



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TÍTULO

Optimización energética y de rendimiento en WSN mediante análisis
comparativo de protocolos de enrutamiento implementados en Python

AUTOR

Ortega Briones, Byron Wimper

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR

Amaya Fariño, Luis Miguel

Santa Elena, Ecuador

Año 2025



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

**Ing. Alicia Andrade Vera, Mgtr.
COORDINADORA DEL
PROGRAMA**

**Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr.
TUTOR**

**Ing. Fernando Chamba Macas, Mgtr.
DOCENTE
ESPECIALISTA**

**Ing. Daniel Jaramillo Chamba, Mgtr.
DOCENTE
ESPECIALISTA**

**Abg. María Rivera González, Mgtr.
SECRETARIA GENERAL
UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por ORTEGA BRIONES, BYRON WIMPER como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Telecomunicaciones.

TUTOR

Ing. Luis Miguel Amaya Fariño, Mgtr.

Santa Elena, 17 de febrero de 2025



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, ORTEGA BRIONES BYRON WIMPER

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, Optimización energética y de rendimiento en WSN mediante análisis comparativo de protocolos de enrutamiento implementados en Python previo a la obtención del título en 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 del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, 17 de febrero de 2025

EL AUTOR

Ortega Briones Byron Wimper



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado Optimización energética y de rendimiento en WSN mediante análisis comparativo de protocolos de enrutamiento implementados en Python, presentado por el estudiante, Byron Wimper Ortega Briones fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 2%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

 CERTIFICADO DE ANÁLISIS magister		
Tesis MT Byron Ortega Final	2% Textos sospechosos 	
	76% Similitudes (ignorado) 0% similitudes entre comillas 1% entre las fuentes mencionadas 2% Idiomas no reconocidos 12% Textos potencialmente generados por la IA (ignorado)	
Nombre del documento: Tesis MT Byron Ortega Final.docx ID del documento: 15445cf234e0763534b23b061a3fab866c9d3108 Tamaño del documento original: 3,04 MB Autores: []	Depositante: AMAYA FARIÑO LUIS MIGUEL Fecha de depósito: 12/2/2025 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 12/2/2025	Número de palabras: 18.834 Número de caracteres: 123.983

TUTOR

Ing. Luis Miguel Amaya Fariño, Mgtr.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

AUTORIZACIÓN

Yo, ORTEGA BRIONES BYRON WIMPER

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales del Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Santa Elena, 17 de febrero de 2025

EL AUTOR

Ortega Briones Byron Wimper

AGRADECIMIENTO

Quiero dedicar estas palabras de agradecimiento a quienes han sido mis pilares durante este viaje hacia la culminación de mi maestría.

A Dios, por guiarme y darme la sabiduría para poder emprender este viaje de conocimientos.

A mis padres, William Ortega Correa y Maritza Briones Maridueña, su amor y apoyo incondicional me ha impulsado a superar cada obstáculo. Gracias por el sacrificio, por enseñarme a perseguir mis sueños.

A mis hijos, por ser ese pilar que me impulse a seguir Adelante y esforzarme cada día más.

A mis profesores, por compartir su conocimiento y ser una guía en mi crecimiento.

A todos, gracias por su apoyo incondicional en este proceso.

Ortega Briones, Byron Wimper

DEDICATORIA

A mis padres, William Ortega Correa y Maritza Briones Maridueña, con profunda gratitud por su amor incondicional, su apoyo constante y los valores que me han inculcado. Este logro es reflejo de su esfuerzo y sacrificio, y de todo lo que han hecho para que yo pudiera alcanzar mis metas. Les dedico este trabajo con todo mi amor y agradecimiento.

A mis hijos, Natasha Ortega Solórzano y Bruno Ortega Solórzano, por ser mi fuente de inspiración diaria. Que este logro les recuerde siempre que el esfuerzo y la dedicación abren el camino hacia cualquier meta. Siempre recordaré que este camino lo recorrí pensando en su futuro.

Ortega Briones, Byron Wimper

ÍNDICE GENERAL

TITULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
RESUMEN	XVI
ABSTRACT.....	XVII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1. Introducción a las redes de sensores inalámbricos	5
1.1.1. Definición y concepto básico de WSN.....	6
1.1.2. Características y aplicaciones de WSN	7
1.2. Arquitectura de las Redes de Sensores Inalámbricos	11
1.2.1. Nodos sensores	12
1.2.2. Estación base	15
1.2.3. Comunicación Inalámbrica entre nodos	17
1.3. Tipos de comunicaciones en WSN	18

1.4. Optimización Energética y Rendimiento en WSNs.....	20
1.4.1. Importancia de la optimización energética en WSN	21
1.4.2. Estrategias para la optimización energética.....	21
1.4.3. Impacto de la optimización energética en la vida útil de la red	22
1.5. Protocolos de enrutamiento en WSN.....	23
1.5.1. Importancia de los protocolos de enrutamiento.....	24
1.5.2. Clasificación de Protocolos de Enrutamiento.....	25
1.5.2.1. Protocolo LEACH	26
1.5.2.2. Protocolo AODV	27
1.5.2.3. Algoritmo Dijkstra.....	28
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	30
2.1. Contexto de la investigación.....	30
2.2. Diseño y alcance de la investigación	30
2.3. Tipo y métodos de investigación	30
2.4. Población y muestra.....	31
2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	31
2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.	31
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
3.1. Metodología utilizada para la simulación en Python.....	32
3.1.1. Selección de librerías específicas de Python	32
3.1.1.1. NetworkX: Simulación de topologías de red.....	32
3.1.1.2. SimPy: Sistema de simulación de eventos discretos	33

3.1.1.3. Matplotlib/PyViz: visualización de los resultados obtenidos en la simulación.....	33
3.1.1.4. Numpy: Tratamiento de datos y cálculos numéricos eficaces.....	34
3.1.2. Implementación del entorno de simulación.....	34
3.1.2.1. Configuración de nodos e inicialización de la red.....	35
3.1.2.2. Topología y enlaces de comunicación.....	38
3.1.2.3. Tiempo de simulación y planificación de casos	38
3.1.2.4. Establecimiento de protocolos de encaminamiento.....	38
3.1.2.5. Métricas utilizadas para evaluar el rendimiento	40
3.2. Implementación de protocolos de enrutamiento en Python usando Visual Studio Code.....	41
3.2.1. Implementación del protocolo Jerarquía de agrupación adaptativa de baja energía (LEACH)	41
3.2.2. Implementación del protocolo AODV	43
3.2.3. Implementación del protocolo Dijkstra	45
3.3. Escenarios de simulación:.....	46
3.3.1. Escenario 1: Red con baja densidad (Low Density) de nodos	47
3.3.2. Escenario 2: Red de densidad media (Medium Density) de nodos	48
3.3.3. Escenario 3: Red de densidad alta (High Density) de nodos.....	49
3.4. Discusión de resultados obtenidos en los escenarios de simulación	50
3.4.1. Análisis comparativo del consumo energético en los escenario de simulación.....	50
3.4.2. Análisis comparativo de la latencia en los escenario de simulación	51
3.4.3. Análisis comparativo de la tasa de entrega de paquetes (PDR) en los escenario de simulación.....	53

3.4.4.	Análisis comparativo del tiempo de vida de la red en los escenario de simulación.....	54
3.4.5.	Efecto de los niveles de tráfico y la movilidad en la vida útil de la red	55
3.4.6.	Consumo energético por etapas operativas	56
CONCLUSIONES		58
RECOMENDACIONES.....		59
REFERENCIAS.....		60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Especificaciones técnicas y aplicaciones de Redes de Sensores Inalámbricos (WSN).....	10
Tabla 3. 1: Parámetros de configuración inicial de los nodos sensores.....	36
Tabla 3. 2: Comparación de Protocolos de Enrutamiento.	40
Tabla 3. 3: Configuración de parámetros los escenarios de simulación de una WSN usando protocolos LEACH, AODV y Dijkstra.	47
Tabla 3. 4: Configuración de parámetros para el escenario 1 – red con densidad baja. .	47
Tabla 3. 5: Configuración de parámetros para el escenario 2 – red con densidad media.	48
Tabla 3. 6: Configuración de parámetros para el escenario 3 – red con densidad alta...	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Conexión de los nodos sensores a la estación base (BS).	5
Figura 1.2: Principales categorías de aplicaciones de las WSN.	8
Figura 1.3: Escenario de una aplicación de comunicación militar en un campo de batalla utilizando una WSN.....	9
Figura 1.4: Arquitectura básica de una red de sensores inalámbricos (WSN).	12
Figura 1.5: Diagrama esquemático de un nodo sensor inalámbrico.	13
Figura 1.6: Zonas de cobertura del radio del sensor r_s y del radio de comunicación r_c	14
Figura 1.7: Zonas de cobertura k	15
Figura 1.8: Representación de la comunicación entre la estación base (BS) y los nodos sensores.	16
Figura 1.9: Prestaciones tecnológicas de la IoT móvil en hospitales.	17
Figura 1.10: Comunicación inalámbrica Unicast.	19
Figura 1.11: Comunicación inalámbrica Broadcast.....	19
Figura 1.12: Comunicación inalámbrica Multicast.....	19
Figura 1.13: Arquitectura del protocolo de enrutamiento LEACH.	26
Figura 1.14: Arquitectura del protocolo de enrutamiento AODV.	28
Figura 2. 1: Instalación de la central de CNT EP.....	30
Figura 3. 1: Distribución de los nodos sensores y ubicación de la BS.	37
Figura 3. 2: Asignación de cabeceras de clústeres y nodos sensores para el protocolo LEACH.	43
Figura 3. 3: Descubrimiento de rutas entre nodos usando el protocolo AODV.	44
Figura 3. 4: Descubrimiento de rutas entre nodos usando el protocolo Dijkstra.....	46

Figura 3. 5: Resultados obtenidos del consumo total de energía (J) en diferentes escenarios de simulación.	51
Figura 3. 6: Resultados obtenidos de la distribución de la latencia en diferentes escenarios de simulación para cada protocolo de enrutamiento.....	52
Figura 3. 7: Resultados obtenidos de PDR en diferentes escenarios de simulación para cada protocolo de enrutamiento.....	53
Figura 3. 8: Resultados obtenidos del tiempo de vida de la red en diferentes escenarios de simulación para cada protocolo de enrutamiento.	54
Figura 3. 9: Resultados obtenidos del tiempo de vida de WSN en diferentes niveles de tráfico y condiciones de movilidad en los escenarios de simulación para cada protocolo de enrutamiento.....	55
Figura 3. 10: Resultados obtenidos del consumo energético en diferentes etapas para cada protocolo (LEACH, AODV, Dijkstra) en escenarios de baja, media y alta densidad. ...	56

RESUMEN

Este trabajo hace hincapié en la optimización energética y mejora del rendimiento de las redes inalámbricas de sensores (WSN) utilizando protocolos de encaminamiento implementados en Python y analizados comparativamente. El estudio investiga en detalle los protocolos LEACH, AODV y Dijkstra, aplicados a redes con diferentes densidades y condiciones de movilidad. Asimismo, se registró el consumo de energía, latencia y tasas de entrega de paquetes. Una vez obtenidos, los resultados indican que, aunque los protocolos de nivel inferior, como LEACH, son más eficientes en términos de consumo de energía, AODV obtiene mejores resultados en latencia durante la movilidad. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de disponer de varios protocolos de enrutamiento de WSN, ya que cada aplicación tiene requisitos diferentes. La importancia de esta investigación radica en que proporciona algunas recomendaciones que podrían ser importantes en el futuro a la hora de realizar esfuerzos para mejorar las WSN.

Palabras claves: WSN, Optimización Energética, Protocolos de Enrutamiento

ABSTRACT

This work emphasizes on energy optimization and performance improvement of wireless sensor networks (WSN) using routing protocols implemented in Python and analyzed comparatively. The study investigates in detail the LEACH, AODV and Dijkstra protocols, applied to networks with different densities and mobility conditions. Energy consumption, latency and packet delivery rates were also recorded. Once obtained, the results indicate that, although lower level protocols, such as LEACH, are more efficient in terms of energy consumption, AODV performs better in latency during mobility. These results highlight the need for multiple WSN routing protocols, as each application has different requirements. The importance of this research is that it provides some recommendations that could be important in future efforts to improve WSNs.

Keywords: WSN, Energy Optimization, Routing Protocols.

INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés) han emergido como una tecnología clave en aplicaciones que requieren monitoreo y recolección de datos en tiempo real, como monitoreo ambiental, salud, agricultura, entre otros (Salih et al., 2022; Yick et al., 2008). Estas redes están compuestas por nodos sensoriales (Ali et al., 2017) que se comunican entre sí de forma inalámbrica para recolectar y transmitir datos al nodo base mediante módulos de radio (Senouci & Mellouk, 2016).

Una de las principales prioridades de una red de sensores inalámbrica es la vida energética del sensor (Ben Yagouta et al., 2023), debido a que estos dependen de baterías con capacidad limitada, y generalmente, no pueden ser reemplazarlas o recargadas (Evangelakos et al., 2022; Kannaujaiya & Dwivedi, 2023). Algunos estudios muestran que utilizando un protocolo MAC basado en TDMA (LEACH) se puede obtener un bajo consumo de energía y mantener los clústeres con el fin de mejorar el tiempo de vida de la red de sensores (Alvarado et al., 2017).

En la última década, se han desarrollado algoritmos de protocolos de enrutamiento (Suresh et al., 2022) para enfrentar la problemática del ahorro energético en los nodos sensores. Un protocolo de enrutamiento energéticamente eficiente es una de las formas más efectivas de ahorrar energía en las WSN, lo que mejorará la vida útil de la red, desde el enrutamiento basados en proximidad y calidad de servicio (QoS). Sin embargo, el diseño de los protocolos de enrutamiento en las WSN es una tarea importante debido a que los parámetros varían con respecto a los de las redes inalámbricas ad hoc.

En este sentido, el uso de herramientas de simulación y lenguajes de programación como Python ha facilitado la implementación y evaluación de estos protocolos. Python es un lenguaje de programación versátil y fácil de aprender, que ofrece bibliotecas y herramientas específicas para el desarrollo de aplicaciones de redes, lo que lo convierte en una opción ideal para este tipo de investigaciones.

Los protocolos de enrutamiento juegan un papel crucial en la eficiencia energética (Leelakrishnan & Chakrapani, 2024) y el rendimiento de las WSN, ya que determinan cómo se transmiten los datos entre los nodos, lo que afecta directamente el consumo de

energía (Hidalgo-Leon et al., 2022), la latencia de la red y la fiabilidad de la comunicación.. Por lo tanto, es fundamental seleccionar y diseñar protocolos de enrutamiento eficientes para optimizar el rendimiento de las WSN.

Planteamiento de la investigación

Las pequeñas baterías de potencia limitada se utilizan como fuentes de energía en las WSN. Sustituir las baterías con frecuencia es una tarea difícil en entornos remotos, por lo que el uso de baterías pequeñas con enfoques adecuados de gestión de la energía es muy importante en las WSN. La vida útil de los sensores está limitada por la potencia de las baterías. Esto plantea un reto importante para optimizar el uso de la energía de la batería en las WSN.

Formulación del problema de investigación

Las WSN están formadas por un gran número de pequeños nodos que incorporan un dispositivo sensor y componentes de comunicación inalámbricos. Estos componentes utilizan la mayor parte de la energía de las redes de sensores, que debe ser controlada debido a un consumo de energía limitado, capacidades de comunicación restringidas y recursos limitados.

Los sensores utilizados en la red son compactos, robustos y de menor coste gracias a los avances de la tecnología y las comunicaciones inalámbricas. La mejora en el desarrollo de transceptores, sensores y microprocesadores ha repercutido positivamente en el uso de las WSN en la mayoría de las aplicaciones diseñadas en los últimos tiempos.

La mejora de la vida útil de la red es un factor importante que puede lograrse mediante el diseño de un enfoque de gestión eficiente de la energía para las baterías adoptadas en los nodos sensores. La evaluación de las necesidades energéticas de un nodo en un periodo de tiempo determinado y su optimización son de vital importancia en cualquier WSN. Algunas de las tareas que más energía consumen son las de comunicación, computación y detección.

Los resultados del presente trabajo tendrían un impacto significativo en el ámbito académico/investigativo e industrial que pueden utilizar estos hallazgos mejorando así sus productos y servicios, brindando soluciones eficientes y rentables. Al mismo tiempo, los investigadores y académicos pueden emplear estos hallazgos como base para futuras investigaciones y desarrollos.

Finalmente, este estudio es fundamental para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las WSNs, así como para impulsar la innovación y el desarrollo en el campo de las redes de sensores inalámbricos.

Objetivo General:

Analizar comparativamente el rendimiento de protocolos de enrutamiento en una red de sensores inalámbricos (WSN), basados en la optimización del consumo energética en los nodos sensores mediante la implementación de algoritmos en Python.

Objetivos Específicos:

1. Describir el marco teórico referencial de las redes de sensores inalámbricos (WSN), así como de los protocolos de enrutamiento y de optimización energética en una WSN.
2. Implementar algoritmos de simulación de los protocolos de enrutamiento en WSN utilizando Python.
3. Diseñar escenarios de simulación de una WSN mediante protocolos de enrutamiento.
4. Discutir los resultados obtenidos de cada uno de los escenarios de simulación para la identificación del protocolo de enrutamiento más eficiente en términos de consumo energético y rendimiento.

Planteamiento hipotético

En este trabajo de titulación se llevará a cabo un análisis comparativo del rendimiento de diversos protocolos de enrutamiento, con un enfoque en la optimización del consumo de energía y el desempeño general de la red. Esto se logrará mediante la implementación y

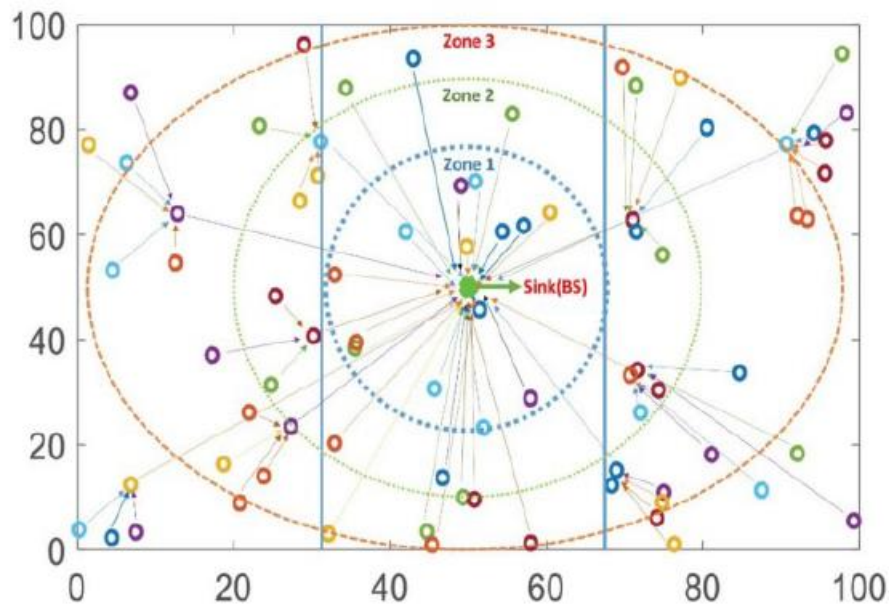
evaluación de varios protocolos de enrutamiento utilizando Python, un lenguaje de programación que cuenta con herramientas y bibliotecas sólidas para el desarrollo de aplicaciones de redes.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Introducción a las redes de sensores inalámbricos

La tecnología de redes de sensores inalámbricos (WSNs) desarrolla sensores que se despliegan en una zona generalmente hostil, capaces de captar datos, calcular información utilizando estos datos recolectados y comunicarlos a través de una red hacia la estación base (Base Station, BS), desde donde se transmiten al usuario final mediante otra red tal como se muestra en la Figura 1.1 (Durgam & Sadiwala, 2021). En esta sección, se describen las WSNs, sus arquitecturas, sus características y sus áreas de aplicación.

Figura 1.1: Conexión de los nodos sensores a la estación base (BS).



