS (Quality of Service, QoS) es problemático.
- ✓ Debido a la naturaleza altamente dinámica de la topología de la red, el conocimiento de la posición de los elementos de la red es importante en las MWSN.

Además, las redes de sensores móviles permiten un uso más eficiente de los recursos energéticos. Los nodos sensores que están más cerca de los observadores de acceso, debido a su distancia y a las tareas que realizan (como el intercambio de lecturas sensoriales con otros nodos), son los

primeros en agotar sus recursos energéticos. Esto contribuye a una rápida pérdida de funcionalidad de la red.

Por otro lado, los elementos de las redes de sensores inalámbricos móviles (MWSN) permiten un uso más eficiente de los recursos energéticos debido a la posición variable de un mismo nodo en la red. Las MWSN se caracterizan por una capacidad mucho mayor de los canales de radio en comparación con las soluciones fijas, de 3 a 5 veces según (suponiendo una relación lineal entre el número de nodos y observadores). Las redes estacionarias deben colocar los nodos sensores cerca o en la proximidad del fenómeno observado.

Cuando el objeto observado se mueve, la condición de proximidad de los nodos y los objetos observados puede no cumplirse. En cambio, las MWSN, en los que la movilidad de los nodos permite una mayor proximidad al objeto vigilado, no tienen este tipo de limitaciones. El desplazamiento de los nodos en una red móvil también mejora el intercambio de datos. Esto es especialmente importante en las redes distribuidas, donde los fragmentos individuales no se comunican entre sí debido a la distancia.

La movilidad de los nodos permite que estas redes mantengan el flujo de datos entre esos fragmentos de red aislados. Otra ventaja de las MWSN es la calidad de los datos que proporciona la red. Se sabe que la probabilidad de error aumenta a medida que aumenta el número de multisaltos por los que hay que transmitir los datos. Al mover los nodos, se puede reducir el número de estas transiciones, lo que simultáneamente reduce la probabilidad de errores y también los requisitos de energía (reducción del número de retransmisiones).

2.6.1. Tipos de redes de sensores inalámbricos móviles

Debido a la forma en que se realiza el intercambio de datos, se distinguen dos tipos de redes de sensores inalámbricos móviles (MWSN). El primer tipo es una red de infraestructura, en la que un nodo móvil se conecta

por radio a la estación base más cercana (observador fijo). Se trata de una solución similar a la utilizada para la telefonía móvil.

El segundo tipo de MWSN es una red sin infraestructura comúnmente conocida como red ad-hoc. este tipo de red no requiere un nodo dedicado para el enrutamiento de datos, todos los nodos (elementos de la red) pueden moverse libremente y al mismo tiempo tienen la capacidad de autoorganizarse y establecer la comunicación por radio de forma arbitraria.

Las redes de sensores fijas (véase la figura 2.1) utilizan un modelo de arquitectura de red plana. Las lecturas sensoriales se transmiten (enrutan) desde el nodo que genera los datos (que registra las lecturas sensoriales) hasta el observador/usuario a través de una red ad-hoc de múltiples saltos, y cada nodo se caracteriza por patrones similares de utilización de recursos energéticos, la transmisión y el archivo de datos.

Con esta arquitectura de red, la capacidad de la red disminuye asintóticamente, según $Q(1/\sqrt{n})$, a medida que aumentan el número de nodos y la demanda de energía. Esto implica que la probabilidad de perder los datos transmitidos durante la comunicación multicast aumenta con el tamaño de la red. Los datos perdidos o transmitidos incorrectamente deben ser reenviados. Como resultado, a medida que la red sensorial crece, su rendimiento disminuye.

La dinámica de los cambios en la topología de las redes de sensores móviles requiere una mejor adaptación de la arquitectura de la red a los cambios que se producen. Por este motivo, el uso de soluciones procedentes de redes de sensores fijas no permite a las redes móviles alcanzar una eficiencia energética similar y los regímenes de tiempo impuestos al intercambio de datos. La solución a este problema es el uso de una arquitectura de red jerárquica, que mejora la eficiencia energética de las operaciones de la red y reduce los retrasos en la transmisión de datos (especialmente importante en el caso de las redes de sensores casi en tiempo real).

2.6.2. Arquitectura jerárquica de redes de sensores móviles

Se presentan dos conceptos de arquitectura jerárquica para redes de sensores móviles, a saber, de dos y tres niveles.

a. Red de dos niveles:

En una arquitectura de red de dos niveles, la capa superior (en lo sucesivo denominada "Shell" u "overlay" para la WSN) está constituida por nodos móviles (por ejemplo: nodos sensores u otros dispositivos móviles inalámbricos con energía y capacidad de procesamiento de datos), tal como se observa en las figuras 2.6 y 2.7. La figura 2.6 muestra una arquitectura de red de dos niveles cuando todos los elementos móviles (en adelante denominados agentes móviles) de la red pueden autoorganizarse en una red Ad-hoc.

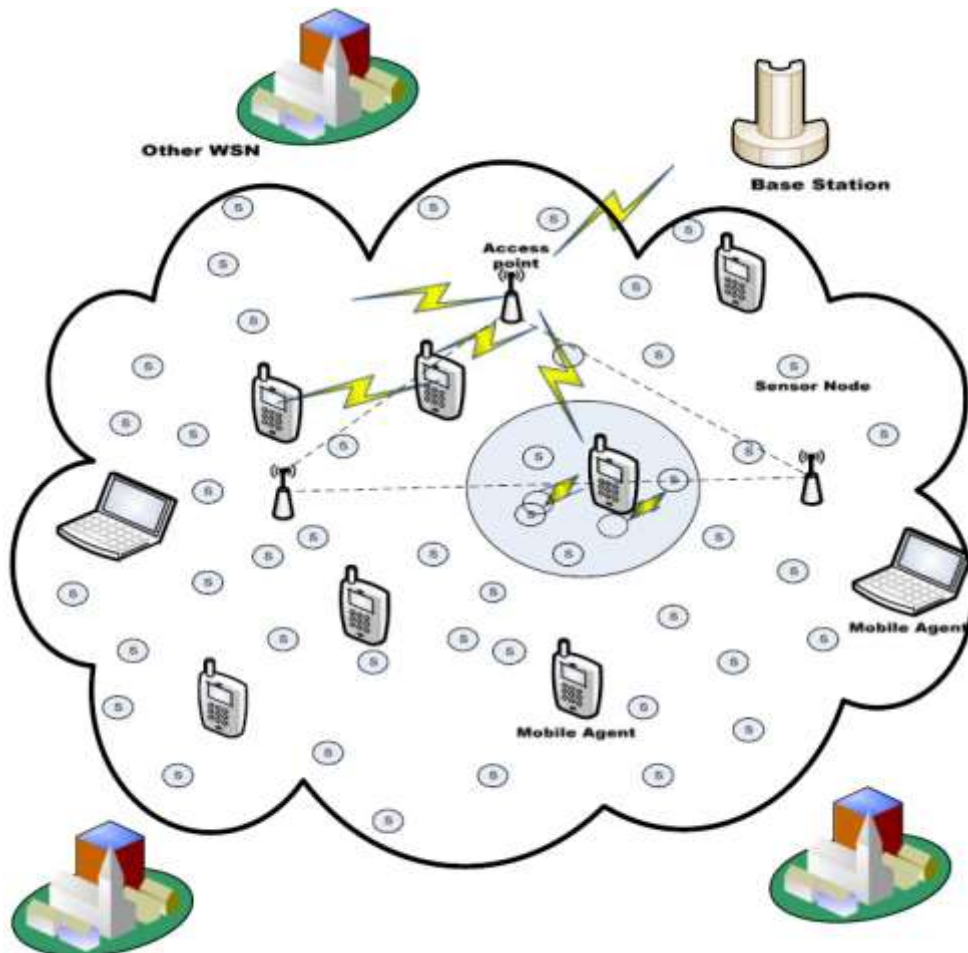


Figura 2. 6: Arquitectura de red de dos niveles con configuración ad-hoc.

