



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Evaluación del rendimiento de técnicas de enrutamiento en redes de
sensores inalámbricos**

AUTOR:

Ing. Pérez Baque, Fabricio Xavier

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de

MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Pérez Baque, Fabricio Xavier** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 24 de septiembre del 2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Pérez Baque, Fabricio Xavier**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación: “**Evaluación del rendimiento de técnicas de enrutamiento en redes de sensores inalámbricos**”, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del trabajo de titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 24 de septiembre del 2019

EL AUTOR

Pérez Baque, Fabricio Xavier



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Pérez Baque, Fabricio Xavier**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Maestría titulada: **“Evaluación del rendimiento de técnicas de enrutamiento en redes de sensores inalámbricos”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 24 de septiembre del 2019

EL AUTOR

Pérez Baque, Fabricio Xavier

REPORTE DE URKUND

The screenshot shows the URKUND interface. On the left, document details are displayed: 'Documento: Fabricio_Perez.docx (D54946988)', 'Presentado: 2019-08-21 16:00 (-05:00)', 'Presentado por: fernandopm23@hotmail.com', 'Recibido: edwin.palacios.ucsg@analysts.orkund.com', and 'Mensaje: Revisión Final Fabricio Pérez. 1% de estas 25 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.' On the right, a 'Lista de fuentes' table lists sources with columns for 'Categoria', 'Enla', and 'Bloques'. The sources include 'TESIS ARMANDO ESPARZA V4.docx', 'a Formato Complexivo_FINAL_2017 (bryan) (1) (1).docx', 'a Formato Complexivo_FINAL_2017 (bryan) (1) (1).docx', 'DEVY_MORA.docx', and two DOI links. At the bottom, there is a navigation bar with icons for back, forward, and search, along with buttons for '1 Advertencias...', 'Reiniciar', 'Exportar', and 'Compartir'.

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

TEMA: Evaluación del rendimiento de técnicas de enrutamiento en redes de sensores Inalámbricos

AUTOR: Ing. Pérez Baque, Fabricio Xavier

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

TUTOR: M. Sc.

Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

20 de Julio del 2019

Agradecimientos

El presente trabajo está dedicada a las personas a las que les debo quien soy como persona y profesional, mis dos madres la Ab, Nancy Baque Franco y la Dra. Martha Muñoz Peñafiel que sin su dirección respaldo y consejos no habría cumplido con esta meta ni las anteriormente alcanzadas.

También es dedicado a mi hermana Martha Baque Muñoz quien siempre ha sido mi ejemplo a seguir en lo profesional y educativo.

Mi hija Doménica Pérez del Hierro a quien le queda una meta más alta para cumplir, ya que debe superar lo que he logrado.

Pérez Baque, Fabricio Xavier

Dedicatoria

Mi total agradecimiento a quienes conformaron el grupo de catedráticos de la Maestría en Telecomunicaciones y muy especialmente a dos profesores, al director de la Maestría, M. Sc. Manuel Romero Paz, y a mi tutor M. Sc. Fernando Palacios Meléndez de quienes tengo los mejores recuerdos y apoyo durante esta meta culminada.

Pérez Baque, Fabricio Xavier



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
TUTOR

f. _____

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
REVISOR

f. _____

M. Sc. ZAMORA CEDEÑO, NESTOR ARMANDO
REVISOR

f. _____

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

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| Índice de Figuras | XI |
| Índice de Tablas..... | XIII |
| Resumen | XIV |
| Abstract..... | XV |
| Capítulo 1: Descripción del proyecto de intervención | 2 |
| 1.1. Introducción..... | 2 |
| 1.2. Antecedentes del problema a investigar. | 3 |
| 1.3. Definición del problema. | 4 |
| 1.4. Justificación del problema. | 4 |
| 1.5. Objetivos. | 4 |
| 1.5.1. Objetivo general..... | 4 |
| 1.5.2. Objetivos específicos..... | 4 |
| 1.6. Hipótesis..... | 5 |
| 1.7. Metodología de investigación. | 5 |
| Capítulo 2: Fundamentación Teórico de RF y Telemetría. | 6 |
| 2.1. Visión general de WSN. | 6 |
| 2.2. Aplicaciones de las redes de sensores inalámbricos. | 7 |
| 2.2.1. Sistemas de monitoreo ambiental..... | 8 |
| 2.2.2. Sistemas de monitoreo del cuerpo humano. | 9 |
| 2.2.3. Sistema de edificios inteligentes..... | 10 |
| 2.3. Limitaciones, requisitos y desafíos de las redes inalámbricas de sensores..... | 10 |
| 2.4. Métricas de calidad de enlace en redes inalámbricas de sensores.... | 12 |
| Capítulo 3: Simulación y resultados obtenidos de enrutamiento basado en ciclos de servicio dinámico y eficiencia de energía | 14 |
| 3.1. Descripción general del trabajo. | 14 |
| 3.2. Ajuste del ciclo de trabajo dinámico basado en un conjunto de promotores de bajo consumo de energía..... | 15 |