Fuente: (Durgam & Sadiwala, 2021)

Los avances tecnológicos de las WSNs en las últimas décadas han revolucionado la forma de obtener y procesar los datos en diversas aplicaciones (Lv et al., 2019). Este tipo de redes de acuerdo con Nakas et al., (2020) están compuestas por un conjunto de pequeños dispositivos o nodos sensores desplegados en un entorno, capaces de operar tanto en zonas remotas como hostiles, cuyo acceso es reducido o imposible.

Así, los sensores, que detectan fenómenos físicos o químicos como la temperatura, la presión, la luz o el sonido, tienen la capacidad de recopilar los datos, de procesarlos, a

escala tanto local como remota, y de transmitirlos a una estación base para su posterior análisis (Jaber & Kacimi, 2020). Por ello, este procesado es fundamental para múltiples aplicaciones en áreas como la agricultura, la monitorización medioambiental, la automatización industrial o incluso las aplicaciones militares y con fines de seguridad.

La capacidad de las WSNs para operar en zonas hostiles o de difícil acceso es una de sus principales ventajas. En efecto, es posible desplegar los sensores en áreas geográficas extensas y pueden funcionar de forma autónoma durante mucho tiempo, gracias a baterías de bajo consumo (Tang et al., 2020) o incluso a fuentes de energía renovables, por ejemplo, paneles de energía fotovoltaica. Por esta razón los sensores funcionan en situaciones donde sería complicado o costoso instalar redes cableadas, tales como zonas montañosas, desérticas o marítimas.

Estos sensores no sólo obtienen información del entorno, sino que además tienen la función de procesamiento de datos mediante algoritmos básicos, de modo que pueden seleccionar qué información transmitir a la estación base. El tratamiento de los datos reduce significativamente el tráfico de datos, lo que permite optimizar el ancho de banda disponible y prolongar la vida útil de la batería.

La transmisión de los datos obtenidos se hace a través de un conjunto de nodos, con técnicas de enrutamiento inalámbrico que permiten que los datos se transmitan en saltos entre nodos a la estación base. Cuando llegan a la estación base, la información se procesa de modo automatizado y se transmite al dispositivo del usuario final, a la mayoría de las veces a través de otro tipo de red, como una red de área local (LAN) o una red a nivel mundial, como Internet.

1.1.1. Definición y concepto básico de WSN

Las WSNs son un tipo de red formada por sensores distribuidos en un espacio para monitorear condiciones físicas o ambientales (Prakash et al., 2020). Estos sensores se comunican de forma inalámbrica entre sí para recopilar y enviar datos a un centro donde se procesan (Durgam & Sadiwala, 2021). El concepto de WSN se basa en utilizar pequeños dispositivos autónomos equipados con sensores que recolectan y transmiten datos (Nguyen & Kim, 2021; Yadav et al., 2020) en diferentes entornos, como campos

agrícolas, plantas industriales o hábitats naturales, para monitorear parámetros como la temperatura, humedad, luz, sonido y movimiento. (Maroof & Waheed, 2022)

Las WSNs tiene como característica principal la capacidad de operar de forma autónoma y autoorganizada (Rahman & Wahid, 2020). Esto significa que los sensores pueden adaptarse a los cambios en su entorno y reconfigurarse para asegurar un funcionamiento continuo y una recopilación de datos fiable (Habib & Marimuthu, 2020). Además, estas redes están diseñadas para ser eficientes en términos de consumo energético, ya que los sensores suelen operar con baterías o fuentes de energía alternativas (BenSaleh et al., 2020), permitiéndoles funcionar durante largos periodos sin necesidad de reemplazo o recarga frecuente..

Finalmente, las WSNs desempeñan un papel crucial en la recopilación de datos en lugares remotos o de difícil acceso. Sus aplicaciones van desde la vigilancia ambiental y la automatización industrial hasta la agricultura de precisión y el sector de la salud (Agarwal et al., 2021; Kandris et al., 2020; Karunanithy & Velusamy, 2021). Comprender el concepto básico de WSN y sus características principales es fundamental para optimizar la eficiencia energética y el rendimiento en las WSNs, que se explorarán más a fondo en el presente trabajo de titulación de maestría.

1.1.2. Características y aplicaciones de WSN

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) han surgido como una tecnología prometedora para un gran número de aplicaciones con diferentes necesidades (Kochhar et al., 2018). En la Figura 1.2 se muestran las diferentes aplicaciones de WSN, tales como, (1) supervisión del medio ambiente (Shakeri et al., 2020), flora y fauna (Castro Correa et al., 2022), servicios médicos (Yao et al., 2018), automatización industrial 4.0 (Karunanithy & Velusamy, 2020), ciudades inteligentes (T. Wang et al., 2018) y militares (Kandris et al., 2020).

Sin embargo, cada nodo tiene capacidades limitadas de procesamiento, almacenamiento y comunicación, así como suministro de energía y ancho de banda limitados. La WSN es de igual a igual, con una topología de malla y una conectividad dinámica, móvil y poco fiable. No existen protocolos universales de enrutamiento ni servicios centrales de registro (Kandris et al., 2020). Esta investigación abarca varias áreas que van desde la

optimización de la capa física hasta las soluciones de la capa de red. WSN también es denominada por su bajo consumo de energía, lo que las hace eficientes y rentables a largo plazo (Zagrouba & Kardi, 2021).

Figura 1.2: Principales categorías de aplicaciones de las WSN.



Fuente: (Kandris et al., 2020)

Las tareas suelen ser en tiempo real y distribuidas masivamente, implican la colaboración dinámica entre nodos y deben gestionar múltiples eventos en competencia. Las propiedades globales sólo pueden especificarse mediante instrucciones locales (Ospina et al., 2020). Debido al acoplamiento entre las aplicaciones y las capas del sistema, la arquitectura del software debe codificarse con la arquitectura de procesamiento de la información (Estrada-Jimenez et al., 2023; Vikash et al., 2021). Una red de sensores está diseñada para realizar un conjunto de tareas de procesamiento de información de alto nivel, como la detección, el seguimiento o la clasificación (Agarwal et al., 2021; Z. Wang et al., 2020).

En cuanto a sus aplicaciones, las WSNs se utilizan en la monitorización ambiental para recoger información sobre la temperatura, la humedad y la calidad del aire. En el campo de la medicina, se pueden aplicar para el monitoreo remoto de pacientes, mientras que en la automatización industrial se emplean para supervisar condiciones y realizar

Tabla 1.1: Especificaciones técnicas y aplicaciones de Redes de Sensores Inalámbricos (WSN)

Características Técnicas de WSN	Valores técnicos	Aplicaciones de WSN
Escalabilidad: Capacidad de expandir la red agregando nodos sin afectar su funcionamiento.	Hasta 10,000 nodos o más en redes extensas.	Monitoreo Ambiental: Control de calidad del aire, detección de incendios forestales, monitoreo climático.
Consumo de energía bajo: Los nodos de sensores deben ser altamente eficientes en el uso de energía para maximizar la vida útil de la batería.	Consumo típico: • 10-100 μW (modo en espera), • 10-50 mW (operativo). Vida de la batería: • 6 meses a 2 años.	Agricultura de precisión: Monitoreo de humedad del suelo, temperatura y fertilización controlada para optimizar la producción agrícola.
Autoconfiguración: Los nodos sensores configuran la WSN automáticamente después de la implementación, lo que permite detectar nodos vecinos y establecer el enrutamiento.	Tiempo de autoconfiguración: 10-60 s.	Automatización industrial: Control y monitoreo de máquinas y procesos en fábricas, detección de fallos en equipos.
Topologías de red flexibles: WSN está basada en topologías de red, tales como, estrella, malla o árbol, que dependen del entorno y los requisitos de red.	Latencia: 10 a 100 ms (malla).	Monitoreo de la salud: Sensores portátiles para medir signos vitales, monitoreo continuo de pacientes.
Comunicación inalámbrica: Utiliza protocolos de comunicación inalámbrica como Zigbee, Bluetooth, o Wi-Fi para la transmisión de datos.	Rango de transmisión: • Zigbee (10-100 m), • Wi-Fi (50-200 m). Velocidad de datos: • Zigbee (250 kbps), • Wi-Fi (54 Mbps).	Seguridad y Defensa: Vigilancia de fronteras, detección de intrusos, monitoreo de infraestructura crítica.
Tolerancia a fallos: La red es capaz de seguir operando, aunque algunos nodos fallen, redirigiendo los datos por rutas alternativas.	Reducción de datos perdida: <5% en condiciones óptimas.	Ciudades Inteligentes: Monitoreo del tráfico, gestión de energía, sensores de alumbrado público, gestión de residuos.
Capacidades de procesamiento local: Los nodos procesan los datos antes de enviarlos para	Potencia de procesamiento: Procesador de 8-32 bits,	Monitoreo de infraestructuras: Detección de vibraciones y deformaciones en puentes,

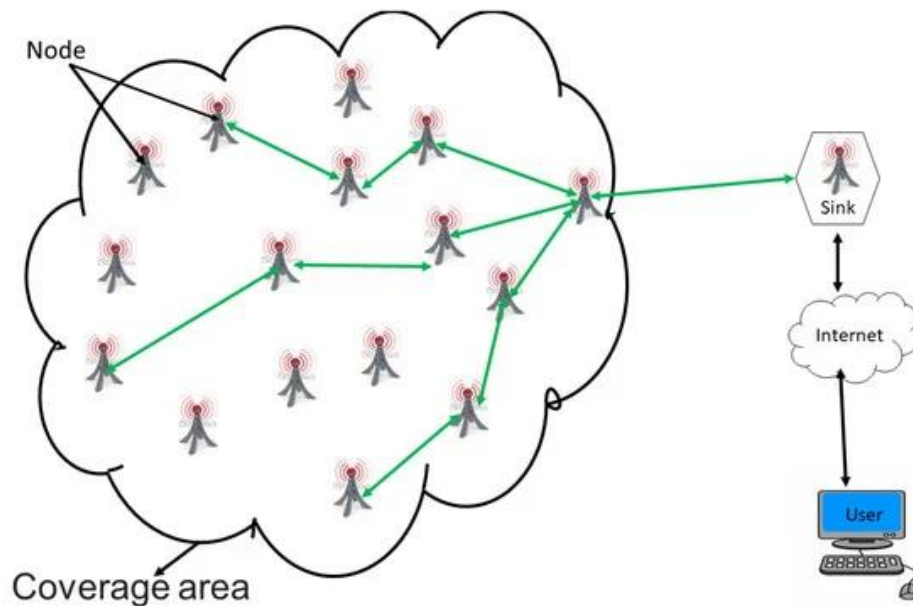
reducir el tráfico de información en la red.	Velocidad de reloj: 8 MHz – 16 MHz.	edificios, y otros proyectos de ingeniería.
Capacidades de enrutamiento: Protocolos diseñados para optimizar el envío de datos a la estación base, minimizando la pérdida de paquetes.	Algoritmos de enrutamiento: LEACH, PEGASIS, TEEN. Eficiencia energética mejorada en un 30%.	Domótica (Smart Homes): Sensores para controlar la temperatura, iluminación, seguridad, y eficiencia energética en hogares.
Bajo costo: Los nodos de sensores son relativamente económicos y pueden ser desplegados en grandes cantidades.	Costo de un nodo: \$1 - \$100, dependiendo de la capacidad y los sensores integrados.	Ecosistemas Marinos: Monitoreo de la calidad del agua, contaminación y vida marina en océanos y ríos.
Banda de frecuencia limitada: La comunicación en WSN generalmente utiliza bandas de frecuencia no licenciadas (como 2.4 GHz).	Bandas típicas: 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz.	Prevención de desastres: Detección temprana de terremotos, tsunamis y deslizamientos de tierra.

Las medidas de rendimiento para estas tareas están bien definidas, e incluyen la detección de falsas alarmas o fallos, los errores de clasificación y la calidad del rastreo. Las aplicaciones de las redes de sensores son muy variadas y pueden variar significativamente en cuanto a requisitos de aplicación, modo de despliegue (por ejemplo, ad hoc frente a entorno instrumentado), detección.

1.2. Arquitectura de las Redes de Sensores Inalámbricos

La arquitectura de las WSNs (véase la Figura 1.4) es un aspecto clave para entender su funcionalidad y rendimiento. Esta sección profundiza en los componentes que constituyen la arquitectura de las WSN, empezando por los propios nodos sensores. Estos nodos son los componentes fundamentales de la red, responsables de detectar y recoger datos del entorno (Amutha et al., 2020). Las características y capacidades de estos nodos sensores, incluidos su consumo de energía y su capacidad de procesamiento, desempeñan un papel crucial a la hora de determinar la eficiencia energética global y el rendimiento de la WSN.

Figura 1.4: Arquitectura básica de una red de sensores inalámbricos (WSN).



Fuente: (Djedouboum et al., 2018)

La arquitectura no está vinculada a ninguna tecnología de radio o procesamiento en particular, sino que detalla cómo deben combinarse la computación y la comunicación. Está diseñado para disponer de un subsistema de comunicaciones que permita una optimización flexible y específica de la aplicación de los protocolos de comunicación, obteniendo al mismo tiempo un gran ancho de banda y eficiencia.

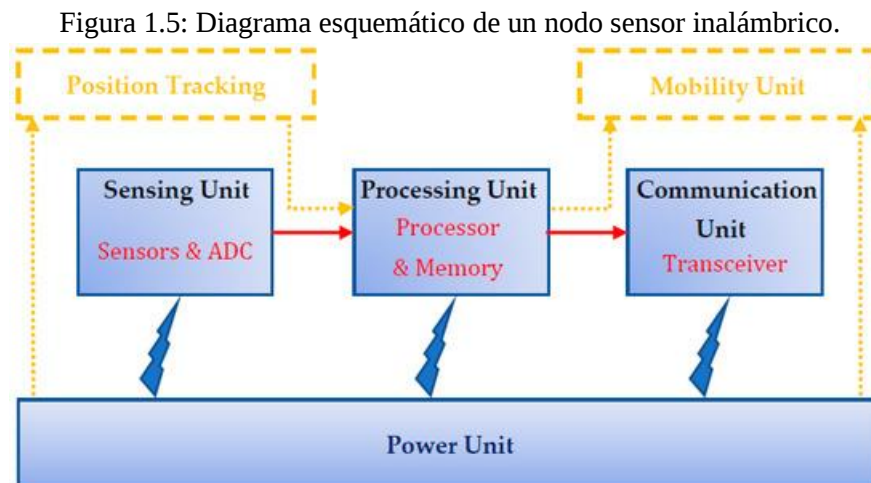
La arquitectura se basa en la premisa de que los recursos compartidos deben utilizarse siempre que sea posible para aprovechar las ventajas de la asignación dinámica, que el almacenamiento en búfer debe utilizarse para desacoplar la ruta de datos de uso general y la radio, y que la flexibilidad del protocolo es esencial. Para abordar los problemas de rendimiento y eficiencia, incluye aceleradores de hardware especiales para gestionar los requisitos de tiempo real y alta velocidad de la radio. Los aceleradores proporcionan bloques de construcción generales, no soluciones completas.

1.2.1. Nodos sensores

Un sensor es un pequeño dispositivo físico con una batería limitada que recoge datos físicos (temperatura, luz, presión, humedad, etc.) sobre el estado del entorno, luego calcula información utilizando los valores recogidos y la envía a otros sensores para su

comunicación inalámbrica por ondas de radio al sumidero y después al usuario final. En esta sección del presente trabajo se profundiza en la intrincada arquitectura de los nodos de las redes de sensores inalámbricos.

Estos nodos forman los bloques elementales de construcción de la red, y su eficiencia y rendimiento son cruciales para la optimización general de la energía en el sistema. La Figura 1.5 muestra el diagrama esquemático de un nodo sensor inalámbrico con sus respectivos componentes, tales como, la unidad de sensores (sensores y convertidores A/D), la unidad de procesamiento (procesador o microcontrolador y memoria), la interface de comunicación (transceptor). El objetivo de esta sección es proporcionar una comprensión exhaustiva del funcionamiento interno de los nodos sensores y su papel en la optimización energética y la mejora del rendimiento de las redes de sensores inalámbricas.



Fuente: (Evangelakos et al., 2022)

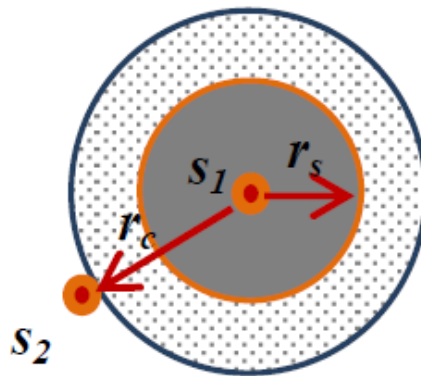
Mediante una detallada descripción de las funcionalidades y características de los nodos sensores, esta sección sienta las bases para el posterior análisis y comparación de los protocolos de enrutamiento. Subraya la importancia de los nodos sensores en el contexto más amplio de las WSN y sienta las bases para un examen detallado de su consumo de energía y su rendimiento. Mediante una exploración en profundidad de los nodos sensores, esta sección sirve de preámbulo al tema general de la optimización energética y la mejora del rendimiento en las redes de sensores inalámbricas. Sienta las bases para los debates posteriores sobre la selección e implementación de protocolos de encaminamiento y su impacto en la eficiencia global de la red.

Las prestaciones de un nodo sensor son:

- Sensibilidad: variación de la señal de salida en relación con la variación de la señal de entrada.
- Precisión: capacidad del sensor para dar una medida próxima al valor real.
- Velocidad: tiempo de reacción de un sensor, vinculado al ancho de banda.
- Resolución: variación más pequeña de una variable que puede medir el sensor.
- Campo de medida: valores extremos que puede medir el sensor.

Los sensores funcionan según un modelo de umbral, lo que significa que un sensor tiene dos zonas: una zona de percepción (sensación o sensado) (r_s) y una zona de comunicación (r_c). Estas zonas están representadas por dos círculos cuyo centro es el sensor, como se muestra en la Figura 1.6.

Figura 1.6: Zonas de cobertura del radio del sensor r_s y del radio de comunicación r_c .



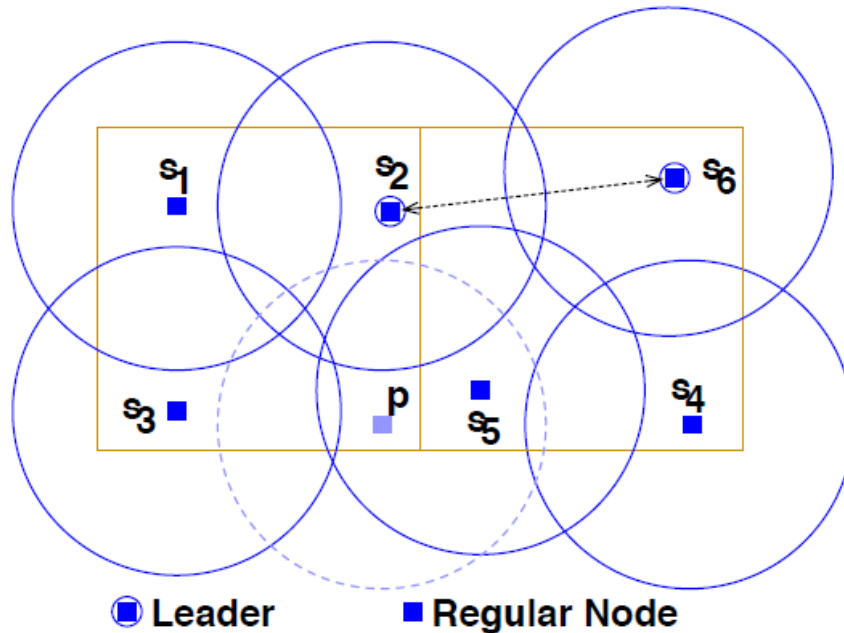
Fuente: (Baidya & Bhattacharyya, 2012)

La Figura 1.6 muestra las zonas definidas por los dos radios para el sensor S_1 . La zona de comunicación es la zona donde el sensor S_1 puede comunicarse con los otros sensores (por ejemplo, sensor S_2). Por otro lado, la zona de sensación es la zona donde el sensor S_1 puede sentir el suceso. Las zonas r_c y r_s representan el área de cobertura de un sensor. Para que un área esté completamente cubierta, la densidad de sensores debe ser suficiente, es decir, $r_t \geq 2r_s$.