Fuente: (Sara & Sridharan, 2014)

La topología de la superposición móvil, que es aleatoria y temporal, depende de la posición relativa de los elementos móviles de la red, y se

necesita un número importante de nodos para su existencia. Cuando no hay suficientes nodos móviles o están dispersos en una gran zona, se utiliza la solución alternativa que se muestra en la figura 2.7. Cada elemento de la red móvil registra datos sensoriales o toma lecturas de sus vecinos más cercanos. Los datos recogidos sólo se transmiten al observador/usuario cuando éste se encuentra dentro de su radio de acción. La validez de los datos que se van a transmitir al usuario afecta al tiempo que tarda el nodo móvil en entregarlos (es decir, el retardo máximo permitido, que constituye la validez de los datos).

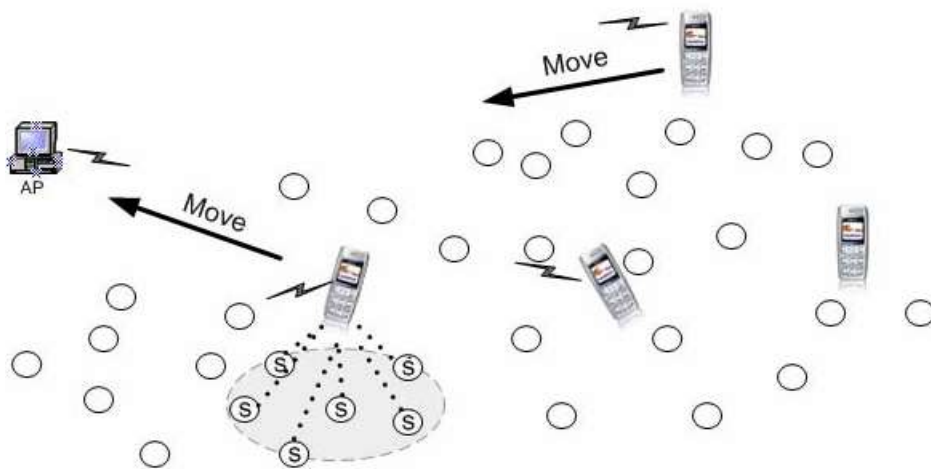


Figura 2. 7: Arquitectura de red de dos niveles sin cobertura Ad-hoc.
Fuente: (Munir et al., 2007)

b. Red de tres niveles.

Una arquitectura de red de tres niveles aprovecha las propiedades de los elementos de red fijos (pasarelas de acceso) y móviles (agentes móviles) y se basa en el funcionamiento de una superposición ad-hoc y una red con infraestructura. En una red de este tipo, el rendimiento se describe mediante la relación \sqrt{r} , donde $r < n$ es el número de agentes (elementos móviles de la red). Aunque el número de agentes móviles no cambia la relación que describe el rendimiento, permite reducir la demanda de pasarelas de acceso y, por tanto, reducir el consumo de energía de los elementos de la red.

La arquitectura de red de tres niveles permite una mayor eficiencia energética en comparación con las redes de arquitectura plana. Los agentes móviles permiten ahorrar los limitados recursos energéticos de los nodos al

eliminar la necesidad continua de que los nodos vecinos supervisen los enlaces de radio. Cuando se trata de registrar las lecturas sensoriales, la capa intermedia de esta solución de tres niveles tiene la capacidad de almacenar en caché y reenviar los datos comprimidos al observador/usuario (destino)

Por lo tanto, la solución de una arquitectura de MWSN con un número relativamente pequeño de elementos de red de nivel superior, pero caracterizados por grandes recursos energéticos y las capacidades de procesamiento de datos, así como el acceso rápido por radio, en muchos casos puede aumentar significativamente el rendimiento de la red en general (es decir, el rendimiento, la fiabilidad, longevidad y versatilidad). La capa más baja de la arquitectura de tres niveles está formada por nodos distribuidos aleatoriamente nodos sensoriales (generalmente inmóviles - estacionarios), tal como se muestra en la figura 2.8.

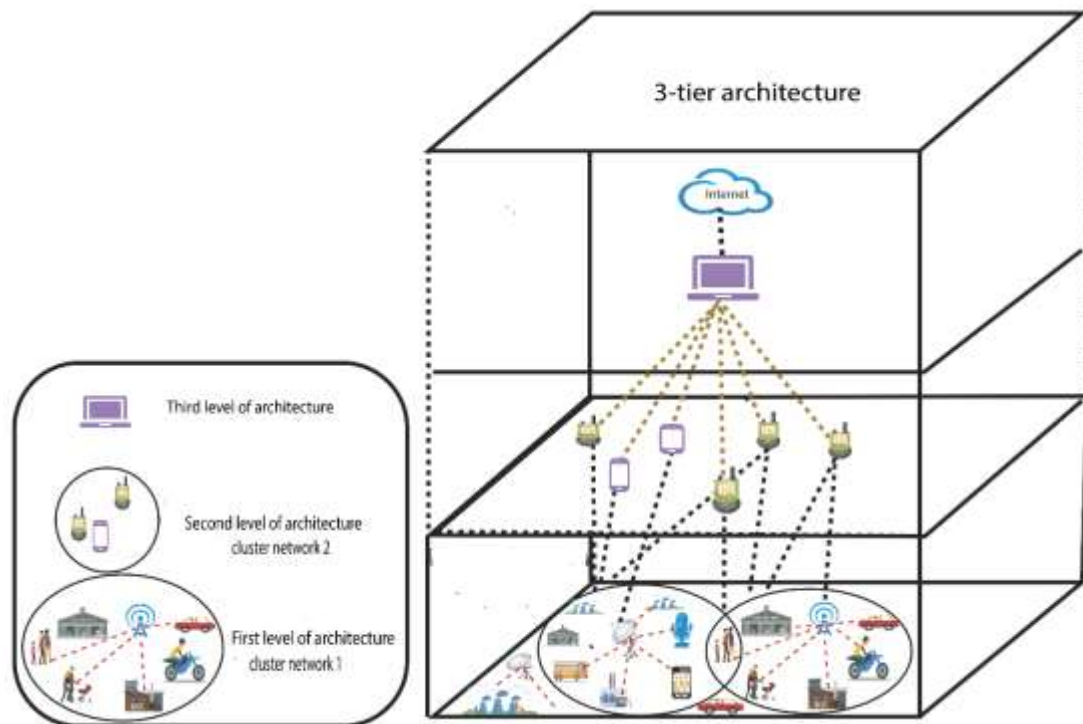


Figura 2. 8: Arquitectura de tres niveles en una red inalámbrica de sensores móviles.