| | |
|---|----|
| 3.2.1. Protocolo XMAC..... | 16 |
| 3.2.2. Enrutamiento geográfico basado en conjunto de reenviadores..... | 17 |
| 3.2.3. Técnica de eficiencia energética de ciclo de trabajo dinámico..... | 20 |
| 3.3. Selección adaptativa de sumidero (sink) usando un ciclo de trabajo dinámico basado en un conjunto de reenviadores..... | 22 |
| 3.4. Análisis de resultados obtenidos..... | 28 |
| 3.4.1. Entorno de simulación..... | 28 |
| 3.5. Resultados del ciclo de trabajo dinámico basado en el conjunto de reenviadores..... | 29 |
| 3.5.1. Vida útil de la red..... | 31 |
| 3.5.2. Retardo o Delay..... | 35 |
| 3.5.3. Energía remanente de los nodos sensores..... | 36 |
| 3.5.4. Casos de selección de fuente..... | 39 |
| 3.6. Resultados para la selección de sumidero adaptativo en redes de sensores inalámbricos de múltiples sumideros..... | 41 |
| 3.6.1. Escenarios de fallo de nodos..... | 42 |
| 3.6.2. Rendimiento..... | 43 |
| 3.6.3. Retardo..... | 44 |
| Conclusiones..... | 47 |
| Recomendaciones..... | 48 |
| Bibliografía..... | 49 |

Índice de Figuras

Capítulo 2:

| | |
|---|---|
| Figura 2. 1: Visión general de una red de sensores inalámbricos mediante enrutamiento de agrupación. | 7 |
| Figura 2. 2: Ejemplo de aplicación de un entorno de monitoreo de humedad utilizando una WSN. | 8 |
| Figura 2. 3: Ejemplo de aplicación de un entorno de monitoreo del cuerpo humano utilizando una WSN..... | 9 |

Capítulo 3:

| | |
|---|----|
| Figura 3. 1: Uso de preámbulos cortos en XMAC..... | 16 |
| Figura 3. 2: Reenvío geográfico y XMAC..... | 19 |
| Figura 3. 3: Actualización de los conjuntos de reenviadores – I. | 26 |
| Figura 3. 4: Actualización de los conjuntos de reenviadores – II. | 27 |
| Figura 3. 5: Configuración de la topología de cuadrícula. | 30 |
| Figura 3. 6: Duración de la red utilizando la técnica de ciclo de servicio constante. | 32 |
| Figura 3. 7: Duración de la red utilizando la técnica basada en el grado del nodo..... | 33 |
| Figura 3. 8: Duración de la red utilizando la técnica basada en el conjunto de reenviadores. | 34 |
| Figura 3. 9: Gráfica del retardo de las tres técnicas basado en: ciclo de trabajo constante, grado del nodo y conjunto de reenviadores..... | 36 |
| Figura 3. 10: Energía restante de cada nodo utilizando la técnica de ciclo de servicio constante. | 37 |
| Figura 3. 11: Energía restante de cada nodo utilizando la técnica de ciclo de trabajo dinámico basado en el grado de nodo. | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura 3. 12: Energía restante de cada nodo utilizando la técnica de ciclo de trabajo dinámico basado en el conjunto de reenviadores. | 39 |
| Figura 3. 13: Realización de técnicas bajo diversos casos de selección de fuentes. | 40 |
| Figura 3. 14: Topología de rejilla multi-sumidero. | 41 |
| Figura 3. 15: Escenarios de fallo de nodo..... | 43 |
| Figura 3. 16: Rendimiento obtenido por técnica propuesta y reenvío geográfico. | 44 |
| Figura 3. 17: Las regiones virtuales son creadas por los sumideros. | 45 |
| Figura 3. 18: Retraso obtenido por la técnica propuesta para regiones virtuales. | 46 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 3. 1: Valores de XMAC empleados..... | 29 |
| Tabla 3. 2: Consumo energético de los nodos de TelosB..... | 29 |

Resumen

El presente trabajo consistió en realizar la evaluación del rendimiento de técnicas de enrutamiento en redes de sensores inalámbricos (WSN). Las WSNs son la tecnología que más se investiga en la actualidad, para lo cual se realizó la búsqueda de información y se encontraron una variedad de trabajos investigativos publicados en repositorios digitales (tesis de pregrado y posgrado) y en revistas científicas. A partir de esto, se procedió a investigar sobre los beneficios de una WSN y entre tantos, se analizó el consumo de energía en las WSNs. Inicialmente, el trabajo se define el problema a investigar, así como el objetivo general, objetivos específicos y la hipótesis. También, se realizó una breve descripción de los fundamentos teóricos de las redes inalámbricas, como visión general, diversas aplicaciones de WSNs, limitaciones, requisitos, desafíos y de las métricas de calidad en WSNs. Finalmente, se propusieron dos técnicas basadas en enrutamiento para evaluar el rendimiento de una WSN.