Al influir en la relación entre el radio r_s y el radio r_c , podemos modificar las restricciones para no malgastar energía, y los sensores activos que estén trabajando innecesariamente pasarán al modo de espera. Este mecanismo aumentará la vida útil de la red. Por lo tanto,

en los sistemas robustos se necesita una mejor cobertura para cubrir una zona o un objetivo, para ello existe el concepto de cobertura k (véase la Figura 1.7), si una zona está cubierta por un sensor, entonces WSN ofrece 1 cobertura. Si cada punto de la zona está cubierto por al menos k sensores, entonces WSN ofrece una cobertura k .

Figura 1.7: Zonas de cobertura k .



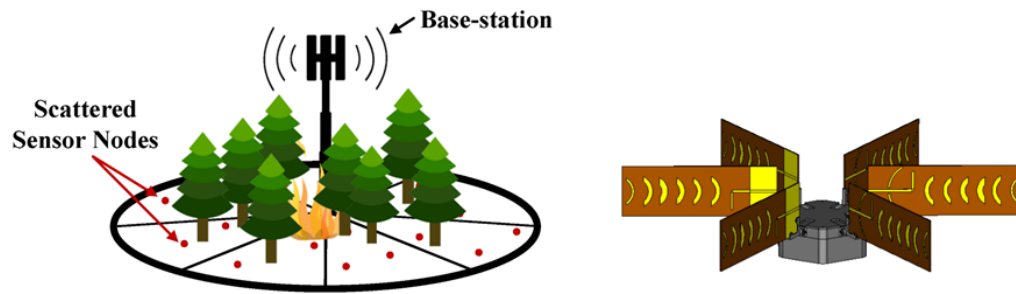
Fuente: (Drougas & Kalogeraki, 2007)

1.2.2. Estación base

Las redes inalámbricas de sensores (WSN) han atraído mucha atención en los últimos años debido a su uso potencial en muchas aplicaciones como vigilancia, militancia, etc. Dada la importancia de estas aplicaciones, mantener un funcionamiento fiable de la red es un objetivo fundamental. En las redes de sensores inalámbricos se han ideado muchos algoritmos para mejorar el mantenimiento de la energía en toda la red. La mayoría de ellos asumen que la ubicación de la Estación Base (BS) se encuentra en la frontera de la red, aunque la ubicación de la BS desempeña algún papel en el rendimiento general de la red.

En la Figura 1.8 se muestra un ejemplo de funcionamiento de una estación base, la misma que dispone de mayor cantidad de recursos que los nodos sensores, logrando así gestionar tareas más complejas, tales como, el procesamiento de datos, para su posterior almacenamiento y la interconexión con redes externas.

Figura 1.8: Representación de la comunicación entre la estación base (BS) y los nodos sensores.



Fuente: (Oliveira et al., 2022)

La ubicación de la BS desempeña un aspecto relevante en la vida útil de las redes de sensores inalámbricos, ya que la energía consumida por los jefes de clúster para transmitir datos a la estación base no sólo depende de la tasa de bits de datos, sino también de la distancia física entre los jefes de clúster y la estación base. Por lo tanto, es importante comprender el impacto de la ubicación de la estación base en el rendimiento de las redes de sensores inalámbricos para poder optimizar la topología durante la fase de despliegue de la red. En las WSN, la principal fuente de fallos de los nodos es el agotamiento de la batería, y sustituir esta fuente de energía sobre el terreno no suele ser práctico.

Como punto de entrada principal, la estación base sirve de pasarela fiable para que usuarios o sistemas externos accedan sin esfuerzo a la WSN, fomentando colaboraciones eficaces y ampliando el alcance de la red. Las funcionalidades mejoradas y el papel fundamental de la estación base elevan la eficiencia y el alcance de las redes de sensores inalámbricos, revolucionando el método de la recopilación, el procesamiento y la difusión de datos en diversos ámbitos.

Por ejemplo, el protocolo LEACH para redes de sensores, propuesto por Alvarado et al., (2017), minimiza la disipación de energía en las redes de sensores. Divide los nodos en clústeres, y en cada clúster, un nodo dedicado con privilegios extra llamado Clúster Head (CH) es responsable de crear y manipular un horario de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) y enviar datos agregados desde los nodos a la Estación Base donde estos datos son necesarios usando acceso múltiple por división de código (CDMA), el resto de los nodos son miembros del clúster.

En general, la estación base es un componente fundamental en la optimización de la WSN, ya que influye en la eficiencia energética general y en el rendimiento de la red. Su

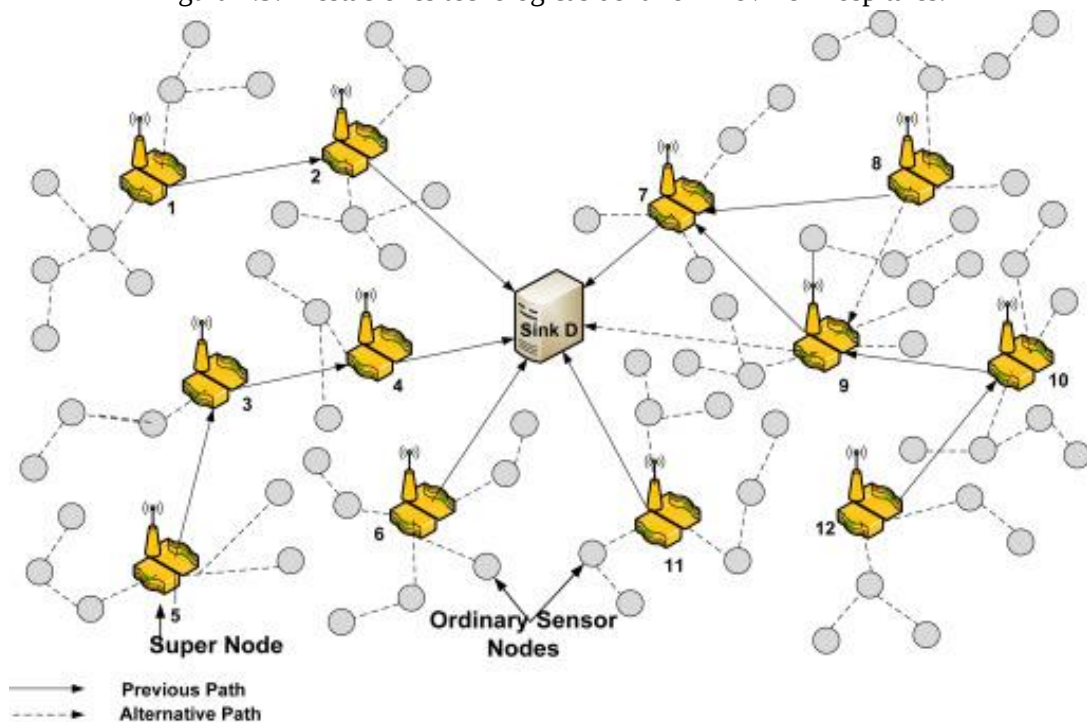
posicionamiento estratégico y su funcionamiento eficiente son esenciales para alcanzar los objetivos del estudio sobre optimización de protocolos implementado en Python.

1.2.3. Comunicación Inalámbrica entre nodos

Las conexiones de los nodos sensores son de dos tipos: en grupo e intergrupo. Todos los nodos sensores de un mismo grupo utilizan la misma clave para proteger sus comunicaciones. Un nodo (o algunos nodos) posee la clave de su grupo vecino para garantizar una comunicación segura entre los dos grupos. En lo sucesivo, este nodo se llamará «nodo frontera». Entre estos cuatro enfoques, la clave basada en grupo (GBK) tiene una buena seguridad y capacidad de recuperación, ya que el craqueo de un nodo no pondrá en peligro toda la red.

Dependiendo de la conexión inalámbrica entre los nodos se logra la transferencia de datos e información, tal como se observa en la Figura 1.9, logrando que la WSN funcione coherente y eficientemente.

Figura 1.9: Prestaciones tecnológicas de la IoT móvil en hospitales.



Fuente: (Ketshabetswe et al., 2019)

El primer paso en el proceso de comunicación es codificar los datos para su transmisión. Los esquemas de codificación se diseñan para aumentar la probabilidad de éxito de la

transmisión evitando y corrigiendo pequeños errores. Por razones de eficacia, el proceso de codificación se combina con el proceso de transmisión. Una vez codificado el primer byte, puede comenzar la transmisión. Los bytes restantes pueden codificarse a medida que se transmiten los bytes precedentes.

En el capítulo 3, se presentan los algoritmos de simulación de los protocolos de comunicación de la red de sensores inalámbricos (WSN) y también, los respectivos scripts de los modelos implementados en Python. Para el diseño de los algoritmos se consideraron los siguientes factores: (1) enrutamiento de paquetes, (2) transmisión de datos y (3) topología de red.

Una vez sincronizado, el receptor muestrea el valor de la señal entrante en el centro de cada bit. Hay que tener mucho cuidado para minimizar las desviaciones en la frecuencia de muestreo y la temporización. A medida que se extraen los bits individuales de la radio, se ensamblan en bloques que son la versión codificada de los mensajes de datos reales. Por último, los bloques se decodifican en los datos originales y se ensamblan en un paquete. A menudo, el proceso de decodificación puede corregir errores de bits en la señal recibida y reproducir los datos originales.

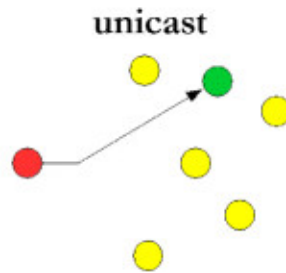
El protocolo de comunicación directa se considera el más sencillo para transmitir datos entre los nodos y la estación base en las WSN. Los datos se envían directamente sin ningún paso intermedio, como se muestra en la Figura 1.19. Ahora bien, cuando el nodo sensor está lejos del sumidero, la comunicación directa hará que el nodo remoto consuma una gran potencia de transmisión. Por tanto, la batería del nodo sensor se agotará rápidamente y la vida útil de la red disminuirá. Dado que la estación base sólo es responsable de recibir datos, este protocolo es eficaz cuando los nodos sensores están cerca de la estación base. los nodos sensores están cerca de la S.

1.3. Tipos de comunicaciones en WSN

A continuación, se describen brevemente los tres tipos de comunicaciones empleadas en diferentes aplicaciones de WSN:

- **Unicast:** la Figura 1.10 muestra este tipo de comunicación que se utiliza para intercambiar información entre dos nodos en la red, es decir, de punto a punto.

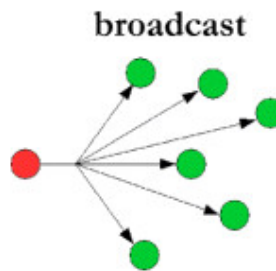
Figura 1.10: Comunicación inalámbrica Unicast.



Fuente: (Sharma & Vaid, 2022)

- **Broadcast:** o difusión, la estación base o "sink" transmite información a todos los nodos de la red, tal como se muestra en la Figura 1.11. Esta información puede ser solicitudes de datos, actualizaciones de programas o paquetes de control. El mensaje enviado llegará a todos los nodos de la red.

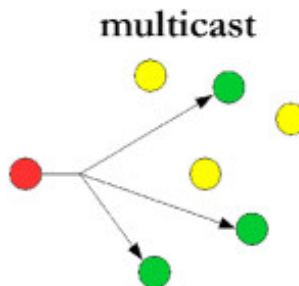
Figura 1.11: Comunicación inalámbrica Broadcast.



Fuente: (Sharma & Vaid, 2022)

- **Multicast:** o multipunto, permite la comunicación entre un nodo y un grupo de nodos, tal como se observa en la Figura 1.12. Este tipo de comunicación se utiliza en los protocolos que incluyen "clustering", donde el nodo llamado "Clúster-head" se encarga de comunicarse con un grupo de sensores.

Figura 1.12: Comunicación inalámbrica Multicast.



Fuente: (Sharma & Vaid, 2022)

1.4. Optimización Energética y Rendimiento en WSNs

Los protocolos de enrutamiento tradicionales no están diseñados según los requisitos específicos de las WSN (Elhoseny et al., 2020). Por ello, los paradigmas de enrutamiento energéticamente eficiente son un área de investigación activa (Senthil et al., 2022; Srinivasan et al., 2024). Los protocolos de enrutamiento conscientes de la energía toman decisiones de enrutamiento basadas en métricas relacionadas con la potencia y la energía para optimizar el rendimiento del protocolo de enrutamiento. (Cao & Pan, 2020)

Los dos objetivos de enrutamiento de «energía de transmisión total mínima» y «tiempo de trabajo total de la red» pueden ser mutuamente contradictorios. Por ejemplo, cuando varias rutas de energía mínima comparten un nodo común, la energía de la batería de este nodo se agotará rápidamente, acortando la vida útil de la red (Singh et al., 2021). En las WSN, la conservación excesiva de la energía, sin tener en cuenta el consumo de energía en los nodos individuales, acelera la partición de la red al agotar las baterías de los nodos energéticamente críticos de la red (Prasanth & Jayachitra, 2020; Sachan et al., 2021). De hecho, acorta la vida útil de la red. Por otra parte, al no tener en cuenta el consumo global de energía, se recurre a rutas con un gran número de saltos y una distancia total más larga (Kamruzzaman & Alruwaili, 2022).

Existen varias estrategias que se emplean para gestionar el consumo energético de manera óptima en las WSN, como la agrupación de nodos, el uso eficiente del tiempo de transmisión y diseño de protocolos de enrutamiento que ahorren energía. La agrupación de nodos consiste en organizar los nodos sensores en estructuras jerárquicas, lo que reduce el consumo de energía durante la transmisión de datos y alarga la vida útil de la red. Con estas estrategias de optimización energética, es posible extender significativamente la vida útil de las WSN, asegurando un funcionamiento fiable y prolongado.

Esto es especialmente importante en áreas remotas o de difícil acceso, donde el mantenimiento y la recarga de los nodos sensores puede ser todo un desafío (Dai et al., 2021). Por lo tanto, la optimización de la energía y el rendimiento en WSN es crucial para la sostenibilidad y la funcionalidad a largo plazo de estas redes, lo que las convierte en un foco central de los esfuerzos de investigación y desarrollo en este campo.

1.4.1. Importancia de la optimización energética en WSN

Una cuestión muy importante es minimizar el consumo de energía sin afectar a la precisión de los datos. Los nodos tienen su propia fuente limitada de energía, por eso necesitamos técnicas de comunicación y procesamiento de datos que minimicen el consumo local de energía. El consumo de energía de la unidad de detección depende de la frecuencia de muestreo y del ciclo de trabajo. La unidad de procesamiento realiza cálculos básicos a partir de la información recibida de la unidad de detección. Consta de un procesador y una memoria externa. La unidad de comunicación por radio se utiliza para la comunicación de datos en una red de sensores inalámbricos, pero tiene un alcance de comunicación reducido debido a las limitaciones energéticas.

Para estimar el consumo de energía de cada una de las arquitecturas que hemos presentado, sumamos el uso de energía de cada uno de los componentes de la aplicación: Transmisión de datos, sobrecarga de encuentro, comprobación de alarmas, detección de datos y energía de reposo. Por ejemplo, el coste energético de la transmisión de datos supone que, en el peor de los casos, el nodo es responsable de cinco nodos hijos. En este escenario de aplicación, un nodo debe recibir un resumen de cada uno de los nodos hijos, combinarlos y transmitir un nuevo resumen a su nodo padre. El coste de cada operación depende del consumo de energía del sistema de radio y de la velocidad binaria a la que pueden comunicarse los datos. (Prasad & Periyasamy, 2023)

Es interesante observar que las mejoras de rendimiento añadidas del nodo específico no tienen un impacto significativo en la vida útil de la aplicación. A efectos de análisis, se supone que el consumo de energía en modo de espera del nodo de especificaciones es el mismo que el del nodo padre. Dado que el consumo de energía en modo reposo domina este escenario de aplicación una vez que se han abordado los demás factores, las mejoras en el consumo de energía de radio son insignificantes. Sin embargo, este no será el caso en un escenario de seguimiento de nodos. (Illes et al., 2016)

1.4.2. Estrategias para la optimización energética

Los nodos sensores tienen la posibilidad de ser alimentados por la red eléctrica convencional, energía solar o baterías. Cada alternativa presenta sus pros y contras en cuanto al abastecimiento de energía. La energía eléctrica de la red puede ser una fuente

de energía fiable, pero también necesita un abastecimiento de energía externo o por medio de cableado. La energía solar es un recurso limpio y renovable, aunque su generación depende de las condiciones climáticas, como la luz del sol. Las baterías son relativamente baratas, pero requieren ser sustituidas de manera regular, y su carga demanda tiempo y dinero. El reto de alimentar los nodos sensoriales se transforma en un enorme reto. (Kanoun, Khriji, et al., 2021)

Además, los nodos sensores requieren un abastecimiento de energía adecuado y fiable para funcionar adecuadamente y operar con gran eficiencia. Si no se considera correctamente el problema del abastecimiento de energía, puede resultar en la pérdida de datos o en un mal funcionamiento del sistema. Disminuirá la exactitud y eficacia de los procedimientos industriales, lo cual impactará directamente en los beneficios de la compañía. Implementa tecnologías de transmisión de energía inalámbrica para solucionar problemas relacionados con el abastecimiento de energía. Estas tecnologías facilitan el recargado automático y conveniente de los nodos sensores, evitando la necesidad de sustituir o recargar la batería. (Kanoun, Bradai, et al., 2021)

En resumen, la optimización a nivel de nodo es la configuración de sensores individuales de modo que estén configurados óptimamente para cumplir determinadas tareas. Esta optimización de los sensores individuales permite una recogida de datos más rápida y coherente, así como una mayor eficiencia en el uso de los recursos. Finalmente, este enfoque se pone de manifiesto en el capítulo 3 para optimizar el consumo energético y del rendimiento en una WSN a través del análisis comparativo de los protocolos de enrutamiento implementados en Python.

1.4.3. Impacto de la optimización energética en la vida útil de la red

En un nodo, los datos recogidos se someten a varias etapas de acondicionamiento de la señal, como filtrado, amplificación y digitalización. El procesamiento posterior de los datos se realiza localmente en el nodo. A continuación, estos paquetes de datos acondicionados se transmiten al circuito receptor mediante una antena y un circuito transmisor. Los niveles de señal deben mantenerse a un nivel adecuado antes de que lleguen a la antena y se propaguen a través de un entorno dispersivo como el agua o el aire (que no introduce tantas pérdidas como el agua).

Por último, hay que tener en cuenta los esquemas de modulación utilizados durante las transmisiones. Dependiendo de la aplicación, algunos pueden utilizar los esquemas de modulación BPSK (baja tasa de datos, baja BER, alto consumo de energía) o QPSK (comparativamente alta tasa de datos, baja BER, bajo consumo de energía).

El proceso inverso se realiza en el nodo receptor. El atenuador o la etapa amplificadora a la salida deciden el nivel de recepción adecuado en el circuito receptor. A continuación, el receptor demodula las secuencias de bits originales, interpretadas por el nodo, aplicando los esquemas de demodulación adecuados. Tanto en el transmisor como en el receptor intervienen circuitos electrónicos que producen una importante pérdida de energía. La distancia entre el nodo transmisor y el nodo receptor también es un parámetro crítico y, por lo tanto, también debe tenerse en cuenta desde el punto de vista de la disipación total de energía.

1.5. Protocolos de enrutamiento en WSN

La tarea de diseñar protocolos de enrutamiento para WSNs es todo un reto debido a las múltiples características que las diferencian de las redes inalámbricas sin infraestructura. Las redes de sensores inalámbricos plantean varios tipos de retos de enrutamiento, tales como, los protocolos LEACH, AODV y DSR. La clasificación de los protocolos de enrutamiento se realiza en función de un entorno homogéneo y heterogéneo adecuado para la aplicación específica (Behera et al., 2022). Una WSN homogénea consta de nodos con la misma energía inicial, y una red de sensores heterogénea contiene nodos de dos o más niveles de energía. El tipo de red puede elegirse en función de los requisitos de la aplicación.