Fuente: (Abba Ari et al., 2020)

Estos nodos se comunican con elementos de red de nivel superior (agentes) en su entorno inmediato y pueden organizarse en una red Ad-hoc. Un rasgo característico de esta solución de tres niveles es la movilidad de la

capa media. Los agentes pueden moverse libremente (al azar) y su tarea es recoger datos (por ejemplo, lecturas sensoriales) de la capa inferior y entregarlos a la capa superior.

La capa superior es una red con una infraestructura establecida, normalmente formada por puntos de acceso alámbricos o inalámbricos y basada en una estructura ad-hoc o de malla. Los nodos de acceso pueden implementar la comunicación basada en IEEE 802.11, la telefonía móvil o utilizar otras soluciones inalámbricas. La capa superior también puede utilizarse para interconectar múltiples WSN móviles locales. Los agentes móviles pueden ser no sólo nodos sensores, sino también otros dispositivos inalámbricos con diferentes características energéticas y de procesamiento de datos que se llevan o se instalan en los vehículos (por ejemplo: teléfonos móviles, nodos sensores en vehículos de transporte privado y público, ordenadores portátiles e incluso animales).

2.7. Escenarios de aplicación de redes inalámbricas de sensores tradicionales y móviles.

Los posibles escenarios de aplicación de las redes de sensores inalámbricos (WSN) tradicionales, que se prevén por el momento, incluyen la monitorización medioambiental, la vigilancia militar de los hogares equipados digitalmente, la monitorización de la salud, la monitorización de la fabricación, la conferencia, el seguimiento y la detección de vehículos (telemática) y el control de inventarios. (Egas et al., 2019)

Dado que las redes de sensores inalámbricos móviles son un concepto relativamente nuevo, sus áreas de aplicación específica y única aún no están claramente definidas. La mayoría de sus escenarios de aplicación son los mismos que los de las redes de sensores inalámbricos tradicionales, con la única diferencia de la movilidad del sumidero móvil, preferentemente en forma de teléfonos móviles. (Rueda & Talavera Portocarrero, 2017)

Sin embargo, se prevé un espacio en el que los sensores estarán colocados alrededor nuestro, un concepto de red ubicua, en el que diferentes

tecnologías prometedoras trabajarán juntas. Con estos sensores colocados en todas partes, un solo teléfono móvil individual pueda entrar en "sesión" con la "red de sensores actual" en la que está presente. El teléfono móvil dispondrá de las interfaces necesarias para permitirle comunicarse con el mundo heterogéneo. En la mayoría de los casos, este teléfono móvil "entrará" en la red como uno de los de los sumideros móviles. De este modo, un teléfono móvil puede entrar en la sesión en cualquier momento y lugar; en el aeropuerto, la estación de tren, los edificios comerciales, la biblioteca, los parques, los autobuses, el hogar, etc.

A continuación, se describen diferentes aplicaciones de los nodos sensores inalámbricos fijos y móviles:

a. Gestión de operaciones

La monitorización de áreas es una aplicación común de las WSN. En la monitorización la WSN se despliega en una región en la que se debe supervisar algún fenómeno. Un ejemplo militar es el uso de sensores para detectar intrusiones enemigas; un ejemplo civil es la geocercas de gasoductos u oleoductos.

b. Monitoreo del cuidado de la salud

Las aplicaciones médicas pueden ser de 2 tipos: vestibles e implantadas. Los dispositivos vestibles se utilizan en la superficie corporal de un ser humano o simplemente en la proximidad del usuario. Los dispositivos médicos implantables son los que se insertan en el interior del cuerpo humano. También hay más aplicaciones, como la medición de la posición del cuerpo y la localización de personas, o monitoreo general de pacientes enfermos en hospitales y hogares. Las redes de área corporal pueden recoger información sobre la salud, el estado físico y el gasto energético de un individuo.

c. Sensores ambientales/de la tierra

Hay muchas aplicaciones en la monitorización de parámetros ambientales, de las que se dan ejemplos a continuación. En comparten los retos adicionales de los entornos difíciles y de suministro de energía reducido.

d. Vigilancia de la contaminación atmosférica

Las redes de sensores inalámbricos se han desplegado en varias ciudades para controlar la concentración de gases peligrosos para ciudadanos. Éstas pueden aprovechar los enlaces inalámbricos ad hoc ad hoc en lugar de las instalaciones cableadas, lo que también las hace más móviles para comprobar las lecturas en diferentes zonas.

Capítulo 3: Simulación y análisis de resultados.

3.1. Descripción del modelo de simulación de una red de sensores inalámbricos.

En este estudio se ha utilizado la herramienta de simulación MatLab 2018a para diseñar y evaluar el modelo de simulación propuesto utilizando técnicas de enrutamiento que permita reducir el consumo de energía en la red de sensores inalámbricos. Para el modelo de simulación propuesto, se seleccionaron 100 sensores en una superficie de $200 \times 200 \text{ m}^2$. El área o zona de instalación de los sensores se muestra en la figura 3.1. En la figura 3.2 se observa la primera agrupación de nodos y al nodo líder de la agrupación.

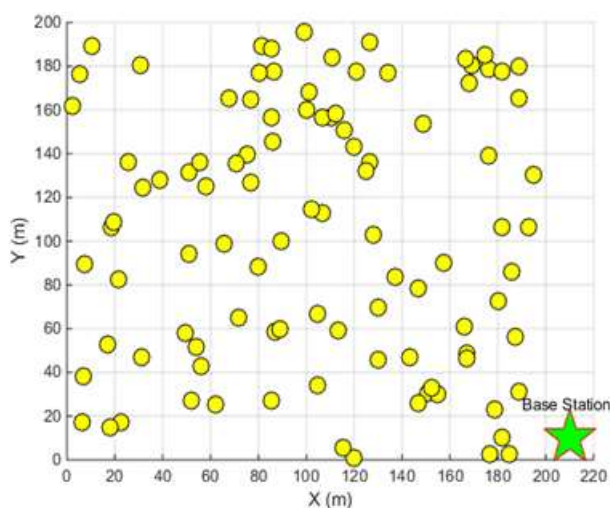


Figura 3. 1: Área o zona del despliegue de los nodos sensores.
Elaborado por: Autor.

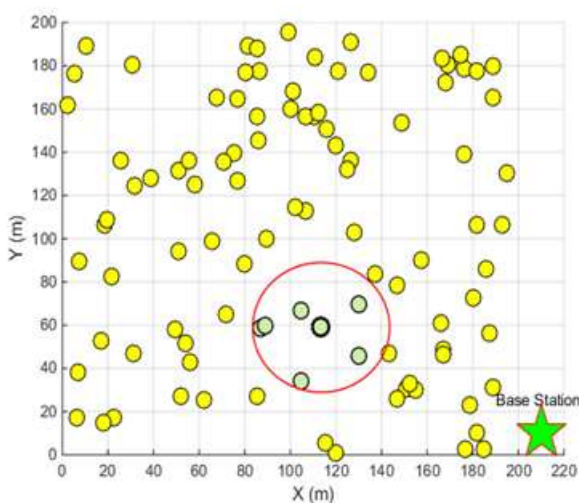


Figura 3. 2: Agrupación y líder del primer grupo de nodos.
Elaborado por: Autor.

El segundo grupo y el líder se muestran en la figura 3.3. Todas las agrupaciones y los líderes de las agrupaciones se muestran en la figura 3.4.

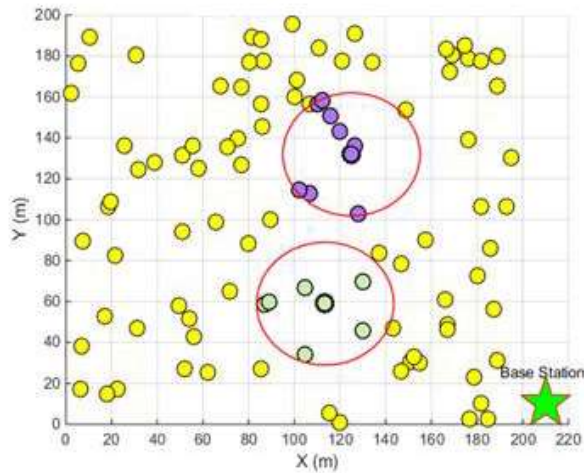


Figura 3. 3: Agrupación y líder del segundo grupo de nodos.
Elaborado por: Autor.

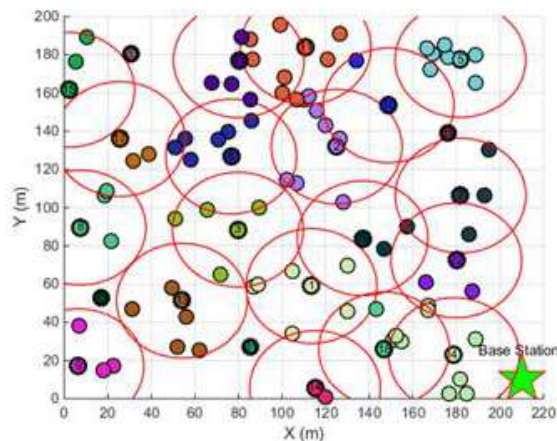


Figura 3. 4: Agrupaciones y líderes de todos los grupos de nodos.
Elaborado por: Autor.

Se seleccionará el camino más corto entre los líderes de los grupos. Se seleccionan un total de 5 líderes de grupo para enviar la información a la estación base (Base Station, BS). Esto significa que 5 cabezas de grupo utilizarán energía para enviar la información. Si este tiempo es largo, la energía utilizada será mayor que la del camino más corto. Por ejemplo, si sólo hay un líder de grupo para enviar la energía, este líder de grupo utilizará poca energía. Lo explicado en este escenario se muestra en la figura 3.5. Los códigos de software aplicados en este estudio figuran en el apéndice.

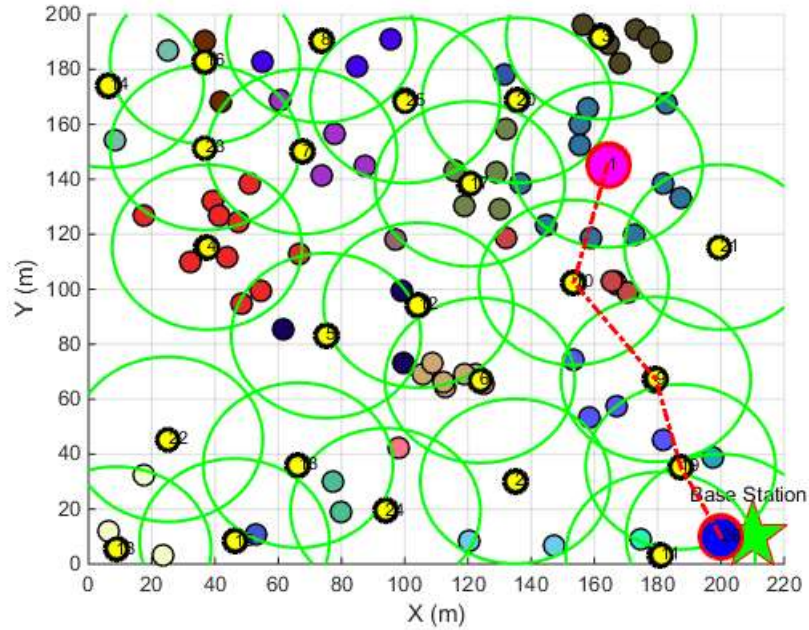


Figura 3. 5: Enrutamiento inicial en el sensor líder del grupo.
Elaborado por: Autor.

3.2. Modelo energético

En este caso, hay dos casos en los que se desperdicia la energía de un nodo sensor a partir de la energía de otros nodos sensores consumida mientras el nodo sensor está recibiendo datos, el otro nodo sensor envía información después de un determinado tiempo.

$$(P_{tx})_{ij} = \rho + \varepsilon d\alpha_{ij}$$

$$P_{rx} = \rho$$

$(P_{tx})_{ij}$: es la energía consumida para la transferencia de datos de 1 bit del nodo i al nodo j

P_{rx} : es la energía consumida para recibir datos de 1 bit

ρ : es la energía consumida en el hardware del nodo sensor

ε : es el factor de eficiencia energética del transceptor

$d\alpha_{ij}$: es la distancia entre el nodo i y el nodo j

3.3. Modelo de flujo de datos

Con este modelo se inicia una trayectoria limitada, es decir, el centroide del sensor donde se transmiten los otros nodos del sensor entre la estación base. Este modelo es una transferencia de las partes que faltan de dos tipos

de modelos del tipo de decisión. Los nodos sensores en un modelo en el que los datos se envían específicamente a la estación base, como la esencia sugiere, la partición es de una manera poco razonable, y los sensores más distantes consumen energías de manera inmediata.

Los datos generados se determinan a partir de los datos identificados: proveedores de confianza, emisor, estación base. Debido a la pila de datos de los nodos adyacentes se intensifica la vida útil total del marco, donde examinamos una medida extrema de impedancia. Por lo tanto, cada uno de los nodos sensores que hablan con el centro de sensores y la estación base se equilibra favoreciendo los usos imperiales.