Además, la seguridad de la red es una de las cuestiones más relevantes y se han sugerido varios protocolos de enrutamiento para hacerla resistente a los atacantes internos y externos (Zhang et al., 2022). Las aplicaciones que utilizan sensores inalámbricos deben estar protegidas frente a la inserción, modificación y escucha de paquetes.

En última instancia, esta sección sirve como un recurso indispensable tanto para los desarrolladores de WSN como para los investigadores dedicados, sirviendo como catalizador para mejorar la eficiencia energética y el rendimiento general dentro de sus redes. Los conocimientos obtenidos de este análisis exhaustivo contribuirán sin duda al

esfuerzo constante de avanzar en la tecnología WSN hacia un futuro más eficiente y optimizado.

1.5.1. Importancia de los protocolos de enrutamiento

El protocolo de enrutamiento es un proceso para seleccionar la ruta adecuada para que los datos viajen desde el origen hasta el destino. El proceso se enfrenta a varias dificultades a la hora de seleccionar la ruta, que dependen del tipo de red, las características del canal y las métricas de rendimiento. Los datos detectados por los nodos sensores de una red inalámbrica de sensores (WSN) se envían normalmente a la estación base que conecta la red de sensores con otras redes (puede ser Internet), donde se recogen los datos, se analizan y se toman las medidas oportunas. Esta función primordial y decisiva es particularmente crucial y de suma importancia en los despliegues de WSN donde la vida operativa de los nodos sensores a menudo depende en gran medida de, y depende crucialmente de, fuentes de energía limitadas y finitas, que con frecuencia se manifiestan en forma de baterías o diversos sistemas de recolección de energía empleados para el suministro de energía.

Por otra parte, es absolutamente crítico reconocer y reconocer debidamente que la elección del protocolo de enrutamiento empleado en un entorno WSN puede, y a menudo lo hace, impactar significativamente e influir ampliamente en los indicadores de rendimiento generales y completos exhibidos por la red en su conjunto. Los diferentes protocolos de enrutamiento vienen inherentemente con sus propias ventajas y compensaciones distintivas e idiosincrásicas, que necesariamente abarcan, pero definitivamente no se limitan a, parámetros como la eficiencia energética, la escalabilidad, la adaptabilidad a los cambios de topología en evolución dentro del propio ecosistema de red y el soporte para una amplia variedad de diversos tipos de tráfico de datos que se pueden encontrar. En consecuencia, una comprensión completa y profunda de la importancia vital inherentemente asociada con los protocolos de enrutamiento y sus características diversas y variadas es intrínsecamente indispensable y absolutamente crítica al conceptualizar y, en última instancia, elegir el protocolo de enrutamiento más apropiado y altamente adecuado para una aplicación o implementación WSN específica y distinta.

En este contexto particular y específico, se vuelve extremadamente claro y manifiesto que emprender un análisis comparativo extenso, exhaustivo y meticulosamente elaborado de los protocolos de enrutamiento específicamente implementados y desarrollados abiertamente utilizando el lenguaje de programación Python, universalmente aclamado y extremadamente versátil, puede, e innegablemente lo hará, proporcionar y ofrecer sin esfuerzo ideas y perspectivas valiosas y altamente perspicaces sobre las respectivas fortalezas y debilidades inherentemente exhibido por todos y cada uno de los protocolos de enrutamiento individuales en cuestión. Estos conocimientos abarcadores, debidamente consagrados en los resultados del análisis comparativo antes mencionado, contribuyen en última instancia e inevitablemente al objetivo general y primordial de optimizar y maximizar tanto el consumo de energía como el rendimiento general de la red dentro de las implementaciones de WSN.

1.5.2. Clasificación de Protocolos de Enrutamiento

La razón principal del enrutamiento es garantizar que el paquete se transmite correctamente desde el nodo de origen hasta el sumidero o la estación base. Como es obvio, hay muchos nodos entre la fuente y el destino, además de múltiples caminos que este paquete puede tomar. La tabla de enrutamiento puede mostrar el nodo de siguiente salto y el coste del camino según el protocolo de enrutamiento elegido. Los protocolos de enrutamiento pueden clasificarse en tres categorías: estructura de la red, funcionamiento del protocolo y establecimiento de la ruta.

Los protocolos de enrutamiento según la estructura de la red se denominan: planos, jerárquicos, y basados en la localización. En el caso del enrutamiento plano, es un enrutamiento multisalto en el que todos los nodos operan al mismo tiempo. Como la red suele ser grande, todos los nodos tienen asignada la misma tarea de detección, por lo que, dado que todos los nodos transmiten datos, es probable que se produzca redundancia, lo que conlleva un elevado consumo de energía. El sumidero o la estación base pueden solicitar determinados datos en una región, de modo que todos los nodos de esta región deben enviar estos datos tras la ocurrencia de un evento.

En el enrutamiento jerárquico, los nodos no pueden comunicarse a una distancia muy grande. Por lo tanto, el enrutamiento jerárquico basado en clústeres es una buena solución.

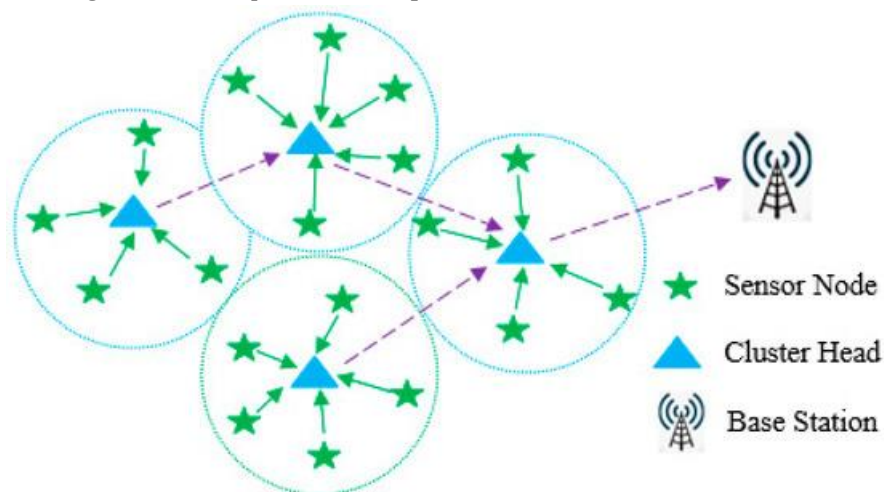
En este esquema de enrutamiento se crean diferentes clústeres y se asignan cabezas de clúster. La importancia de este protocolo de enrutamiento radica en la agregación de datos, que reduce el consumo de energía y envía los paquetes al sumidero.

En el enrutamiento basados en la localización, la localización de los nodos se conoce a través de un GPS de baja potencia en cada nodo. Así, los nodos se dirigen según su ubicación. Por lo tanto, no todos los nodos están obligados a trabajar juntos, algunos pueden ir a dormir para ahorrar energía, mientras que otros detectan eventos. La distancia entre los nodos puede detectarse por la intensidad de la señal recibida de esos nodos

1.5.2.1. Protocolo LEACH

El algoritmo de jerarquía de agrupación adaptativa de baja energía (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH) se basa en el enrutamiento por clústeres (agrupamiento) y admite la agregación de datos. En el caso del primero, se trata de agrupar la red, mientras que el segundo enruta los paquetes de datos desde los nodos emisores hasta los receptores. La Figura 1.13 muestra la arquitectura jerárquica de una WSN en la que los nodos sensores se organizan en clústeres discretos, donde el líder (Head) de cada clúster recopila información de todos los nodos miembros.

Figura 1.13: Arquitectura del protocolo de enrutamiento LEACH.



Fuente: (Khujamatov et al., 2024)

Las cabeceras de clúster (CHs) son elegidas periódicamente basándose en un algoritmo aleatorio distribuido mediante el cual cada uno de los nodos de un clúster se convierte en CH durante una determinada ronda en función de un valor de probabilidad (P). El valor

de probabilidad permite a un miembro del clúster convertirse en CH durante $1/P$ rondas. Es decir, que no hay posibilidad de que un nodo se convierta de nuevo en CH hasta P rondas siguientes. Para evitar colisiones intraclúster, los nodos de origen recogen y transmiten muestras de datos a las CHs mediante acceso múltiple por división de tiempo (TDMA). Las CHs recogen y agregan muestras de datos y transmiten los resultados al receptor. Los CHs utilizan el acceso múltiple por división de código (CDMA) para evitar interferencias entre clústeres.

LEACH reduce el consumo de energía debido al reenvío de paquetes de datos en unicast en lugar de multi y/o broadcast. Sin embargo, LEACH (original) presenta tres inconvenientes: (1) la selección periódica de CH para sustituir los CH con poca batería por otros nuevos aumentaría enormemente el consumo de energía de la red. (2) El establecimiento de enlaces de un solo salto inter y/o intraclúster entre el sumidero, las cabezas de clúster y los miembros del clúster para el envío de datos no es factible para las WSN desplegadas en áreas extensas. (3) Distribución no equilibrada de los CH e incertidumbre en el número y tamaño de los clústeres. Por esta razón, se proponen una serie de versiones modificadas de LEACH con el objetivo de resolver estos inconvenientes.

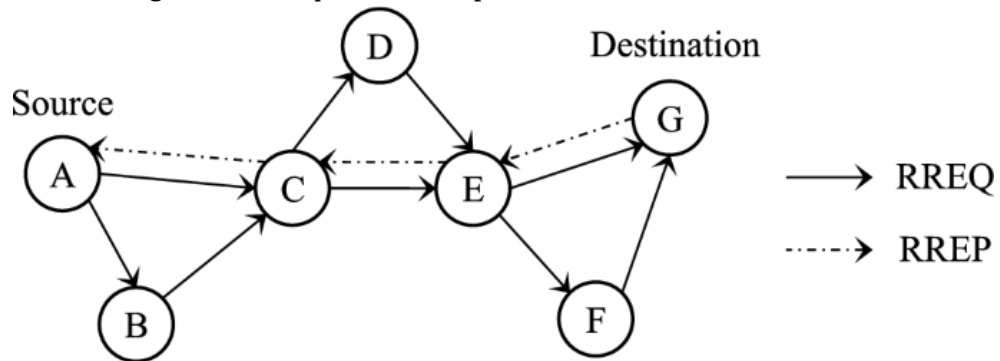
1.5.2.2. Protocolo AODV

El protocolo de enrutamiento vectorial de distancia ad hoc bajo demanda (AODV) permite el enrutamiento multisalto entre nodos móviles participantes en una WSN o MANETs, tal como se muestra en la Figura 1.14. Como protocolo de enrutamiento reactivo, minimiza el número de difusiones proporcionando descubrimiento de rutas bajo demanda en WSN. Es decir, AODV sólo solicita una ruta cuando es necesario y no requiere que los nodos mantengan rutas a destinos que no se utilizan reciente o activamente en la comunicación. (Yin et al., 2022)

Se basa en el algoritmo del vector distancia, como la mayoría de los protocolos de enrutamiento reactivo, la búsqueda de rutas se realiza mediante un ciclo de descubrimiento de rutas que incluye una búsqueda de red de difusión y una respuesta de difusión única que contiene las rutas descubiertas. AODV se basa en números de

secuencia para evitar bucles de enrutamiento e identificar la ruta más reciente. (Feng et al., 2017)

Figura 1.14: Arquitectura del protocolo de enrutamiento AODV.



Fuente: (Yin et al., 2022)

En una red que utiliza el enrutamiento AODV, los nodos almacenan la información de enrutamiento del siguiente salto para los nodos de destino en una tabla de rutas. Cada entrada de la tabla de rutas tiene un valor de vida asociado. Si una ruta no se utiliza durante el periodo de vida útil, la ruta expira y deja de ser válida, borrándose la entrada de la tabla de rutas. Sin embargo, cada vez que se utiliza la entrada de ruta, el periodo de vida se actualiza para que la ruta no se elimine prematuramente.

1.5.2.3. Algoritmo Dijkstra

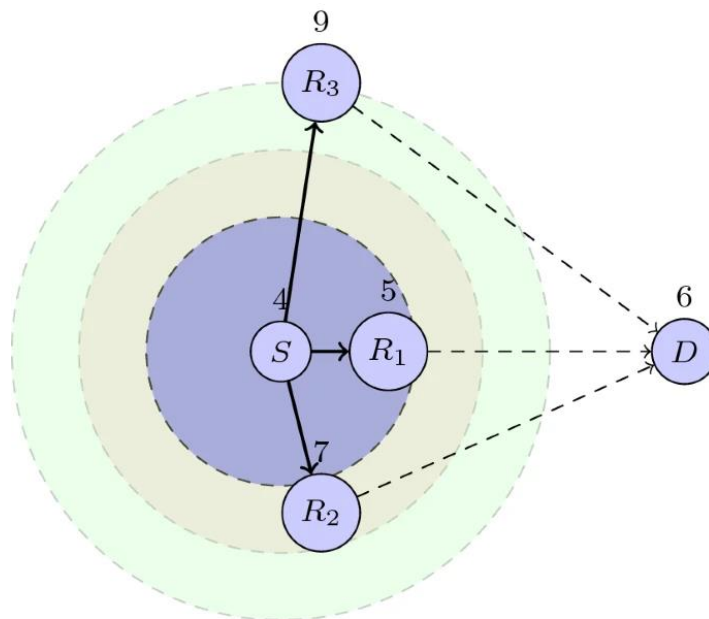
En general, la aplicación del algoritmo de Dijkstra es la optimización en los problemas de redes informáticas, redes de comunicación y redes de transporte. Teóricamente, el algoritmo de Dijkstra es un algoritmo utilizado en la determinación de rutas en redes con un peso mínimo. Este peso es el tiempo de viaje, el kilometraje o el coste necesario durante el trayecto a través de una ruta. (Lusiani et al., 2023)

En 2002 destacó que el algoritmo de Dijkstra es un método popular para encontrar el camino más corto en aplicaciones de enrutamiento, conocido por su eficiencia y facilidad de uso. Este algoritmo sigue siendo motivo de investigaciones, en la que optimizan rutas en aplicaciones de redes inteligentes (Alameri et al., 2024). Una de las principales ventajas de utilizar el algoritmo de Dijkstra es su capacidad para determinar la ruta más corta desde un punto específico a todos los demás puntos del grafo en lugar de sólo a un

destino específico, lo que lo hace útil en redes de comunicación en las que un nodo debe determinar el camino más corto a múltiples destinos.

Esto se explica mediante un ejemplo sencillo en la Figura 1.15, donde el origen (S) y el destino (D) tienen nodos de retransmisión intermedios como R_1 , R_2 . Como R_1 está más cerca de S, Dijkstra lo seleccionará como su relé, aunque el nodo tenga menos energía que R_2 . En este caso, se selecciona R_2 como reenviador, aunque el camino entre S y D sea más largo.

Figura 1.15: Funcionamiento del algoritmo Dijkstra.



Fuente: (Haque & Baroudi, 2020)

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Contexto de la investigación

La investigación se llevará a cabo en la empresa de telecomunicaciones CNT EP, ubicada en la Av. Luis Cordero Crespo y Sufragio Libre, Guayaquil, Ecuador. La empresa CNT EP proporcionará el contexto y los recursos necesarios para realizar la simulación en Python y evaluar los protocolos de enrutamiento en redes de sensores inalámbricos (WSN) en el entorno específico de la empresa.

Figura 2. 1: Instalación de la central de CNT EP.



Elaborado por Autor.

2.2. Diseño y alcance de la investigación

El diseño de la investigación será de carácter experimental, ya que se realizarán simulaciones en Python para evaluar el rendimiento de diferentes protocolos de enrutamiento en WSN. El alcance de la investigación será analítico y explicativo, ya que se buscará analizar en detalle el rendimiento de los protocolos y explicar cómo afectan a la optimización energética y al rendimiento de la red.

2.3. Tipo y métodos de investigación

El presente trabajo de titulación se emplea un enfoque cuantitativo en cuanto al tipo de investigación científica, debido a que se obtendrán datos numéricos a partir de los

algoritmos de simulación implementados en Python y posteriormente nos permite realizar la discusión de resultados con relación al rendimiento de los protocolos de enrutamiento. En cuanto a los métodos de investigación utilizado en el presente documento incluye el método inductivo, el cual nos permite evaluar y plantear las conclusiones a partir de los datos recopilados; también se utiliza el método deductivo, el mismo nos permite validar la hipótesis planteada; y finalmente, el método hipotético-deductivo, para formular nuevas hipótesis a partir de los resultados obtenidos.

2.4. Población y muestra

La población de estudio estará constituida por los nodos de una red de sensores inalámbricos simulada en Python. Dado que se trata de una simulación, se considerará una población completa (censo) para evaluar todos los nodos en la red simulada.

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas cuantitativas que se utilizarán para evaluar los escenarios de simulación incluirán la recopilación de datos de consumo de energía, latencia de la red y otros indicadores de rendimiento de los protocolos de enrutamiento en WSN. Los datos se obtendrán a través de la simulación en Python y se analizarán cuantitativamente para comparar los diferentes protocolos.

2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.

Para validar los resultados de la simulación, se empleará la técnica de validación basada en la sensibilidad de los parámetros. Esta técnica implica variar los parámetros de entrada de la simulación dentro de rangos específicos y analizar cómo afectan los resultados. Además, se realizarán análisis estadísticos para evaluar la consistencia y reproducibilidad de los resultados, garantizando su fiabilidad

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Metodología utilizada para la simulación en Python

El desarrollo de redes de sensores inalámbricos (WSN) requiere un enfoque robusto que permita modelar el comportamiento dinámico de la red, incluyendo las interacciones entre nodos, parámetros de comunicación y consumo de energía. En este sentido, Python dispone de una amplia gama de librerías que facilitan tanto la simulación de entornos de red como la visualización y posterior análisis de los datos obtenidos. A continuación, se describen las librerías de Python que han sido seleccionadas para la simulación de una WSN, detallando su propósito y los motivos de su elección.

3.1.1. Selección de librerías específicas de Python

Con el propósito de crear un entorno de simulación de redes inalámbricas, se han seleccionado varias bibliotecas de Python, donde cada una aporta características únicas y necesarias para el modelado, simulación y análisis del rendimiento de redes. La selección de estas librerías se basó en su probada capacidad para gestionar determinadas herramientas de simulación, por ejemplo, para generar gráficas de las redes, gestionar simulaciones basadas en eventos, análisis de datos y representaciones visuales.

3.1.1.1. NetworkX: Simulación de topologías de red

NetworkX es una librería de Python que permite crear, analizar y visualizar redes complejas. Por ejemplo, en el caso de las simulaciones de WSN, esta librería desempeña funciones determinantes al permitir la representación de la topología de la red como un grafo. En él, los nodos corresponden a los sensores y las aristas representan los enlaces de comunicación entre ellos. Este método de representación es fundamental para simular la estructura de comunicación de las WSN, donde la conectividad, el enrutamiento y las relaciones entre nodos vecinos son factores decisivos para el rendimiento de la red. NetworkX proporciona un manejo versátil de los grafos, incluyendo:

1. Generación dinámica de nodos y aristas, la cual es necesaria para simular escenarios tales como el fallo de nodos o la incorporación de nuevos sensores.

2. Análisis de algoritmos de grafos para la determinación de la trayectoria más corta, clustering y distribuciones de grafos, factores básicos para entender el comportamiento y la eficiencia de la red.

3.1.1.2. SimPy: Sistema de simulación de eventos discretos

SimPy es una librería de simulación de eventos discretos, que permite simular el comportamiento de las WSN a lo largo del tiempo. Por ejemplo, en una WSN, la transmisión de datos, la actividad de los nodos y el consumo de energía ocurren de manera secuencial y dependen de la duración del evento. SimPy establece las bases para modelar estos eventos, lo que permite una simulación completa de procesos de red como:

1. Generación y transmisión de paquetes, en la que los nodos se transmiten en diferentes intervalos.
2. Modelización energética, donde se simula el agotamiento de la batería de cada nodo con cada operación.
3. Planificación de actividades de los nodos sensores, tales como períodos de suspensión, de detección y de retransmisiones en caso de fallo en las comunicaciones.

Los enfoques basados en eventos de SimPy permiten realizar con precisión la simulación basada en eventos de este tipo de acciones dependientes del tiempo. Además, puede programar, supervisar y gestionar procesos de forma escalable, convirtiéndose así en una herramienta muy eficiente orientada a la interpretación de la dinámica de las WSN.

3.1.1.3. Matplotlib/PyViz: visualización de los resultados obtenidos en la simulación

La representación gráfica es un componente importante en las simulaciones, ya que nos permite interpretar los resultados obtenidos por la WSN, así como el impacto de los distintos parámetros de simulación. Por eso, tanto Matplotlib como PyViz poseen capacidades de visualización robustas:

1. Matplotlib es muy utilizado para la generación de visualizaciones de alta calidad tales como gráficos lineales, diagramas de barras y gráficos de dispersión. Esta

herramienta se emplea para ilustrar métricas como la vida útil de la red, rendimiento, pérdida de paquetes y consumo de energía a lo largo del tiempo.

2. PyViz, por su parte, es un entorno apropiado para visualizaciones interactivas en tiempo real. Esta herramienta resulta muy útil para la monitorización dinámica del estado de la red, por ejemplo, la conexión entre nodos, la transmisión de datos en tiempo real o incluso los fallos de los nodos.

Gracias a estas dos librerías se puede obtener información y representaciones gráficas que facilitan el análisis de los resultados de la simulación y la comprensión del comportamiento de la red.

3.1.1.4. Numpy: Tratamiento de datos y cálculos numéricos eficaces

Numpy se ha convertido en una herramienta necesaria para procesar grandes cantidades de datos que son obtenidos a partir de simulaciones basadas en redes de comunicaciones, en este trabajo para una WSN. Al transmitir datos los nodos sensores, los parámetros como la distancia entre nodos, la intensidad de la señal y la cantidad de energía consumida son variables acumulativas que necesitan un procesamiento eficiente. No obstante, Numpy permite realizar operaciones de matrices optimizadas, lo que lo convierte en la herramienta ideal para:

1. Cálculos numéricos, tales como calcular el promedio de las distancias entre nodos o determinar el consumo total de energía de la red a lo largo del tiempo.
2. Operaciones matriciales, empleadas con frecuencia en la creación de grafos de red.
3. Análisis estadístico, que permite sintetizar el rendimiento de la red.

La capacidad de Numpy para realizar simulaciones de miles de nodos y enlaces la convierten en una herramienta muy valiosa para realizar simulaciones de WSN a gran escala.

3.1.2. Implementación del entorno de simulación

Para implementar una simulación de redes de sensores inalámbricos (WSN) es necesario un enfoque metodológico que considere determinados elementos importantes. Por

ejemplo, la configuración de parámetros de red, condiciones de simulación y protocolos de enrutamiento. Además, el entorno de simulación utilizado tiene que reflejar con exactitud el comportamiento de las WSN en la vida real con el fin de obtener resultados comparables. A continuación, se describe cómo se ha estructurado el entorno de simulación y se explican los aspectos técnicos y los motivos que han llevado a su diseño.

3.1.2.1. Configuración de nodos e inicialización de la red

Inicialmente los nodos (sensores) se distribuyen de forma aleatoria o determinista dentro de un área geográfica predefinida. Así, a cada nodo se le asigna un nivel de energía inicial, así como las coordenadas de ubicación (x, y) y otros parámetros de funcionamiento, tales como la distancia de transmisión, el ID del nodo y la velocidad de transmisión de datos. Por lo general, se representa la zona geográfica en un plano 2D, y las ubicaciones de los nodos son aleatorias con el fin de simular escenarios más realistas, incluyendo posibles fallos de los nodos o la introducción dinámica de nuevos nodos en la red.

A continuación, se describen los aspectos técnicos y la motivación para la simulación del presente trabajo de maestría:

1. Ubicación de los nodos: la distribución de los nodos en cada escenario de simulación depende del área especificada (por ejemplo, una malla de 500x500 metros). Dependiendo de las características de la WSN que se está simulando, la distribución de los nodos puede ser uniforme, aleatoria o siguiendo patrones específicos. Por ejemplo, la distribución aleatoria se usa comúnmente para la simulación de aplicaciones de monitoreo ambiental.
2. Esquema energético del nodo: en el caso de los nodos, éstos se inicializan con una capacidad de energía fija. Este modelo de consumo de energía incluye el agotamiento de energía para los modos de transmisión, recepción y reposo, basándose en modelos comunes de WSN donde los costes de transmisión son significativamente mayores que los de recepción.
3. Cobertura en la comunicación de los nodos: para cada nodo se establece un rango de comunicación donde se define la distancia máxima en que puede comunicarse directamente con otros nodos. Este rango es un factor fundamental en la determinación de la conectividad de la red y las trayectorias de enrutamiento

establecidas. A través de la ecuación 3.1 se calcula la distancia entre 2 nodos y es utilizada para que los 2 nodos se encuentran dentro del rango de comunicación:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

donde,

d_{ij} es la distancia entre el nodo i y el nodo j ;

x_i, y_i coordenadas del nodo i ;

x_j, y_j coordenadas del nodo j

En la Tabla 3.1 se presentan los parámetros de configuración iniciales de los nodos sensores en la WSN que serán considerados en el entorno de simulación Python.

Tabla 3. 1: Parámetros de configuración inicial de los nodos sensores.

Parámetro del Nodo	Descripción	Valor Inicial
ID del Nodo	Identificador único de cada nodo	1, 2, 3, ...
Energía Inicial	Capacidad inicial de la batería de cada nodo	1000 mAh
Rango de Transmisión	Distancia máxima de comunicación	50 m
Coordenadas (x, y)	Ubicación en el plano de simulación	Valores aleatorios (0-500)
Estado Inicial	Estado del nodo (activo, inactivo, fallido)	Activo

Elaborado por Autor.

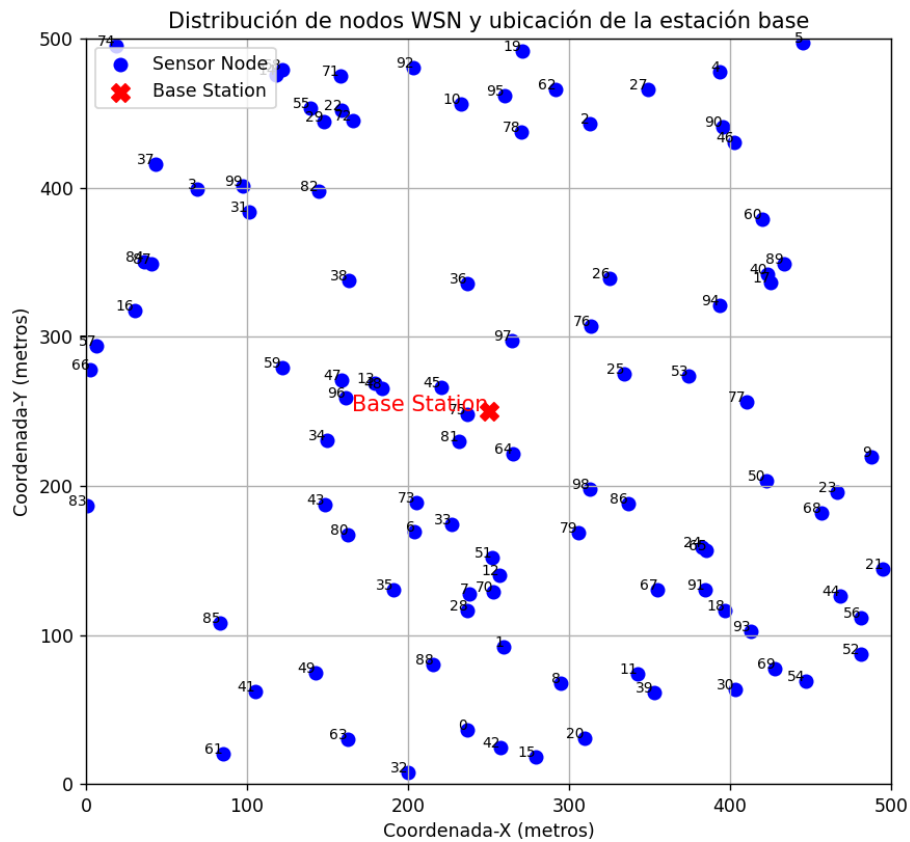
A continuación, se presenta la captura del Algoritmo de Configuración y Visualización de la WSN usando la herramienta OverLeaf (Látex) que utiliza librerías adecuadas para generación de algoritmos o pseudo-códigos y con esto posteriormente simular en el entorno de programación Visual Studio Code basada en Python.

Algorithm 1 Configuración y Visualización de la Red de Sensores

```
1: Input: Número de nodos  $N$ , Tamaño del área  $A$ , Posición de la estación  
   base  $(x_{bs}, y_{bs})$   
2: Inicializar lista vacía de nodos  
3: for cada ID de nodo  $i$  desde 1 hasta  $N$  do  
4:   Asignar aleatoriamente las coordenadas  $x_i$  y  $y_i$  dentro del área  $A$   
5:   Establecer energía inicial del nodo  $i$  en 1000 (unidad arbitraria)  
6:   Crear objeto de nodo con ID,  $(x_i, y_i)$  y nivel de energía  
7:   Agregar nodo a la lista de nodos  
8: end for  
9: Establecer la posición de la estación base en  $(x_{bs}, y_{bs})$   
10: function PLOT_NETWORK(nodos, base_station)  
11:   for cada nodo en nodos do  
12:     Graficar posición del nodo  $(x_i, y_i)$  con color azul  
13:     Etiquetar el nodo con su ID  
14:   end for  
15:   Graficar posición de la estación base en color rojo y etiquetar  
16:   Establecer límites de los ejes al tamaño del área  $A$   
17:   Mostrar gráfica con título, etiquetas y cuadrícula  
18: end function  
19: Llamar a PLOT_NETWORK con la lista de nodos y la estación base
```

La Figura 3.1 muestra la distribución de los nodos en la WSN propuesta y de la estación base.

Figura 3. 1: Distribución de los nodos sensores y ubicación de la BS.



Elaborado por el autor usando el software Visual Studio Code.

3.1.2.2. Topología y enlaces de comunicación

Una vez distribuidos los nodos, se establece la topología de la red en función de la distancia entre ellos y del alcance de transmisión. Para ello, en el entorno de simulación se generan enlaces de comunicación entre los nodos situados dentro del alcance de transmisión de cada uno de ellos. De esta forma se obtiene un esquema de red en el que los nodos son puntos y las aristas representan enlaces de comunicación bidireccionales o unidireccionales entre nodos. A continuación, se explica brevemente la conectividad y la calidad del enlace e interferencias en la WSN propuesta basada en Python:

1. Conectividad: Es necesario que la simulación permita establecer que la red permanece conectada, ya sea total o parcialmente. En caso de que la conectividad no esté garantizada, la comunicación de múltiples saltos a través de protocolos de enrutamiento resulta fundamental.
2. Calidad del enlace e interferencias: Por ejemplo, en una WSN realista, la calidad del enlace puede verse afectada por las interferencias o la degradación de la comunicación entre nodos. Para ello, la simulación se basa en modelos de calidad de enlace, donde la probabilidad de pérdida de paquetes se incrementa a medida que la distancia entre los nodos se aproxime al rango de comunicación.

3.1.2.3. Tiempo de simulación y planificación de casos

Para modelar los procesos en tiempo real de las WSN, tales como la transmisión de datos, consumo de energía y fallos de nodos, es necesario considerar el aspecto de la simulación desde el punto de vista del tiempo. Para ello se utiliza SimPy, que es una librería de simulación de eventos discretos. El tiempo de simulación del sistema que se utiliza es dividido en pasos de tiempo discretos, donde se procesan eventos específico, por ejemplo, la transmisión de paquetes o consumo de energía.

3.1.2.4. Establecimiento de protocolos de encaminamiento

Para la simulación resultan de gran importancia los protocolos de enrutamiento, ya que estos determinan el tráfico de datos entre los nodos sensores y la estación base. Cada protocolo tiene que implementarse de acuerdo con reglas específicas para el

descubrimiento de rutas, el reenvío de datos y la eficiencia energética. En el presente trabajo se analizan tres protocolos:

1. LEACH: se trata del protocolo jerárquico donde los nodos se agrupan en clústeres, y un nodo por clúster actúa como “cabecera de clúster”. Las cabeceras son responsables de recopilar datos de los nodos y transmitirlos a la estación base. Además, LEACH integra un dispositivo de rotación periódica de las cabeceras de clúster para distribuir de manera homogénea el consumo de energía en la red.
 - Formación de clústeres: basada en una función de probabilidad, cada nodo se selecciona como cabecera de clúster. Una vez seleccionadas estas cabeceras, los demás nodos se incorporan a la más cercana, formando clústeres locales.
 - Agregación de datos: Las cabeceras de clúster se encargan de agregar los datos para disminuir la cantidad de información que se transmite a la estación base, y así reducir el consumo de energía.
2. AODV: es un protocolo reactivo que establece rutas sólo cuando es necesario. Además, se basa en el descubrimiento de rutas para establecer un camino hacia el destino (estación base) y transmitir los paquetes de datos. Cuando el nodo establece la ruta, se transmiten los datos a lo largo de la misma hasta que ésta deja de ser válida a causa de la movilidad de los nodos o por agotamiento de la batería.
 - Identificación de rutas: los nodos transmiten mensajes de solicitud de ruta (RREQ) para determinar la ruta al destino. De este modo, el primer nodo que llega al destino responde con una respuesta de ruta (RREP) y se establece la ruta de comunicación.
3. Dijkstra: Este es un algoritmo de trayectoria más corta que se utiliza con fines comparativos. Éste calcula la ruta óptima de cada nodo a la estación base en función de la distancia mínima o del coste energético. Sin embargo, es conveniente evaluar la relación entre la selección de la ruta óptima y el consumo de energía en las WSN.
 - Cálculo de la ruta más corta: el algoritmo determina la ruta más corta de cada nodo a la estación base. Este protocolo puede superar a otros en latencia si el consumo de energía no es un problema.

En la Tabla 3.2 se muestra un cuadro comparativo entre los protocolos de enrutamiento LEACH, AODV y Dijkstra.

Tabla 3. 2: Comparación de Protocolos de Enrutamiento.

Protocolo	Tipo	Método de Enrutamiento	Energía (baja/alta)	Latencia (baja/alta)	Clustering (Sí/No)
LEACH	Jerárquico	Clustering	Baja	Alta	Sí
AODV	Reactivo	Descubrimiento de rutas	Moderada	Moderada	No
Dijkstra	Proactivo	Camino más corto	Alta	Baja	No

Elaborado por Autor.

3.1.2.5. Métricas utilizadas para evaluar el rendimiento

Durante la simulación de cada protocolo de enrutamiento es necesario registrar las métricas que permitan evaluar el rendimiento de WSN, su eficacia e impacto. Estas métricas permiten comparar los protocolos e identificar la mejor solución en distintas condiciones de red.

1. Consumo energético: En este punto se realiza un seguimiento del consumo total de energía de la red. En este cálculo se considera la energía que se utiliza en la transmisión y recepción de datos, entre otras aplicaciones. Además, se controla el consumo de energía por nodo con la finalidad de identificar aquellos nodos que más energía consumen y así evaluar el equilibrio de la carga en la red.
2. La tasa de entrega de paquetes (PDR): esta métrica representa la proporción de paquetes de datos entregados con éxito respecto al número total de paquetes enviados. Una tasa PDR más alta significa que el protocolo de enrutamiento es más eficiente y confiable.
3. Latencia end-to-end: es el tiempo que tarda un paquete en trasladarse desde el nodo de origen hasta el nodo de destino (normalmente la estación base). Una latencia menor es deseable, sobre todo en aplicaciones en las que el tiempo es un factor importante, por ejemplo, la monitorización de condiciones medioambientales.

4. Vida útil de la red: es el tiempo que transcurre desde el momento en que el primer nodo de la red agota su energía o la red se desconecta. Esta métrica es importante en las WSN, donde un objetivo principal es prolongar la vida útil de la red.

3.2. Implementación de protocolos de enrutamiento en Python usando Visual Studio Code.

En esta sección, se presenta la implementación de los tres protocolos de enrutamiento - LEACH, AODV y Dijkstra- en la plataforma Python. Estos protocolos presentan características específicas de eficiencia energética y rendimiento de enrutamiento en redes inalámbricas de sensores (WSN). A continuación, se describen las implementaciones de los algoritmos (pseudo-códigos) que se utilizan para evaluar los protocolos e enrutamiento.

3.2.1. Implementación del protocolo Jerarquía de agrupación adaptativa de baja energía (LEACH)

LEACH tiene una estructura jerárquica que permite minimizar el consumo de energía clasificando los nodos en clústeres. En cada clúster hay una “cabecera de clúster” responsable de agregar datos y transmitirlos a la estación base. Éstas rotan de forma periódica para que el consumo de energía se equilibre entre los nodos. Se adjunta la captura del algoritmo de Implementación del Protocolo LEACH y que se explica brevemente:

1. Inicio: los nodos son inicializados mediante coordenadas aleatorias y cantidad fija de energía. Además, la estación base se sitúa en un lugar predefinido de la red.
2. Selección de la cabecera del clúster: Como cabezas de clúster son seleccionados aleatoriamente un determinado porcentaje de nodos basándose en un valor de probabilidad p_{CH} . Las cabeceras de clúster están encargadas de agregar datos de otros nodos de su clúster y enviarlos a la estación base.
3. Asignación de clústeres: cada nodo busca la cabecera de clúster más cercana y se asocia a ella. Esto asegura que todos los nodos pertenezcan a un clúster, reduciendo así los costes energéticos de comunicación.

4. Visualización: aquí se visualiza la red, con las cabeceras de clúster marcadas en rojo y los nodos normales en azul. Las conexiones entre los nodos y sus cabeceras de clúster asignadas están marcadas con líneas, lo que permite una representación clara de la formación de clústeres. Además, se ha marcado en verde la estación base ubicada en el centro de la red.