La primera restricción es que ningún flujo de datos puede ser negativo. La cantidad de datos transmitidos a través del sensor se define como:

$$f_{ij} \geq 0$$

En segundo lugar, la energía transmitida por cada sensor es igual a la diferencia de la energía total recogida de los demás sensores. La energía total consumida por cada sensor viene dada por:

$$P_{rx}(\sum f_{ij}) + P_{tx,ij}(\sum f_{ij}) \leq e_i$$

De la ecuación anterior, se entiende que la suma de la energía gastada $P_{rx}(\sum f_{ij})$ y la energía consumida al acumular los datos obtenidos $P_{tx,ij}(\sum f_{ij})$ de otros sensores no será mayor que su propia energía e_i .

3.4. Modelo de consumo de energía

Para el modelo de consumo de energía, se utiliza la representación de vida útil incorporada en los protocolos de enrutamiento que se utilizan para optimizar el consumo de energía de los sensores. Como es sabido, los principales componentes que afectan a la utilización de la vida útil son la cantidad de bits transmitidos y la separación entre los conjuntos de transmisores. Si la distinción entre los nodos transmisores es más notable con respecto a la frontera, entonces el impacto de la distinción en el consumo de

energía se desarrolla exponencialmente. En este sentido, se ha adoptado un modelo simplificado (véase la figura 3.6) para la disipación de energía del hardware de radio.

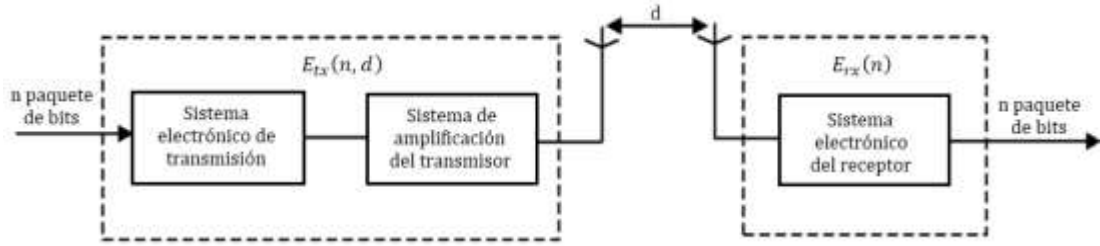


Figura 3. 6: Esquema gráfico del modelo de radio en sensores inalámbricos.

Fuente: (Heinzelman et al., 2002)

El modelo de consumo de energía utilizado se define mediante las siguientes expresiones:

$$E_{tx}(n, d) = E_{tx-elec}(n) + E_{tx-amp}(n, d)$$

$$E_{tx}(n, d) = nE_{elec} + n\varepsilon_{fs}d^2, \quad d < d_o$$

$$E_{tx}(n, d) = nE_{elec} + n\varepsilon_{mp}d^4, \quad d \geq d_o$$

$$E_{rx}(n, d) = E_{rx-elec}(n) = nE_{elec}$$

Donde,

E_{tx} , es la energía del transmisor

$E_{tx-elec}$, es la energía del dispositivo electrónico en el transmisor

E_{tx-amp} , es la energía del amplificador en el transmisor

E_{elec} , es la energía electrónica (sensor) que depende de factores como la codificación digital, la modulación, el filtrado y la difusión de la señal.

$\varepsilon_{fs}d^2$, es la energía del amplificador que depende de la distancia al receptor, y

$\varepsilon_{mp}d^4$, es la energía del amplificador que depende de la tasa de error de bits aceptable.

En la tabla 3.1 se muestran los parámetros de simulación para el modelo propuesto en una red de sensores inalámbricos en la que se comparan diferentes escenarios de simulación de parámetros de enrutamiento en la que se optimiza el consumo de energía en los sensores.

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación para evaluar optimización del consumo de energía en los sensores.

Parámetros	Valor
Ubicación de la BS (m)	(210, 10)
Superficie de la zona de ubicación de los sensores (m ²)	100x100
Número de nodos	100
E_{elec} (nJ/bits)	5
ε_{fs} (pJ/bits/m ²)	10
ε_{mp} (pJ/bits/m ⁴)	0.0013
Tamaño del paquete (bits)	4k

Elaborado por: Autor.

3.5. Análisis del algoritmo propuesto para eficiencia energética en una WSN.

El algoritmo propuesto asigna un par de etiquetas (p_j, d_j) a cada nodo j , donde p_j es el nodo de 1 a j en el camino más corto disponible desde j , d_j es la longitud de este camino más corto. Mientras, que d_{jk} denota la longitud del arco (j, k) . Algunas de las etiquetas se denominan temporales, es decir, pueden cambiar en un paso futuro; algunas etiquetas se denominan permanentes, es decir, son fijas, y se ha encontrado el camino más corto desde 1 hasta un nodo etiquetado permanentemente.

En la figura 3.7 se muestra el consumo total de energía en diferentes periodos de tiempo. En este trabajo, se utiliza un conjunto de células inteligentes para una red de sensores inalámbricos. Un área de 200 * 200 metros y 100 sensores son seleccionados al azar en esta área. Al iterar, se pueden encontrar los caminos más cortos leyendo las etiquetas p_j . Como se ve en la figura 3.7, el valor más alto se obtiene para el enrutamiento 2.

Además, el método propuesto logra optimizar el consumo de energía, siendo el más bajo entre los protocolos de enrutamiento simulados. Los datos en diferentes periodos de tiempo se muestran en la figura 3.8.

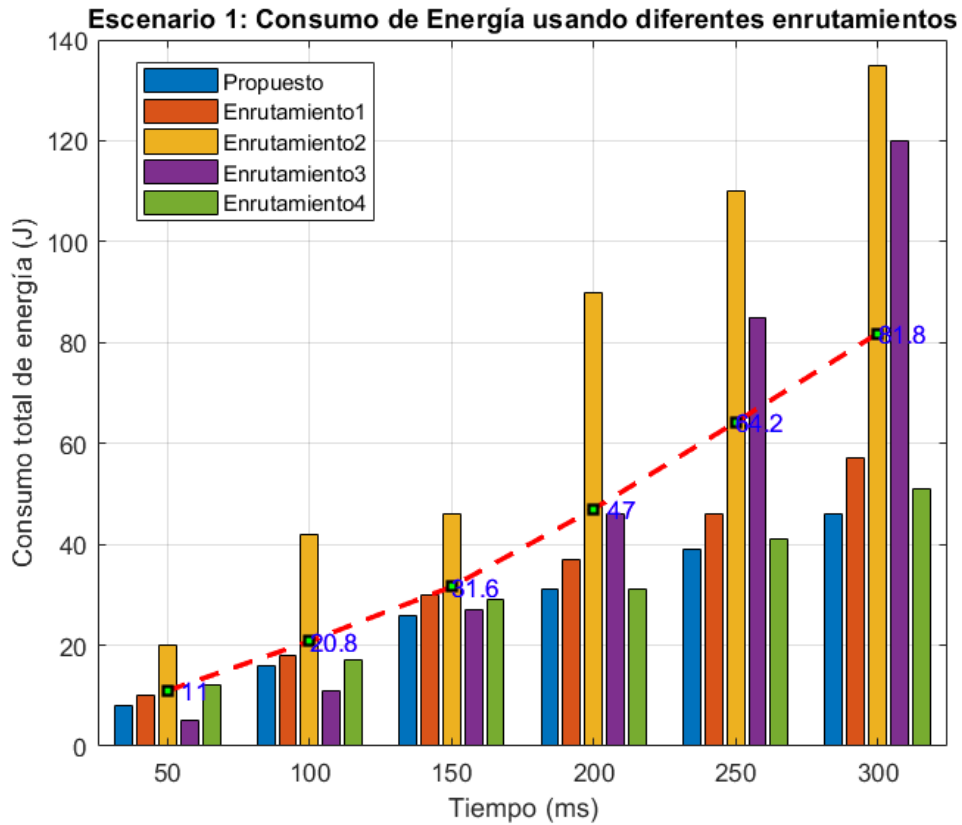


Figura 3. 7: Resultados obtenidos para optimización del consumo de energía.
Elaborado por: Autor.

Como se muestra en la figura 3.8, el método propuesto tiene el valor más alto en términos de datos. Mientras, que el valor más bajo se obtuvo con el método de enrutamiento 4. Se eligió el camino más corto entre los líderes de grupo (cabezas de clúster). Se seleccionaron un total de 6 líderes de grupo para enviar los datos a la estación base. Esto significa que los 6 líderes utilizan energía para enviar la información. Si el recorrido es largo, la energía utilizada será mayor que la del recorrido corto. Por ejemplo, si sólo hay un líder de grupo para enviar la energía, entonces este líder utilizará poca energía.

En la figura 3.9 se muestra la tasa de entrega de paquetes en diferentes periodos de tiempo y diferentes protocolos de enrutamiento. El método propuesto logra obtener el valor máximo en la entrega de paquetes.

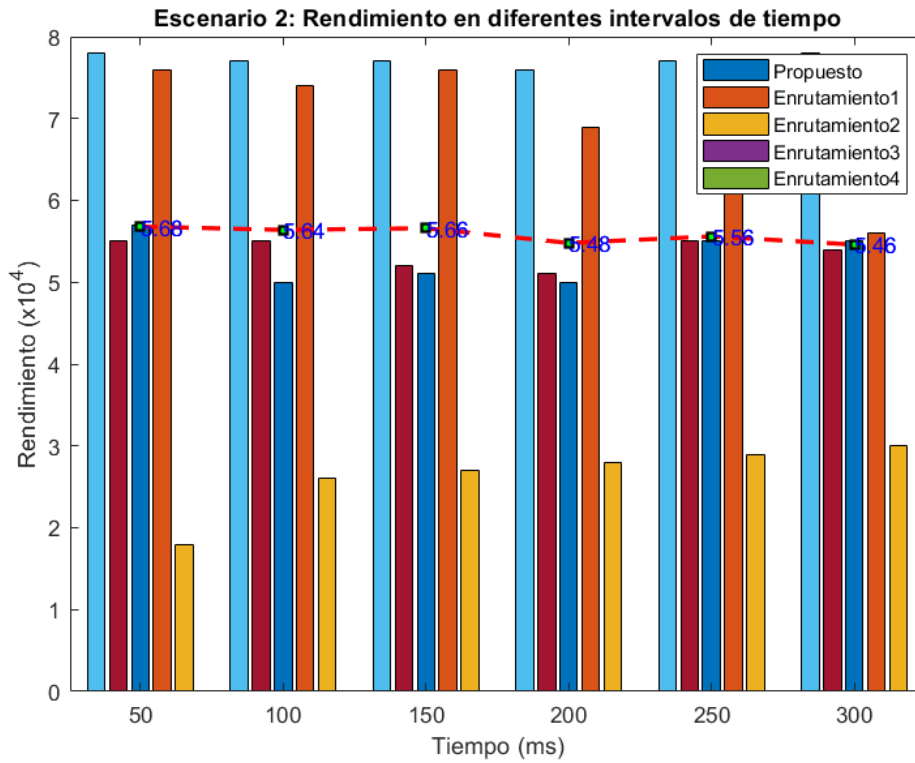


Figura 3. 8: Resultados obtenidos del rendimiento usando diferentes enrutamientos.
Elaborado por: Autor.

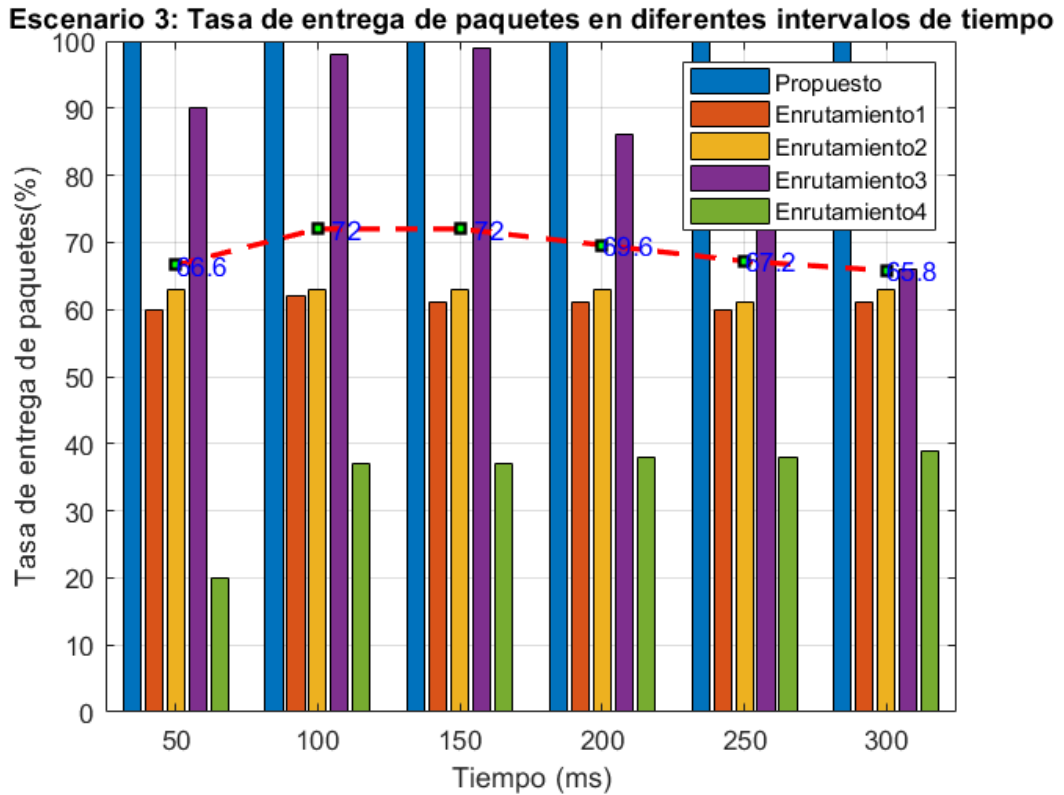


Figura 3. 9: Resultados obtenidos de la tasa de entrega de paquetes para diferentes enrutamientos.
Elaborado por: Autor.