Algorithm 1 Implementación del Protocolo LEACH

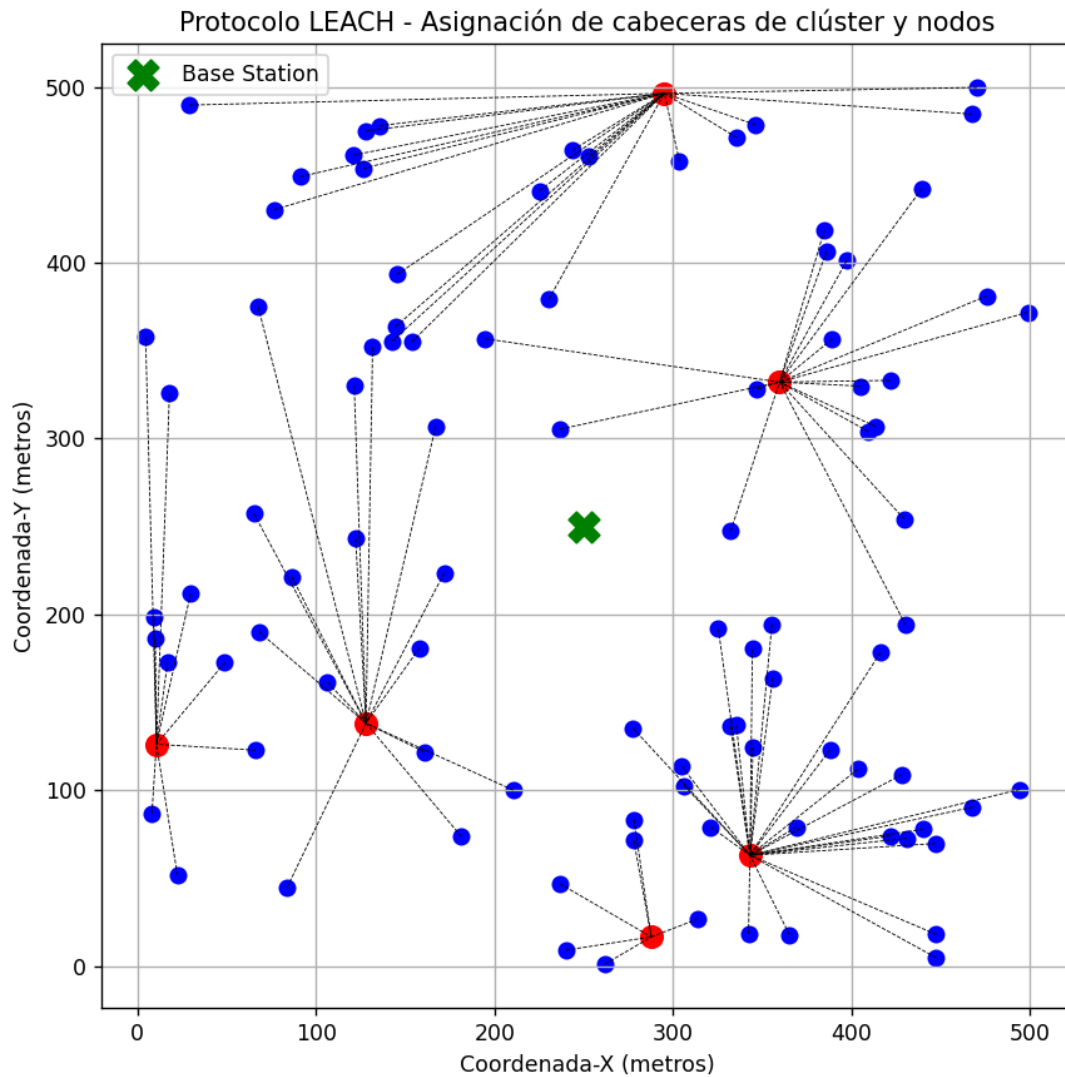
```

1: Input: Lista de nodos  $N$ , probabilidad de cluster head  $p_{CH}$ , posición de la
   estación base  $(x_{bs}, y_{bs})$ 
2: for cada nodo  $i$  en  $N$  do
3:   Asignar coordenadas  $(x_i, y_i)$  aleatorias dentro del área de simulación
4:   Inicializar energía del nodo  $i$  a 1000 (valor arbitrario)
5:   Establecer el estado del nodo  $i$  como "no cluster head"
6: end for
7: Establecer posición de la estación base en  $(x_{bs}, y_{bs})$ 
8: function ELECT_CLUSTER_HEADS(nodos,  $p_{CH}$ )
9:   for cada nodo en nodos do
10:    Generar un número aleatorio
11:    if número aleatorio  $< p_{CH}$  then
12:      Marcar nodo como "cluster head"
13:    end if
14:   end for
15: end function
16: function ASSIGN_CLUSTERS(nodos)
17:   for cada nodo no-cluster head en nodos do
18:     Encontrar el cluster head más cercano
19:     Asignar nodo al cluster head más cercano
20:   end for
21: end function
22: function VISUALIZE_CLUSTERS(nodos, base_station)
23:   for cada nodo en nodos do
24:     if nodo es cluster head then
25:       Graficar posición del nodo en color rojo
26:     else
27:       Graficar posición del nodo en color azul
28:       Dibujar línea hacia el cluster head asignado
29:     end if
30:   end for
31:   Graficar posición de la estación base en color verde
32:   Mostrar gráfica con título y leyenda
33: end function
34: Llamar a ELECT_CLUSTER_HEADS con la lista de nodos y  $p_{CH}$ 
35: Llamar a ASSIGN_CLUSTERS con la lista de nodos
36: Llamar a VISUALIZE_CLUSTERS con la lista de nodos y la estación base

```

La Figura 3.2 visualiza la asignación de cabeceras de clúster y de nodos sensores en el protocolo de enrutamiento LEACH sobre la WSN modelada.

Figura 3. 2: Asignación de cabeceras de clústeres y nodos sensores para el protocolo LEACH.



3.2.2. Implementación del protocolo AODV

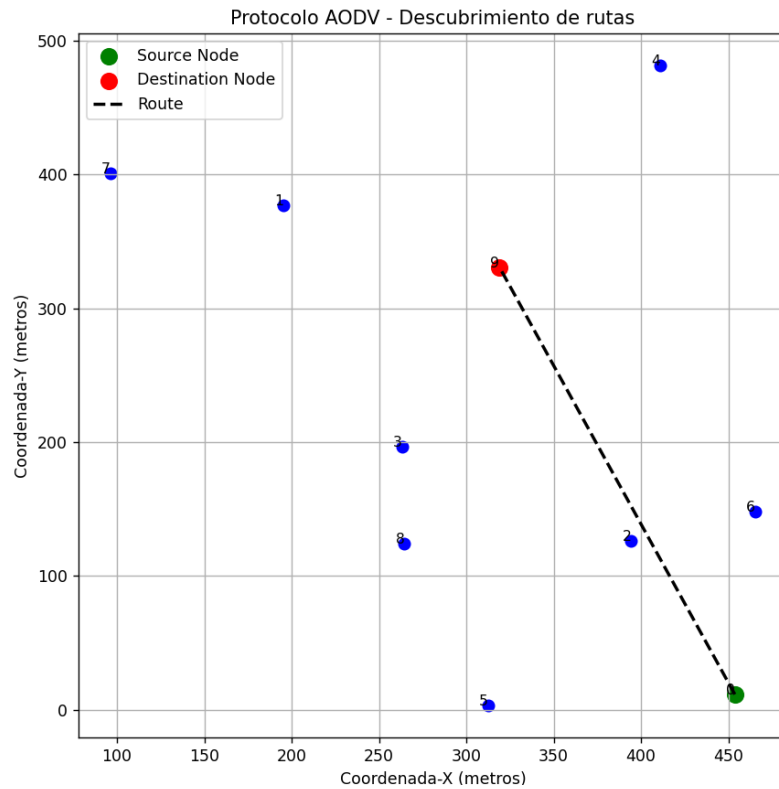
AODV está basado en la técnica de enrutamiento reactivo, es decir, sólo establece rutas cuando los nodos tienen datos que enviar, lo que permite reducir el consumo de energía destinado a mantener las rutas no utilizadas. AODV resulta adecuado en redes con topologías dinámicas y es frecuente su uso en WSN donde las rutas cambian debido al agotamiento de la energía o a la movilidad de los nodos. A continuación, se describe el pseudo-código de la implementación del protocolo AODV en una WSN. AODV permite establecer rutas de comunicación entre nodos únicamente cuando es necesario, por lo que optimiza el uso de recursos y evita el mantenimiento constante de las rutas.

Algorithm 1 Implementación del Protocolo AODV

```
1: Input: Lista de nodos  $N$ , Nodo origen  $S$ , Nodo destino  $D$ 
2: for cada nodo  $i$  en  $N$  do
3:   Inicializar coordenadas  $(x_i, y_i)$  aleatorias dentro del área de simulación
4:   Inicializar tabla de enrutamiento vacía para cada nodo
5: end for
6: function ROUTE_DISCOVERY(source, destination)
7:   Enviar mensaje RREQ desde  $S$  a los nodos vecinos
8:   for cada nodo  $i$  en  $N$  excepto  $S$  do
9:     Recibir mensaje RREQ de  $S$ 
10:    Actualizar la tabla de enrutamiento de  $i$  con la ruta hacia  $S$ 
11:   end for
12:   Enviar RREP desde el nodo destino  $D$  de regreso a  $S$ 
13:   Actualizar la tabla de enrutamiento de  $S$  con la ruta hacia  $D$ 
14: end function
15: function VISUALIZE_ROUTE(source, destination)
16:   Graficar la posición de cada nodo en azul
17:   Destacar nodo origen  $S$  en verde
18:   Destacar nodo destino  $D$  en rojo
19:   Dibujar línea punteada entre  $S$  y  $D$  para visualizar la ruta
20:   Mostrar gráfica con leyenda y cuadrícula
21: end function
22: Llamar a ROUTE_DISCOVERY con el nodo origen  $S$  y nodo destino  $D$ 
23: Llamar a VISUALIZE_ROUTE con  $S$  y  $D$ 
```

La Figura 3.3 visualiza el descubrimiento de rutas entre dos nodos sensores que se comunican entre sí usando el protocolo AODV.

Figura 3. 3: Descubrimiento de rutas entre nodos usando el protocolo AODV.



Elaborado por el autor usando el software Visual Studio Code.

3.2.3. Implementación del protocolo Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra es un protocolo de enrutamiento proactivo que permite determinar el camino más corto entre cada nodo y la estación base. Aunque no está pensado específicamente para las WSN, es un punto de referencia para evaluar la eficiencia del enrutamiento en términos de longitud mínima del camino y latencia. A partir de la conectividad de los nodos y las distancias de los enlaces, cada nodo determina la distancia mínima a la estación base mediante el algoritmo de Dijkstra. A pesar de que este algoritmo considera principalmente la distancia, es posible modificarlo e incorporar el consumo de energía como parte del parámetro de coste para la selección de la ruta.

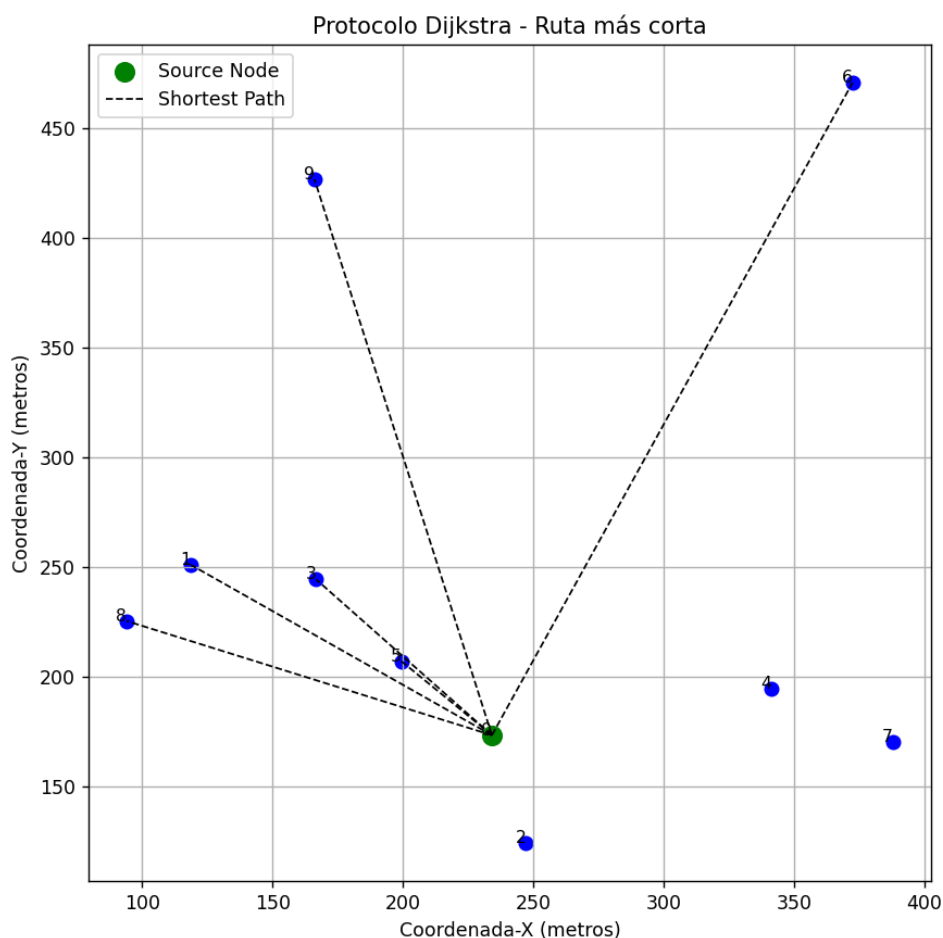
A continuación, se presenta el pseudo-código del protocolo Dijkstra para la determinación de la ruta más corta en la WSN propuesta en el presente trabajo de maestría.

Algorithm 1 Dijkstra's Algorithm for Shortest Path

```
1: Input: Lista de nodos  $N$ , Nodo fuente  $S$ 
2: for cada nodo  $i$  en  $N$  do
3:   Inicializar coordenadas  $(x_i, y_i)$  aleatorias dentro del área de simulación
4:   Inicializar lista de vecinos para cada nodo
5: end for
6: function DIJKSTRA_SHORTEST_PATH(source)
7:   Inicializar distancia de cada nodo como infinito, excepto  $S$ 
8:   Añadir  $S$  a la cola de prioridad con distancia 0
9:   while cola de prioridad no está vacía do
10:    Extraer nodo con la menor distancia
11:    for cada vecino del nodo actual do
12:      Calcular la nueva distancia a través del nodo actual
13:      if la nueva distancia es menor que la actual then
14:        Actualizar la distancia y añadir el vecino a la cola
15:      end if
16:    end for
17:  end while
18: end function
19: function VISUALIZE_SHORTEST_PATH(nodos, source, distances)
20:   Graficar la posición de cada nodo en azul
21:   Destacar nodo fuente  $S$  en verde
22:   for cada nodo  $i$  en  $N$  do
23:     if nodo  $i$  es alcanzable desde  $S$  then
24:       Dibujar línea entre  $S$  y  $i$  para mostrar la ruta más corta
25:     end if
26:   end for
27:   Mostrar gráfica con leyenda y cuadrícula
28: end function
29: Llamar a DIJKSTRA_SHORTEST_PATH con nodo fuente  $S$ 
30: Llamar a VISUALIZE_SHORTEST_PATH con  $S$  y las distancias calculadas
```

En la Figura 3.4 se muestra el descubrimiento de rutas entre nodos utilizando el protocolo de enrutamiento Dijkstra.

Figura 3. 4: Descubrimiento de rutas entre nodos usando el protocolo Dijkstra.



Elaborado por el autor usando el software Visual Studio Code.

3.3. Escenarios de simulación:

Para evaluar el rendimiento de los distintos protocolos de enrutamiento (LEACH, AODV y Dijkstra) en una red de sensores inalámbricos (WSN), fue necesario implementar escenarios de simulación. Mediante el ajuste de parámetros como el tamaño de la red, la densidad de nodos y las restricciones energéticas, se puede evaluar el consumo energético y el rendimiento de la red. A continuación, se describen los tres principales escenarios de simulación diseñados para evaluar los protocolos de enrutamiento en distintas condiciones de red.

Para cada uno de los escenarios de simulación propuestos, los siguientes parámetros (véase la Tabla 3.3) se mantienen constantes para garantizar la comparabilidad entre distintas densidades de red.

Tabla 3. 3: Configuración de parámetros los escenarios de simulación de una WSN usando protocolos LEACH, AODV y Dijkstra.

Parámetro	Valor
Rango de transmisión	50 m
Modelo energético	Individual (basado en el modelo de radio)
Tamaño de los paquetes	500 bits
Consumo energético en reposo	10 μ W

Elaborado por Autor.

3.3.1. Escenario 1: Red con baja densidad (Low Density) de nodos

En este escenario se ha simulado una WSN con una baja densidad de nodos. Ha sido diseñado con el propósito de analizar el rendimiento de los protocolos de enrutamiento en redes poco densas, donde la conectividad de los nodos es limitada y las rutas tienden a ser más largas. En este escenario el consumo energético y la latencia son muy útiles en caso de que se disponga de un menor número de nodos vecinos directos. En la Tabla 3.4 se presentan los parámetros que han sido configurados para el escenario 1 en la que hay una densidad baja de nodos en la WSN.

Tabla 3. 4: Configuración de parámetros para el escenario 1 – red con densidad baja.

Parámetro	Valor
Número de Nodos	50
Tamaño de la zona	500 x 500 m
Ubicación de los nodos	Random
Rango de transmisión	50 m
Tiempo de simulación	60 minutos
Movilidad del nodo	Estático (sin movilidad)

Elaborado por Autor.

El objetivo es evaluar el comportamiento de los protocolos de enrutamiento frente a la comunicación a larga distancia en una red dispersa, prestando especial atención al consumo energético y a la tasa de entrega de paquetes (Packet Delivery Ratio, PDR). En la sección 3.4.1. se presentan los resultados obtenidos y su respectivo análisis, en la que se visualizan el consumo energético total, la PDR y vida útil de la red.

Por ejemplo, este escenario se utilizan redes de baja densidad, y se espera que AODV experimente una latencia más alta a causa de las rutas de mayor longitud para establecer conexiones, en tanto que LEACH puede presentar una menor eficiencia en la formación de clústeres a causa del menor número de vecinos disponibles para agruparse. Por su parte, Dijkstra lograría un mejor rendimiento en la búsqueda de rutas óptimas, aunque tendría que consumir más energía durante el cálculo de la ruta.

3.3.2. Escenario 2: Red de densidad media (Medium Density) de nodos

En este escenario, la densidad de la red aumenta, simulando una WSN más conectada en la que los nodos tienen un número moderado de vecinos directos. Esto nos permite medir cómo se adaptan los protocolos a un entorno más poblado con distancias medias más cortas entre nodos. En la Tabla 3.5 se presentan los parámetros que han sido configurados para el escenario 2 en la que hay una densidad media de nodos en la WSN.

Tabla 3. 5: Configuración de parámetros para el escenario 2 – red con densidad media.

Parámetro	Valor
Número de Nodos	100
Tamaño de la zona	500 x 500 m
Ubicación de los nodos	Random
Rango de transmisión	50 m
Tiempo de simulación	60 minutos
Movilidad del nodo	Estático (sin movilidad)

Elaborado por Autor.

De manera ídem al escenario 1, para este escenario 2 el objetivo es evaluar la forma en que los protocolos de enrutamiento controlan la comunicación en una red medianamente densa, haciendo especial énfasis en la distribución de la energía y la latencia en la red. En la sección 3.4.2. se presentan los resultados obtenidos y su respectivo análisis, en la que se visualizan el consumo energético total, la PDR y vida útil de la red para este escenario.

Para una red de densidad media el rendimiento energético de LEACH debería ser mayor debido al mayor número de nodos disponibles para el clustering. Por su parte, AODV puede presentar una latencia menor en comparación con el escenario 1, ya que existen más nodos vecinos disponibles para el descubrimiento de rutas. Por otra parte, Dijkstra, a pesar de seguir descubriendo rutas óptimas, puede verse afectado por una mayor sobrecarga computacional a medida que el tamaño de la red aumenta.

3.3.3. Escenario 3: Red de densidad alta (High Density) de nodos

En este escenario se ha utilizado una red de alta densidad en la que 150 nodos están distribuidos en la misma zona. La finalidad es evaluar cómo los protocolos de enrutamiento se adaptan a medida que la red se congestiona y se dispone de muchas rutas potenciales. En la Tabla 3.6 se presentan los parámetros que han sido configurados para el escenario 3 en la que hay una densidad alta de nodos en la WSN.

Tabla 3. 6: Configuración de parámetros para el escenario 3 – red con densidad alta.

Parámetro	Valor
Número de Nodos	150
Tamaño de la zona	500 x 500 m
Ubicación de los nodos	Random
Rango de transmisión	50 m
Tiempo de simulación	60 minutos
Movilidad del nodo	Estático (sin movilidad)

Elaborado por Autor.

Así como se ha explicado en los escenarios de simulación 1 y 2, para este escenario de simulación el propósito es evaluar la escalabilidad de cada protocolo en una WSN de densidad alta y evaluar la relación entre el consumo energético y la latencia en WSN.

En un entorno de alta densidad, LEACH es el método que más energía puede ahorrar debido a la eficiencia de sus agrupaciones, pero, cuando las rutas se congestionan, AODV puede sufrir una mayor pérdida de paquetes. En el caso de Dijkstra, podría tener dificultades con las demandas computacionales, aunque también debería destacar a la hora de minimizar las distancias de las rutas.

Por tanto, el rango de transmisión no varía en función de la potencia de transmisión, sino del número de nodos. Este modelo energético considera los estados de transmisión, recepción y reposo, lo cual nos permite conocer la energía consumida durante las distintas fases de la comunicación. A fin de que los resultados sean compatibles, el tamaño de los paquetes es de 500 bits en todos los protocolos.