En el presente trabajo se comparan los métodos de: (1) enrutamiento1 (protocolo de enrutamiento de eficiencia energética optimizada), (2) enrutamiento2 (jerarquía de agrupación adaptativa de baja energía), (3) enrutamiento3 (enrutamiento de datos para agregación en red), (4) enrutamiento4 (protocolo de agrupación dinámica controlado por la estación base) con relación a la técnica de enrutamiento propuesta, tal como se muestra en la figura 3.10.

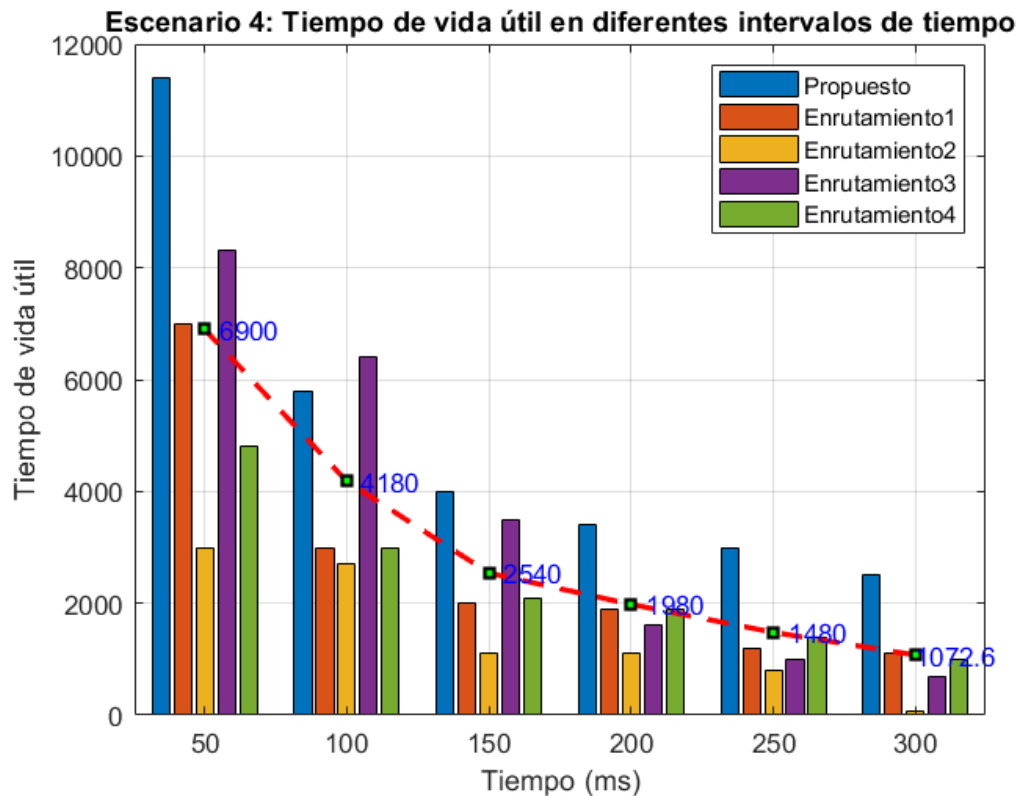


Figura 3. 10: Resultados obtenidos del tiempo de vida útil para diferentes protocolos de enrutamiento.

Elaborado por: Autor.

En el protocolo de enrutamiento1, el tiempo de vida de la WSN se desarrolla utilizando un protocolo basado en clústeres en el que cada ranura utiliza el nodo que actúa como cabeza de clúster en el tiempo. Este ciclo de vida de la WSN se desarrolla principalmente por dos razones. La primera razón es que el agotamiento de la batería es el mismo en los nodos, y la segunda es que, en el caso de los transmisores infrarrojos, ningún nodo depende del acceso al punto de acceso durante un largo periodo de tiempo.

3.6. Discusión de los resultados obtenidos.

A medida que aumenta el tamaño de la red inalámbrica de sensores, el número de nodos se incrementa y la cantidad de energía consumida aumenta en consecuencia y el tiempo de vida de la batería disminuye inversamente. Como hay un gran número de conexiones entre nodos, se consume mucha energía en la transmisión de paquetes, los nodos sensores pierden su energía en muy poco tiempo y a lo largo del tiempo de vida de la red.

Cuando el radio de los nodos sensores aumenta, la energía de los nodos sensores se pierde más rápidamente y la vida útil de la red se acorta. Cuando los nodos pierden su energía, el número de paquetes que procesan como área de detección crece y envían más paquetes a los nodos vecinos. Cuanto mayor sea el periodo de los sensores, es decir, los intervalos de detección, más tiempo podrán utilizar los nodos la energía que tienen. Cuando los intervalos de detección son cortos, cuando los nodos procesan más paquetes en poco tiempo y envían estos paquetes a sus nodos vecinos, pierden su energía en poco tiempo y el tiempo de vida de la red es corto.

La energía del sensor, es decir, la cantidad mínima de energía necesaria para encontrar el vector adecuado para el nodo y enviar el paquete, los nodos consumen la energía que tienen en poco tiempo, la vida útil de la red se acorta, la comunicación en radio, es decir, la distancia necesaria para que dos nodos hablen, aumenta el uso de energía porque en este caso los nodos también pueden enviar los paquetes que procesan a los nodos vecinos. En este caso, la energía de los nodos se consume rápidamente y la vida útil de la red se acorta.

La red de sensores inalámbricos consume más energía cuando el enrutamiento se realiza de forma aleatoria. Cuando se utiliza el enrutamiento directo, la energía se utiliza de forma más económica y la vida útil de la red es mayor que la del enrutamiento aleatorio.

Conclusiones

1. Las redes de sensores tienen muchos ámbitos de aplicación, como la medicina, militar, residencial, agrícola o medioambiental. Como cada sensor tiene que ser de bajo coste, tienen una batería muy limitada y la vida útil de la red depende en gran medida del ahorro de energía. Una forma de ahorrar energía es diseñar protocolos de enrutamiento adecuados.
2. El propósito del trabajo realizado es el ahorro de la energía de los nodos sobre una red inalámbrica. El cambio de la probabilidad de la selección de las cabezas de clúster de forma dinámica y con más eficiencia condujo a un bajo consumo de energía de los sensores y un gran ahorro de energía en toda la red inalámbrica.
3. Posteriormente, se compararon las prestaciones de los protocolos de enrutamiento con las de los protocolos de clustering distribuido y de selección estable. Con ello, se obtuvo el mejor rendimiento del sistema en comparación con los protocolos analizados.