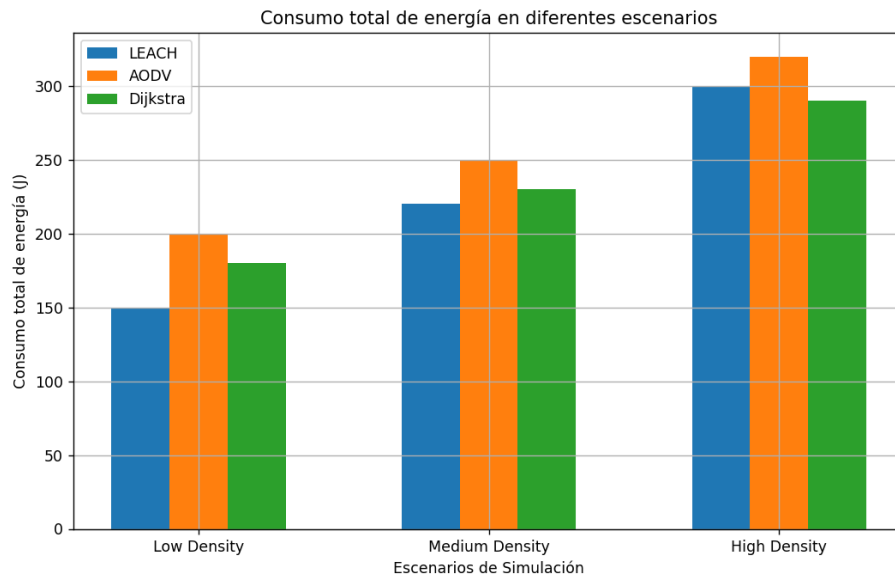
3.4. Discusión de resultados obtenidos en los escenarios de simulación

En esta sección se analizó de forma detallada los resultados obtenidos a partir de la simulación de cada protocolo de enrutamiento (LEACH, AODV y Dijkstra) en diferentes escenarios de red. En este sentido, se evaluaron tres métricas, el consumo energético, la latencia y la PDR con el objetivo de determinar el rendimiento y la eficiencia de cada protocolo en diferentes densidades de red (baja, media y alta). Con estos resultados se puede comprender cuáles son los aspectos positivos y negativos de cada protocolo.

3.4.1. Análisis comparativo del consumo energético en los escenarios de simulación

En la Figura 3.5 puede verse el consumo energético total (J) para cada protocolo en los tres escenarios de densidad. Si se compara la eficiencia de LEACH en términos de ahorro energético, se comprueba que es ideal para aplicaciones sensibles a la energía. En las WSNs el consumo energético es una métrica muy importante por la limitación del suministro eléctrico de los nodos sensores. Si se consigue minimizar el consumo energético, se extiende significativamente la vida útil de la red, lo que resulta decisivo en despliegues en zonas remotas o difícil acceso. Los tres protocolos han mostrado patrones distintos de consumo total de energía, los cuales son analizados por separado:

Figura 3. 5: Resultados obtenidos del consumo total de energía (J) en diferentes escenarios de simulación.



Elaborado por el autor usando el software Visual Studio Code.

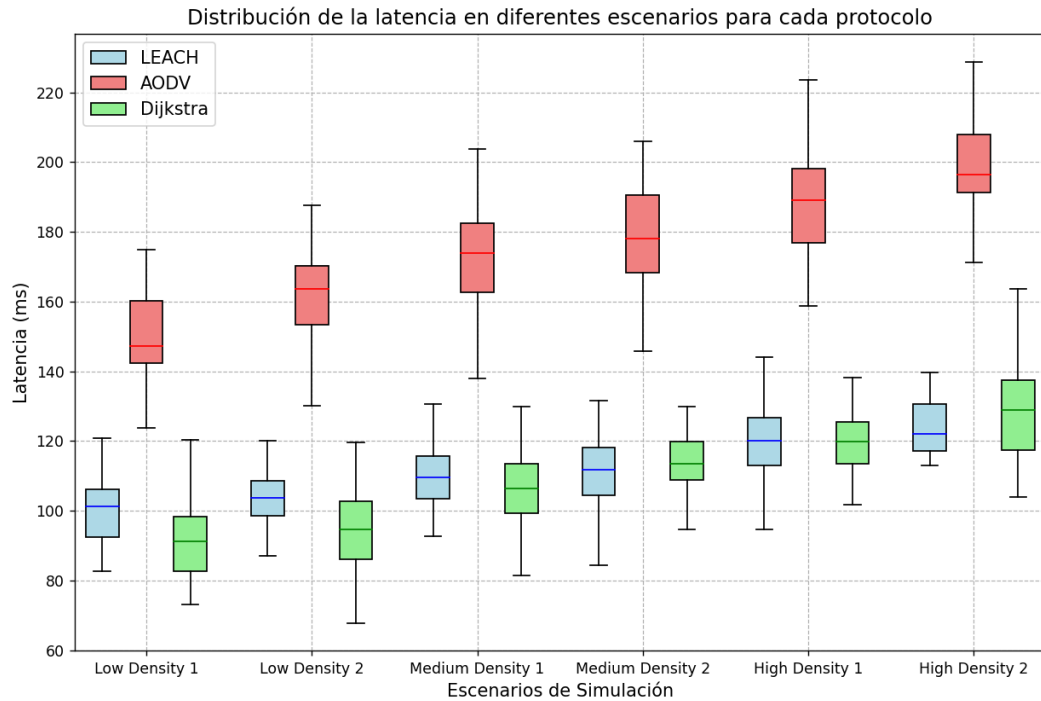
1. LEACH ha logrado una disminución del consumo energético en todas las densidades de tráfico (baja, media y alta) en base a la agrupación en clústeres. De esta forma, los nodos se comunican directamente con sus correspondientes líderes de clúster, disminuyendo de este modo el consumo energético durante las transmisiones remotas.
2. AODV, se caracteriza por un alto consumo energético, sobre todo en escenarios de alta densidad. Debido a la naturaleza de AODV basada en la reacción, en la cual las rutas y las conexiones se establecen bajo demanda, a medida que se incrementa el tamaño de la red el consumo de energía se incrementa.
3. Dijkstra, en cambio, consume poca energía, lo que representa un equilibrio entre eficiencia y enrutamiento proactivo. Aunque, en un escenario poco denso, el consumo energético del método Dijkstra es significativamente superior, debido al establecimiento de rutas óptimas a través de nodos distribuidos.

3.4.2. Análisis comparativo de la latencia en los escenario de simulación

L En la Figura 3.6 se muestra de forma gráfica la asignación de retardo en diferentes escenarios, utilizando LEACH, AODV y Dijkstra. Esta gráfica resalta la superioridad del

método Dijkstra en la reducción del retardo de transmisión, un factor de gran importancia en aplicaciones con requisitos de capacidad de respuesta en tiempo real.

Figura 3. 6: Resultados obtenidos de la distribución de la latencia en diferentes escenarios de simulación para cada protocolo de enrutamiento.



Elaborado por el autor usando el software Visual Studio Code.

Se considera que una menor latencia de los datos es más conveniente para que éstos se transmitan a tiempo. Para cada escenario de la densidad de tráfico utilizando los protocolos LEACH, AODV y Dijkstra se discuten los resultados obtenidos sobre las tendencias de latencia observadas:

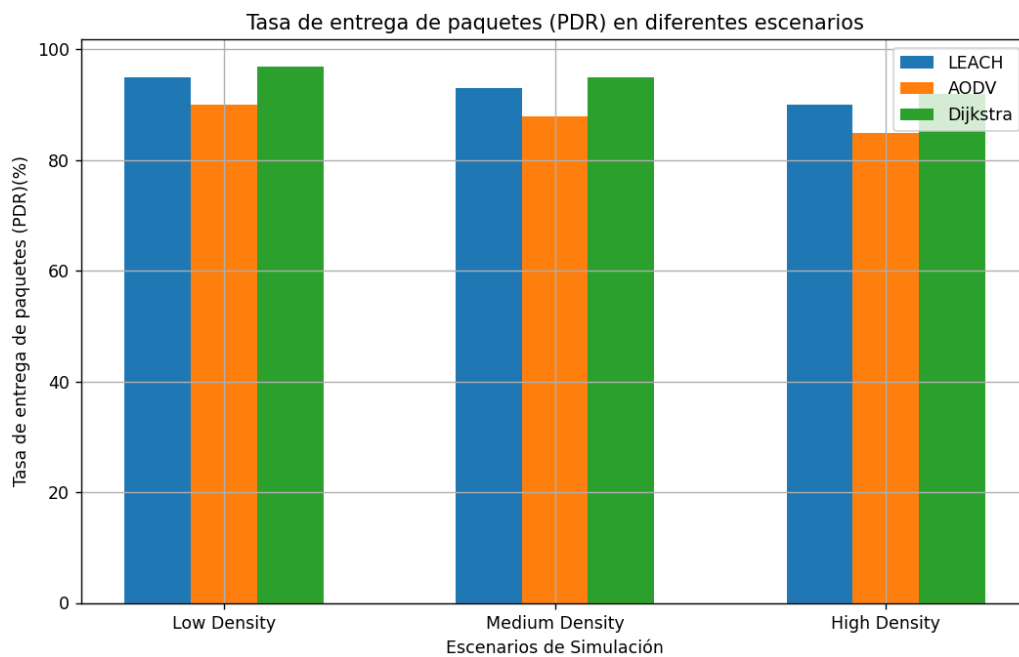
1. LEACH presenta un retardo de transmisión relativamente bajo, aunque se incrementa cuando los escenarios son muy densos como consecuencia de la congestión en los nodos líderes de clúster. Esto puede dar origen a la congestión, especialmente cuando varios nodos transmiten datos simultáneamente.
2. AODV resulta ser el protocolo de latencia más alta entre los tres, sobre todo a causa de su naturaleza reactiva. En efecto, el descubrimiento de rutas en AODV produce retardos, que se incrementan en redes densas donde es necesario establecer más rutas de forma dinámica.

3. Dijkstra logró la latencia más baja en todos los escenarios debido a su enfoque de enrutamiento proactivo. Además, al calcular previamente las rutas óptimas, Dijkstra minimiza las latencias de transmisión, lo que resulta muy apropiado para aplicaciones sensibles a éstas.

3.4.3. Análisis comparativo de la tasa de entrega de paquetes (PDR) en los escenarios de simulación

En la Figura 3.7 se representa para cada protocolo la PDR en varios escenarios de densidad, lo que demuestra la mayor eficacia de Dijkstra, concretamente en redes densas en las que otros protocolos pueden tener problemas.

Figura 3. 7: Resultados obtenidos de PDR en diferentes escenarios de simulación para cada protocolo de enrutamiento.



Elaborado por el autor usando el software Visual Studio Code.

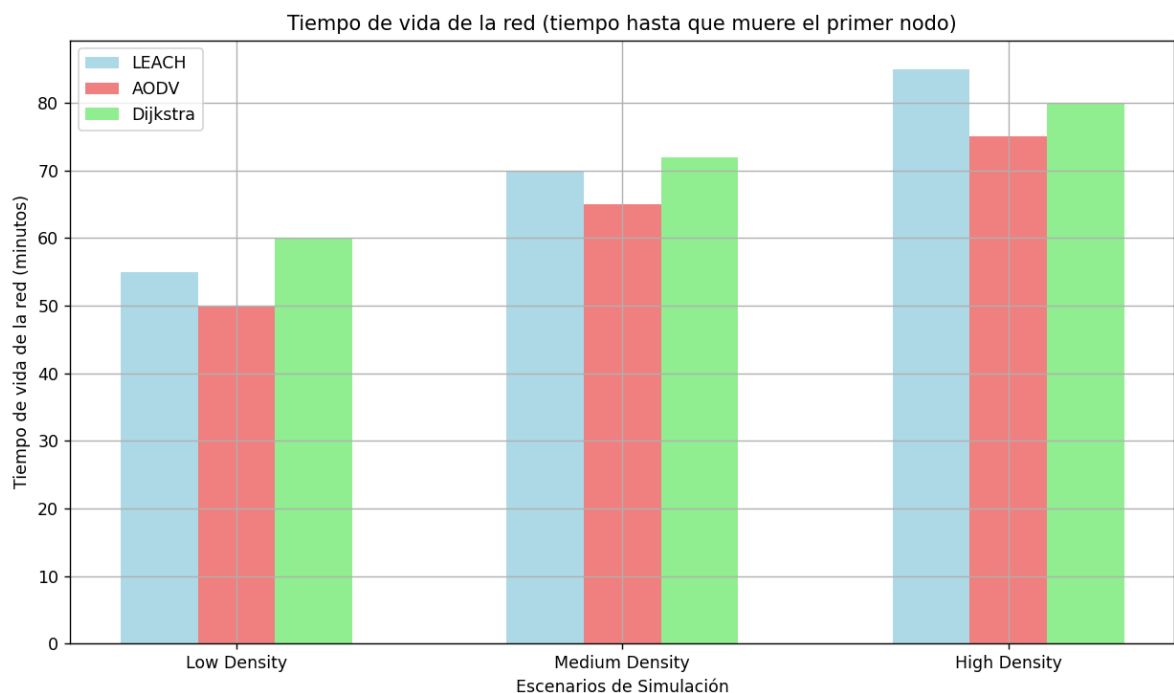
La tasa de entrega de paquetes (PDR) es una métrica que indica si la transmisión de datos es eficaz y si el protocolo es capaz de entregar paquetes a través de la red. A continuación, se describen los resultados obtenidos en la PDR para los protocolos LEACH, AODV y Dijkstra en los escenarios de simulación:

1. LEACH muestra una PDR muy alta, tanto en redes de baja como de media densidad. En cambio, en configuraciones de alta densidad, la PDR disminuye ligeramente a causa de la saturación que sufren las cabezas de clúster.
2. AODV obtiene una PDR moderada, con una disminución de la eficacia en escenarios de alta densidad de tráfico a causa del proceso reactivo para el descubrimiento de rutas, el cual provoca pérdida de paquetes durante su establecimiento.
3. Dijkstra ha demostrado la PDR más alta entre los diferentes niveles de densidad, debido a que su enrutamiento proactivo reduce las pérdidas de paquetes proporcionando rutas estables y consistentes.

3.4.4. Análisis comparativo del tiempo de vida de la red en los escenarios de simulación

En la Figura 3.8 se muestra la vida útil de la red (tiempo hasta que muere el primer nodo) para cada uno de los protocolos, evidenciando la ventaja de LEACH en la conservación de energía y la mayor duración de la red.

Figura 3. 8: Resultados obtenidos del tiempo de vida de la red en diferentes escenarios de simulación para cada protocolo de enrutamiento.



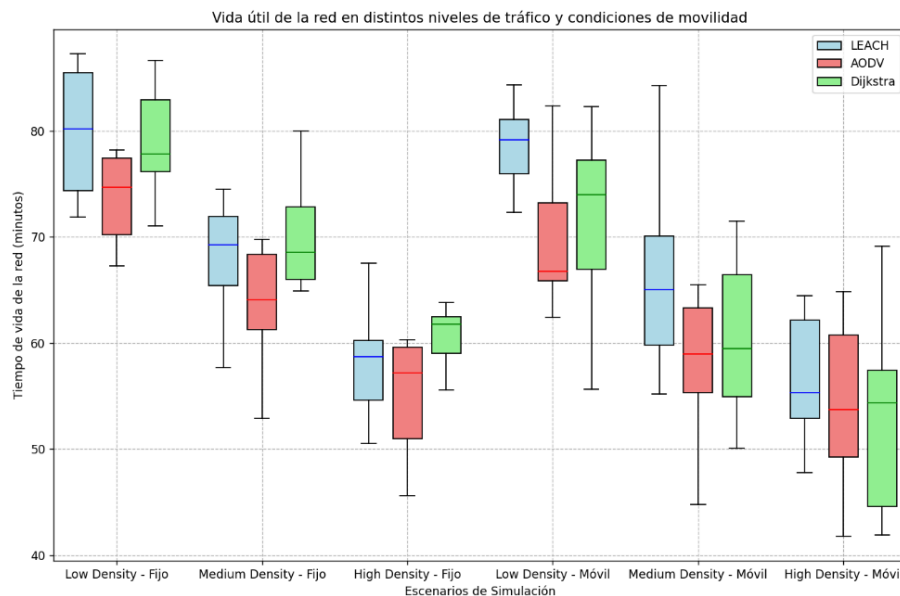
Otro parámetro de WSN es la vida útil de la red, es decir, el tiempo que transcurre hasta que el primer nodo se apaga debido al agotamiento de energía. Si la red tiene una mayor vida útil, disminuye la necesidad de mantenimiento y aumenta la resistencia de la red. A continuación, se describe la vida útil de cada protocolo en distintos escenarios:

1. LEACH consigue la mayor vida útil de la red en todos los escenarios de densidad debido a su mecanismo de clustering de bajo consumo. Además, la movilidad de las cabezas de grupo permite distribuir la carga energética y reducir la duración de la batería en toda la red.
2. AODV muestra una vida útil más corta, sobre todo en escenarios de alta densidad, a causa de la energía consumida en el descubrimiento y mantenimiento reactivo de rutas.
3. Dijkstra consigue una vida útil de la red menor, aunque el mayor consumo energético durante el mantenimiento de las rutas afecta a la vida útil total.

3.4.5. Efecto de los niveles de tráfico y la movilidad en la vida útil de la red

En la Figura 3.9 se ilustra el tiempo de vida de la red en diferentes condiciones de tráfico y movilidad, resaltando la adaptabilidad de LEACH y las limitaciones de AODV en entornos dinámicos.

Figura 3. 9: Resultados obtenidos del tiempo de vida de WSN en diferentes niveles de tráfico y condiciones de movilidad en los escenarios de simulación para cada protocolo de enrutamiento.



Elaborado por el autor usando el software Visual Studio Code.

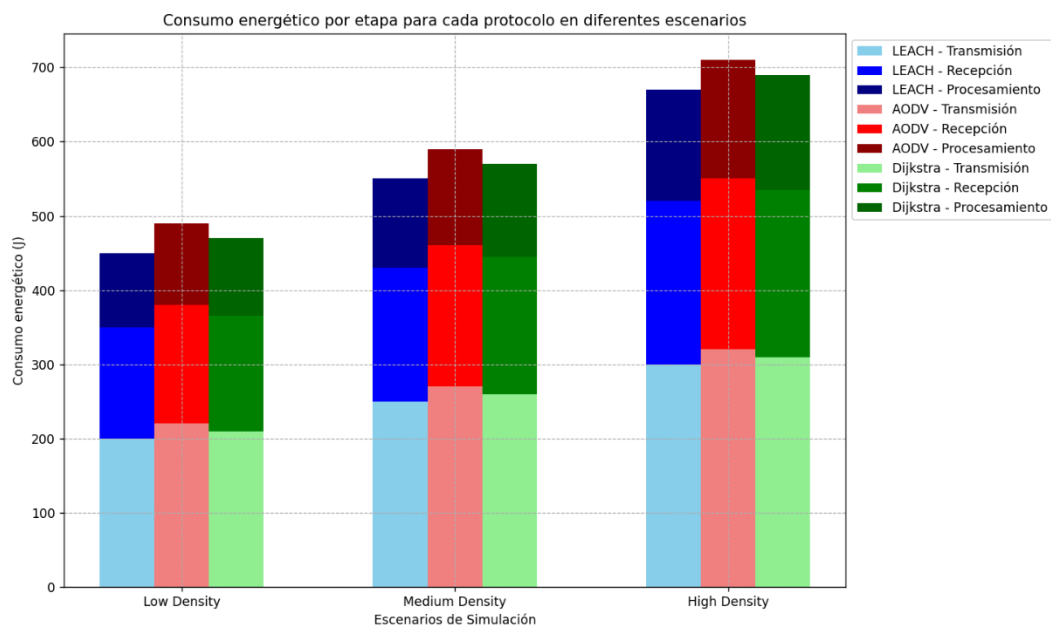
El rendimiento de la red no sólo depende de la densidad, sino también del nivel de tráfico y de la movilidad de los nodos. Una variación de estos factores evidencia cómo se adapta cada protocolo a los cambios en las condiciones de la red.

1. LEACH prolonga la vida de la red de forma estable en diferentes escenarios de tráfico y movilidad, aunque la movilidad disminuye la eficiencia debido a la complejidad que añade la gestión de clústeres.
2. AODV sufre una reducción de la vida útil de la red en escenarios de mucho tráfico y movilidad. En cambio, su naturaleza reactiva no le permite adaptarse a los frecuentes cambios de topología, por lo que aumenta el consumo de energía.
3. Dijkstra muestra una moderada resistencia a la movilidad, pero su rendimiento es mejor en condiciones estáticas, donde la estabilidad de la ruta mejora la eficiencia energética.