Recomendaciones

Como recomendaciones del presente trabajo se sugiere dos posibles trabajos que se pueden desarrollar a futuro:

1. Evaluación del tiempo de vida útil en una WSN mediante técnicas de Machine Learning
2. Análisis de métodos de optimización del consumo energético en una WSN usando redes neuronales convolucionales.

Bibliografia

- Abba Ari, A. A., Djedouboum, A. C., Gueroui, A. M., Thiare, O., Mohamadou, A., & Aliouat, Z. (2020). A Three-Tier Architecture of Large-Scale Wireless Sensor Networks for Big Data Collection. *Applied Sciences*, 10(15), 5382. <https://doi.org/10.3390/app10155382>
- Abbas, M., & Otaif, N. (2021). A novel methodology for optimum energy consumption in wireless sensor networks. *Frontiers in Engineering and Built Environment*, 1(1), 25–31. <https://doi.org/10.1108/FEBE-02-2021-0011>
- Abdulkarem, M., Samsudin, K., Rokhani, F. Z., & A Rasid, M. F. (2020). Wireless sensor network for structural health monitoring: A contemporary review of technologies, challenges, and future direction. *Structural Health Monitoring*, 19(3), 693–735. <https://doi.org/10.1177/1475921719854528>
- Abuarqoub, A., Hammoudeh, M., Adebisi, B., Jabbar, S., Bounceur, A., & Al-Bashar, H. (2017). Dynamic clustering and management of mobile wireless sensor networks. *Computer Networks*, 117, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.02.001>
- Agarwal, K., Agarwal, K., & Muruganandam, K. (2018). Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) Protocol: Simulation and Analysis using MATLAB. *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, 60–64. <https://doi.org/10.1109/GUCON.2018.8674988>
- Alvarado, G., Bosquez, C., Palacios, F., & Cordoba, L. (2017). Low-energy Adaptive Clustering Hierarchy protocol and optimal number of cluster head algorithm in a randomized wireless sensor network deployment. *2017 International Conference on Electrical, Electronics,*

Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT), 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICEECCOT.2017.8284632>

Alvarado Medellín, P., Aguilar Escarcia, S. P., Ramírez Aguilera, A. M., & Ortiz Gómez, R. (2019). Dynamic system for monitoring and control wireless sensor networks operating under ZigBee communication protocol. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(1), 1–9. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.003>

Cama-Pinto, A., Acosta-Coll, M., Piñeres-Espitia, G., Caicedo-Ortiz, J., Zamora-Musa, R., & Sepulveda-Ojeda, J. (2016). Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24(4), 581–599. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000400005>

Dalal, B., & Kukarni, S. (2021). Wireless Sensor Networks: Applications. En S. S. Yellampalli (Ed.), *Wireless Sensor Networks—Design, Deployment and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97079>

Deepika, & Niranjana, S. (2018). Wireless Sensor Networks. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(10). <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV3IS10005>

Dhongdi, S. C., Nahar, P., Sethunathan, R., Gudino, L. J., & Anupama, K. R. (2017). Cross-layer protocol stack development for three-dimensional underwater Acoustic Sensor Network. *Journal of Network and Computer Applications*, 92, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.03.024>

Egas, C. R., Viracocha, D., & Rivera, J. (2019). Implementación de una red inalámbrica de sensores para la gestión de luminarias utilizando IPv6.

Enfoque *UTE*, 10(4), 45–56.
<https://doi.org/10.29019/enfoque.v10n4.553>

Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A. P., & Balakrishnan, H. (2002). An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4), 660–670. <https://doi.org/10.1109/TWC.2002.804190>

Matin, M. A., & Islam, M. M. (2012). Overview of Wireless Sensor Network. En M. Matin (Ed.), *Wireless Sensor Networks—Technology and Protocols*. InTech. <https://doi.org/10.5772/49376>

Munir, S. A., Ren, B., Jiao, W., Wang, B., Xie, D., & Ma, J. (2007). Mobile Wireless Sensor Network: Architecture and Enabling Technologies for Ubiquitous Computing. *21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW'07)*, 113–120. <https://doi.org/10.1109/AINAW.2007.257>

Razaque, A., & Elleithy, K. (2014). Energy-Efficient Border Node Medium Access Control Protocol for Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 14(3), 5074–5117. <https://doi.org/10.3390/s140305074>

Rueda, J. S., & Talavera Portocarrero, J. M. (2017). Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura clarificadora. *Revista Colombiana de Computación*, 18(2), 58–74. <https://doi.org/10.29375/25392115.3218>

Sara, G. S., & Sridharan, D. (2014). Routing in mobile wireless sensor network: A survey. *Telecommunication Systems*, 57(1), 51–79. <https://doi.org/10.1007/s11235-013-9766-2>

Widhalm, D., Goeschka, K. M., & Kastner, W. (2021). An Open-Source Wireless Sensor Node Platform with Active Node-Level Reliability for

Monitoring Applications. *Sensors*, 21(22), 7613.
<https://doi.org/10.3390/s21227613>

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Robalino Yanez, Edison David** C.C: # 092397219-4 autor del Componente práctico del examen complejo: Análisis comparativo de protocolos de enrutamiento para la optimización del consumo energético en sensores inalámbricos, previo a la obtención del título de **Magister 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, 18 de octubre del 2022

f. _____

Nombre: **Robalino Yanez, Edison David**

C.C: 092397219-4

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis comparativo de protocolos de enrutamiento para la optimización del consumo energético en sensores inalámbricos		
AUTOR(ES)	Robalino Yanez, Edison David		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; M. Sc. Quezada Calle Edgar / M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	Guayaquil, 18 de octubre del 2022	No. DE PÁGINAS:	50
ÁREAS TEMÁTICAS:	Comunicaciones Inalámbricas, Sistemas de Comunicación		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Sensores, Redes, Protocolos, Eficiencia, Energético, Optimización.		
RESUMEN/ABSTRACT:			
<p>El presente trabajo se desarrolla el examen complejo denominado “Análisis comparativo de protocolos de enrutamiento para la optimización del consumo energético en sensores inalámbricos”. El presente documento se divide en tres capítulos. En el capítulo 1 se caracteriza las generalidades del proyecto investigativo enfocado en la red de sensores inalámbricos. En el capítulo 2 se introducen los conceptos básicos de las redes de sensores inalámbricos (RSI, o Wireless Sensor Network (WSN)), es decir, el diseño de los nodos y el funcionamiento de la red, factores que desempeñan un papel importante en el proceso de diseño de una red de sensores inalámbricos (diseño de los nodos y pila de comunicaciones). También se presenta el diseño general de la pila de comunicaciones de las redes de sensores y las diferencias fundamentales entre las redes de sensores inalámbricas fijas y móviles y se analizan los tipos básicos de redes móviles con algunos ejemplos. En el capítulo 3, se presenta el diseño de la red de sensores inalámbrico y se evalúan comparativamente los protocolos de enrutamiento con el propósito de reducir el consumo energético y tiempo de vida útil de los sensores usando el software MatLab.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593982246536	E-mail: davchino17@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Manuel Romero Paz		
	Teléfono: 0994606932		
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			