3.4.6. Consumo energético por etapas operativas

En la Figura 3.10 se muestra el consumo energético por etapa operativa de cada protocolo, donde se aprecia el uso equilibrado de energía de LEACH, el mayor gasto de AODV en la recepción y procesamiento, y los costes computacionales de Dijkstra.

Figura 3. 10: Resultados obtenidos del consumo energético en diferentes etapas para cada protocolo (LEACH, AODV, Dijkstra) en escenarios de baja, media y alta densidad.



Elaborado por el autor usando el software Visual Studio Code.

La distribución del consumo energético en las etapas de transmisión, recepción y procesamiento permite una comprensión más profunda de la forma en que cada protocolo asigna los recursos energéticos.

1. LEACH tiene una distribución equilibrada de energía en todas las etapas, siendo la transmisión la que más energía consume. Por su parte, las etapas de recepción y procesamiento consumen menos energía, lo que demuestra la eficiencia energética general de LEACH.
2. AODV consume más energía en las etapas de recepción y procesamiento de datos como consecuencia de la sobrecarga que supone el descubrimiento de rutas.
3. Dijkstra tiene un consumo moderado en todas las etapas, pero sus requisitos de procesamiento son más altos debido al mantenimiento de tablas de enrutamiento óptimas.

CONCLUSIONES

1. En la discusión de los resultados obtenidos con relación a la eficiencia energética de los protocolos jerárquicos evaluados, se pudo observar que el protocolo LEACH, presenta el consumo energético más bajo en comparación con los otros protocolos AODV y Dijkstra que fueron modeladas en una red de sensores inalámbricos (WSN) y configuradas con una densidad de tráfico baja, media y alta. Además, LEACH aparte de organizar los nodos en clústeres (agrupación) y reducir las comunicaciones con la BS, también reduce el consumo energético total de la red.
2. En el caso del retardo en la red, el algoritmo AODV logró el menor tiempo de latencia en comparación con LEACH y Dijkstra en un escenario dinámico y de alta densidad de tráfico, con lo cual es apropiado en aplicaciones de WSN que transmitan datos en tiempo real. Pero, el algoritmo de enrutamiento Dijkstra a pesar de detectar rutas fácilmente en un escenario de rutas estáticas, lo que limita su adaptabilidad en WSNs dinámicas.
3. Para la métrica de la tasa de entrega de paquetes (PDR) todo los tres protocolos evaluados obtuvieron los mismos resultados, es decir, que tuvieron una PDR alta continuamente, independientemente de la densidad de tráfico. Aunque, el protocolo que logro tener PDR estable y con un consumo energético bajo fue LEACH, lo que es útil especialmente en redes que priorizan la eficiencia.

RECOMENDACIONES

1. Los estudios posteriores tendrán que abordar el diseño de protocolos híbridos basados en los atributos de LEACH, AODV y Dijkstra. De esta manera se podría crear una solución más adaptable, que gestione eficientemente las condiciones estáticas y dinámicas de la red y establezca un equilibrio óptimo entre el consumo energético y el tiempo de latencia.
2. Exploración de algoritmos adaptativos: La integración de modelos de aprendizaje automático para predecir el comportamiento de los nodos podría ajustar dinámicamente las operaciones del protocolo, optimizando aún más el uso de energía y mejorando la resistencia de la red.
3. Pruebas en el mundo real: Aunque las simulaciones ofrecen ideas, se recomiendan las pruebas de campo para validar los protocolos en condiciones realistas, teniendo en cuenta los factores ambientales que afectan al rendimiento de las WSN.

REFERENCIAS

- Agarwal, V., Tapaswi, S., & Chanak, P. (2021). A Survey on Path Planning Techniques for Mobile Sink in IoT-Enabled Wireless Sensor Networks. *Wireless Personal Communications*, 119(1), 211–238. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08204-w>
- Alameri, I., Komarkova, J., Al-Hadhrami, T., Yahya, A. E., & Gharbi, A. (2024). Optimizing Connections: Applied Shortest Path Algorithms for MANETs. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 141(1), 787–807. <https://doi.org/10.32604/cmes.2024.052107>
- Ali, A., Ming, Y., Chakraborty, S., & Iram, S. (2017). A Comprehensive Survey on Real-Time Applications of WSN. *Future Internet*, 9(4), 77. <https://doi.org/10.3390/fi9040077>
- 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>
- Amutha, J., Sharma, S., & Nagar, J. (2020). WSN Strategies Based on Sensors, Deployment, Sensing Models, Coverage and Energy Efficiency: Review, Approaches and Open Issues. *Wireless Personal Communications*, 111(2), 1089–1115. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06903-z>
- Baidya, S. S., & Bhattacharyya, C. K. (2012). Coverage and connectivity in Wireless Sensor Networks: Their trade-offs. *2012 Sixth International Conference on Sensing Technology (ICST)*, 353–358. <https://doi.org/10.1109/ICSensT.2012.6461700>
- Banerjee, I., Warnier, M., & Brazier, F. M. T. (2020). Self-organizing topology for energy-efficient ad-hoc communication networks of mobile devices. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 8(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s40294-020-00073-7>

- Behera, T. M., Samal, U. C., Mohapatra, S. K., Khan, M. S., Appasani, B., Bizon, N., & Thounthong, P. (2022). Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: Architectures, Strategies, and Performance. *Electronics*, 11(15), 2282. <https://doi.org/10.3390/electronics11152282>
- Ben Yagouta, A., Ben Gouissem, B., Mnasri, S., Alghamdi, M., Alrashidi, M., Alrowaily, M. A., Alkhazi, I., Gantassi, R., & Hasnaoui, S. (2023). Multiple Mobile Sinks for Quality of Service Improvement in Large-Scale Wireless Sensor Networks. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23(20), 8534. <https://doi.org/10.3390/s23208534>
- BenSaleh, M. S., Saida, R., Kacem, Y. H., & Abid, M. (2020). Wireless Sensor Network Design Methodologies: A Survey. *Journal of Sensors*, 2020, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2020/9592836>
- Cao, Y., & Pan, H. (2020). Energy-Efficient Cooperative Spectrum Sensing Strategy for Cognitive Wireless Sensor Networks Based on Particle Swarm Optimization. *IEEE Access*, 8, 214707–214715. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037707>
- Castro Correa, J. A., Sepúlveda Mora, S. B., Medina Delgado, B., Escobar Amado, C. D., & Guevara Ibarra, D. (2022). A forest fire monitoring and detection system based on wireless sensor networks. *Scientia et Technica*, 27(2), 89–96. <https://doi.org/10.22517/23447214.24784>
- Dai, K., Zhang, C., Li, Q., Huang, X., & Zhang, H. (2021). An Adaptive Energy Management Strategy for Simultaneous Long Life and High Wake-Up Success Rate of Wireless Sensor Network Nodes. *Energy Technology*, 9(10), 2100522. <https://doi.org/10.1002/ente.202100522>
- Djedouboum, A. C., Abba Ari, A. A., Gueroui, A. M., Mohamadou, A., & Aliouat, Z. (2018). Big Data Collection in Large-Scale Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 18(12), 4474. <https://doi.org/10.3390/s18124474>
- Drougas, Y., & Kalogeraki, V. (2007). Distributed, Reliable Restoration Techniques using Wireless Sensor Devices. *2007 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/IPDPS.2007.370262>

- Durgam, T., & Sadiwala, D. R. (2021). Energy Efficient Key for Heterogeneous WSN-IoT. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 12.
- Elhoseny, M., Rajan, R. S., Hammoudeh, M., Shankar, K., & Aldabbas, O. (2020). Swarm intelligence-based energy efficient clustering with multihop routing protocol for sustainable wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 16(9), 155014772094913. <https://doi.org/10.1177/1550147720949133>
- Estrada-Jimenez, L. A., Pulikottil, T., Nikghadam-Hojjati, S., & Barata, J. (2023). Self-Organization in Smart Manufacturing—Background, Systematic Review, Challenges and Outlook. *IEEE Access*, 11, 10107–10136. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3240433>
- Evangelakos, E. A., Kandris, D., Rountos, D., Tselikis, G., & Anastasiadis, E. (2022). Energy Sustainability in Wireless Sensor Networks: An Analytical Survey. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 12(4), 65. <https://doi.org/10.3390/jlpea12040065>
- Feng, Y., Zhang, B., Chai, S., Cui, L., & Li, Q. (2017). An optimized AODV protocol based on clustering for WSNs. *2017 6th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, 410–414. <https://doi.org/10.1109/ICCSNT.2017.8343729>
- Habib, S. J., & Marimuthu, P. N. (2020). Development of Trustworthy Self-adaptive Framework for Wireless Sensor Networks. En Á. Rocha, H. Adeli, L. P. Reis, S. Costanzo, I. Orovic, & F. Moreira (Eds.), *Trends and Innovations in Information Systems and Technologies* (Vol. 1160, pp. 368–378). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45691-7_34
- Haque, M. E., & Baroudi, U. (2020). Dynamic energy efficient routing protocol in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 26(5), 3715–3733. <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02290-7>
- Hidalgo-Leon, R., Urquizo, J., Silva, C. E., Silva-Leon, J., Wu, J., Singh, P., & Soriano, G. (2022). Powering nodes of wireless sensor networks with energy harvesters for

- intelligent buildings: A review. *Energy Reports*, 8, 3809–3826.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.280>
- Illes, C., Vasar, C., & Filip, I. (2016). Energy Performance Optimization of Wireless Sensor Networks. En V. E. Balas, L. C. Jain, & B. Kovačević (Eds.), *Soft Computing Applications* (Vol. 356, pp. 563–572). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18296-4_44
- Jaber, G., & Kacimi, R. (2020). A collaborative caching strategy for content-centric enabled wireless sensor networks. *Computer Communications*, 159, 60–70.
<https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.05.018>
- Kamruzzaman, M. M., & Alruwaili, O. (2022). Energy efficient sustainable Wireless Body Area Network design using network optimization with Smart Grid and Renewable Energy Systems. *Energy Reports*, 8, 3780–3788.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.006>
- Kandris, D., Nakas, C., Vomvas, D., & Koulouras, G. (2020). Applications of Wireless Sensor Networks: An Up-to-Date Survey. *Applied System Innovation*, 3(1), 14.
<https://doi.org/10.3390/asi3010014>
- Kannaujaiya, D., & Dwivedi, A. K. (2023). Challenges Issue and Application of Wireless Sensor Networks: A Systematic Literature Review. *2023 International Conference on IoT, Communication and Automation Technology (ICICAT)*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/ICICAT57735.2023.10263699>
- Kanoun, O., Bradai, S., Khriji, S., Bouattour, G., El Houssaini, D., Ben Ammar, M., Naifar, S., Bouhamed, A., Derbel, F., & Viehweger, C. (2021). Energy-Aware System Design for Autonomous Wireless Sensor Nodes: A Comprehensive Review. *Sensors*, 21(2), 548. <https://doi.org/10.3390/s21020548>
- Kanoun, O., Khriji, S., Naifar, S., Bradai, S., Bouattour, G., Bouhamed, A., El Houssaini, D., & Viehweger, C. (2021). Prospects of Wireless Energy-Aware Sensors for Smart Factories in the Industry 4.0 Era. *Electronics*, 10(23), 2929.
<https://doi.org/10.3390/electronics10232929>
- Karunanithy, K., & Velusamy, B. (2020). Cluster-tree based energy efficient data gathering protocol for industrial automation using WSNs and IoT. *Journal of*

- Industrial Information Integration*, 19, 100156.
<https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100156>
- Karunanithy, K., & Velusamy, B. (2021). Directional antenna based node localization and reliable data collection mechanism using local sink for wireless sensor networks. *Journal of Industrial Information Integration*, 24, 100222.
<https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100222>
- Ketshabetswe, L. K., Zungeru, A. M., Mangwala, M., Chuma, J. M., & Sigweni, B. (2019). Communication protocols for wireless sensor networks: A survey and comparison. *Heliyon*, 5(5), e01591.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01591>
- Khujamatov, H., Pitchai, M., Shamsiev, A., Mukhamadiyev, A., & Cho, J. (2024). Clustered Routing Using Chaotic Genetic Algorithm with Grey Wolf Optimization to Enhance Energy Efficiency in Sensor Networks. *Sensors*, 24(13), 4406. <https://doi.org/10.3390/s24134406>
- Kochhar, A., Kaur, P., Singh, P., & Sharma, S. (2018). Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 1(2018), 77–87. <https://doi.org/10.26636/jtit.2018.117417>
- Leelakrishnan, S., & Chakrapani, A. (2024). Power Optimization in Wireless Sensor Network Using VLSI Technique on FPGA Platform. *Neural Processing Letters*, 56(2), 125. <https://doi.org/10.1007/s11063-024-11495-2>
- Lusiani, A., Purwaningsih, S. S., & Sartika, E. (2023). *Dijkstra Algorithm in determining the shortest route for delivery service by J&T express in Bandung*. 4(2), 940–948.
<https://doi.org/10.46306/lb.v4i2.337>
- Lv, Y., Liu, Y., & Hua, J. (2019). A Study on the Application of WSN Positioning Technology to Unattended Areas. *IEEE Access*, 7, 38085–38099.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903820>
- Maroof, N. M., & Waheed, M. A. (2022). Autonomous Scheduling and Distributed Graph Routing Algorithm (ASDGRA) for Hybrid Wireless Sensor Networks. En G. Ranganathan, X. Fernando, & F. Shi (Eds.), *Inventive Communication and*

- Computational Technologies* (Vol. 311, pp. 189–209). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5529-6_15
- Nakas, C., Kandris, D., & Visvardis, G. (2020). Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey. *Algorithms*, 13(3), 72. <https://doi.org/10.3390/a13030072>
- Nguyen, P. D., & Kim, L. (2021). Sensor System: A Survey of Sensor Type, Ad Hoc Network Topology and Energy Harvesting Techniques. *Electronics*, 10(2), 219. <https://doi.org/10.3390/electronics10020219>
- Oliveira, T. E., Reis, J. R., & Caldeirinha, R. F. S. (2022). Implementation of a WSN for Environmental Monitoring: From the Base Station to the Small Sensor Node. *Sensors*, 22(20), 7976. <https://doi.org/10.3390/s22207976>
- Ospina, J. P., Sánchez, J. F., Ortiz, J. E., Collazos-Morales, C., & Ariza-Colpas, P. (2020). Socially and Biologically Inspired Computing for Self-organizing Communications Networks. En S. Boumerdassi, É. Renault, & P. Mühlethaler (Eds.), *Machine Learning for Networking* (Vol. 12081, pp. 461–484). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45778-5_32
- Prakash, N., Rajalakshmi, M., & Nedunchezian, R. (2020). Analysis of QoS for Conveying Authorisation Based on Internet of Things (IoT) in Wireless Sensor Networks (WSN). *2020 7th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/ICSSS49621.2020.9202338>
- Prasad, V. K. H., & Periyasamy, S. (2023). Energy Optimization-Based Clustering Protocols in Wireless Sensor Networks and Internet of Things-Survey. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2023, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2023/1362417>
- Prasanth, A., & Jayachitra, S. (2020). A novel multi-objective optimization strategy for enhancing quality of service in IoT-enabled WSN applications. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 13(6), 1905–1920. <https://doi.org/10.1007/s12083-020-00945-y>

- Rahman, G. M. E., & Wahid, K. A. (2020). LDAP: Lightweight Dynamic Auto-Reconfigurable Protocol in an IoT-Enabled WSN for Wide-Area Remote Monitoring. *Remote Sensing*, 12(19), 3131. <https://doi.org/10.3390/rs12193131>
- 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>
- Sachan, S., Sharma, R., & Sehgal, A. (2021). Energy efficient scheme for better connectivity in sustainable mobile wireless sensor networks. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 30, 100504. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100504>
- Salih, K. O. M., Rashid, T. A., Radovanovic, D., & Bacanin, N. (2022). A Comprehensive Survey on the Internet of Things with the Industrial Marketplace. *Sensors*, 22(3), 730. <https://doi.org/10.3390/s22030730>
- Senouci, M. R., & Mellouk, A. (2016). Wireless Sensor Networks. En *Deploying Wireless Sensor Networks* (pp. 1–19). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-099-7.50001-5>
- Senthil, G. A., Raaza, A., & Kumar, N. (2022). Internet of Things Energy Efficient Cluster-Based Routing Using Hybrid Particle Swarm Optimization for Wireless Sensor Network. *Wireless Personal Communications*, 122(3), 2603–2619. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-09015-9>
- Shakeri, M., Sadeghi-Niaraki, A., Choi, S.-M., & Islam, S. M. R. (2020). Performance Analysis of IoT-Based Health and Environment WSN Deployment. *Sensors*, 20(20), 5923. <https://doi.org/10.3390/s20205923>
- Sharma, B., & Vaid, R. (2022). A Comprehensive Study on Vulnerabilities and Attacks in Multicast Routing Over Mobile Ad hoc Network. En K. Khanna, V. V. Estrela, & J. J. P. C. Rodrigues (Eds.), *Cyber Security and Digital Forensics* (Vol. 73, pp. 253–264). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3961-6_22
- Singh, O., Rishiwal, V., Chaudhry, R., & Yadav, M. (2021). Multi-Objective Optimization in WSN: Opportunities and Challenges. *Wireless Personal Communications*, 121(1), 127–152. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08627-5>

- Srinivasan, S., Vinmathi, M. S., Sivaraj, S. N., Karthikayen, A., Alakesan, C., & Preetha, M. (2024). A Novel Approach Integrating IoT and WSN with Predictive Modeling and Optimization for Enhancing Efficiency and Sustainability in Smart Cities—ProQuest. *Journal of Electrical Systems*, 20(4), 2228–2237.
- Suresh, S., Prabhu, V., Parthasarathy, V., Boddu, R., Sucharitha, Y., & Teshite, G. (2022). A Novel Routing Protocol for Low-Energy Wireless Sensor Networks. *Journal of Sensors*, 2022, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2022/8244176>
- Tang, L., Lu, Z., & Fan, B. (2020). Energy Efficient and Reliable Routing Algorithm for Wireless Sensors Networks. *Applied Sciences*, 10(5), 1885. <https://doi.org/10.3390/app10051885>
- Vikash, Mishra, L., & Varma, S. (2021). Middleware Technologies for Smart Wireless Sensor Networks towards Internet of Things: A Comparative Review. *Wireless Personal Communications*, 116(3), 1539–1574. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07748-7>
- Wang, T., Bhuiyan, M. Z. A., Wang, G., Rahman, Md. A., Wu, J., & Cao, J. (2018). Big Data Reduction for a Smart City's Critical Infrastructural Health Monitoring. *IEEE Communications Magazine*, 56(3), 128–133. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700303>
- Wang, Z., Ding, H., Li, B., Bao, L., & Yang, Z. (2020). An Energy Efficient Routing Protocol Based on Improved Artificial Bee Colony Algorithm for Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*, 8, 133577–133596. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010313>
- Yadav, A. S., Khushboo, K., Singh, V. K., & Kushwaha, D. S. (2020). Increasing Efficiency of Sensor Nodes by Clustering in Section Based Hybrid Routing Protocol with Artificial Bee Colony. *Procedia Computer Science*, 171, 887–896. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.096>
- Yao, X., Li, S., Yao, Y., & Xie, X. (2018). Health Monitoring and Diagnosis of Equipment Based on Multi-sensor Fusion. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, 14(04), 4–19. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v14i04.8315>

- Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12), 2292–2330. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002>
- Yin, H., Yang, H., & Shahmoradi, S. (2022). EATMR: An energy-aware trust algorithm based the AODV protocol and multi-path routing approach in wireless sensor networks. *Telecommunication Systems*, 81(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11235-022-00915-0>
- Zagrouba, R., & Kardi, A. (2021). Comparative Study of Energy Efficient Routing Techniques in Wireless Sensor Networks. *Information*, 12(1), 42. <https://doi.org/10.3390/info12010042>
- Zhang, Y., Ren, Q., Song, K., Liu, Y., Zhang, T., & Qian, Y. (2022). An Energy-Efficient Multilevel Secure Routing Protocol in IoT Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(13), 10539–10553. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3121529>