Palabras claves: MÉTRICAS, RENDIMIENTO, SENSORES, WSN, ENRUTAMIENTO, TÉCNICAS.

Abstract

The present work consisted of performing the performance evaluation of routing techniques in wireless sensor networks (WSN). The WSNs are the most researched technology at present, for which the information search was carried out and a variety of research papers published in digital repositories (undergraduate and postgraduate thesis) and in scientific journals were found. From this, we proceeded to investigate the benefits of a WSN and among many, the consumption of energy in the WSNs was analyzed. Initially, the work defines the problem to investigate, as well as the general objective, specific objectives and the hypothesis. Also, a brief description was made of the theoretical foundations of wireless networks, as an overview, various WSN applications, limitations, requirements, challenges and quality metrics in WSNs. Finally, two routing-based techniques were proposed to evaluate the performance of a WSN.

Keywords: METRICS, PERFORMANCE, SENSORS, WSN, ROUTING, TECHNIQUES.

Capítulo 1: Descripción del proyecto de intervención

1.1. Introducción

Desde el comienzo del tercer milenio, las redes inalámbricas de sensores (*Wireless Sensor Network, WSN*) generaron un creciente interés desde las perspectivas industriales y de investigación (Elhabyan, Shi, & St-Hilaire, 2019). Una WSN puede describirse generalmente como una red de nodos que detectan y pueden controlar cooperativamente el entorno que permite la interacción entre personas o computadoras y el entorno circundante. (Verdone, 2008)

Por un lado, las WSNs permiten nuevas aplicaciones y, por lo tanto, nuevos mercados posibles, por otro lado, el diseño se ve afectado por varias restricciones que requieren nuevos paradigmas. De hecho, la actividad de detección, procesamiento y comunicación bajo una cantidad limitada de energía enciende un enfoque de diseño de capas cruzadas que generalmente requiere la consideración conjunta de procesamiento distribuido de señales/datos, control de acceso medio y protocolos de comunicación.

Una red de sensores es una colección de un gran número de nodos de sensores inalámbricos que están dispersos espacialmente en un campo sensor. Los nodos sensores actúan como generadores de datos y relés de red, y pueden detectar (medir), procesar datos y comunicarse con otros nodos sensores. Los usuarios finales de los datos o los administradores pueden hacer observaciones y responder a eventos en un entorno particular. (Akkaya & Younis, 2005)

El progreso en las tecnologías modernas ha motivado el diseño de pequeños dispositivos electrónicos de sensores de baja potencia. Normalmente, un número considerable de estos sensores se implementa en áreas remotas en forma de una red inalámbrica de nodos para medir diferentes valores físicos. Este tipo de escenarios de red se denominan redes de sensores inalámbricos (WSN). Las WSNs son útiles en numerosas

aplicaciones industriales. Por ejemplo, las WSNs encuentran uso en aplicaciones de monitoreo ambiental y manejo de desastres tales como detección de incendios forestales, detección de deslizamientos de tierra y detección de contaminación del aire.

En el reconocimiento inteligente de vigilancia y defensa, las WSNs se utilizan en aplicaciones como la conciencia distribuida de la situación y las consultas geográficas dirigidas. Además, las WSNs se han utilizado ampliamente en actividades de monitoreo de la atención médica, como desastres de víctimas masivas, detección de cáncer y medición de glucosa en sangre. En estas y muchas otras aplicaciones, la tecnología WSN proporciona diferentes ventajas (como facilidad de implementación, menor costo de implementación, precisión, escalabilidad) en comparación con las soluciones de red tradicionales. (Yi et al., 2015)

1.2. Antecedentes del problema a investigar.

La etapa inicial del trabajo consistió en revisar información relacionada con los protocolos de enrutamiento utilizados en WSNs. Para lo cual se encontraron varios artículos publicados en revistas de alto impacto. Entre las más destacadas y que sirvieron para el presente trabajo son:

1. El artículo realizado por (Yang, Deng, & Liu, 2015) trata de una descripción general de los protocolos de enrutamiento en la red inalámbrica de sensores. Este artículo, de acuerdo con la estructura de red en WSN, clasifican a los protocolos de enrutamiento en tres categorías, a saber, protocolo centrado en datos, protocolo de enrutamiento geográfico y protocolo de enrutamiento jerárquico. En este documento se presenta una descripción general de los protocolos de enrutamiento en WSN. Luego, discuten los desafíos de diseño del protocolo de enrutamiento y la investigación en el futuro en WSN desde la perspectiva de las ventajas y desventajas entre cada protocolo de enrutamiento.
2. El artículo realizado por (Goyal & Khandnor, 2017) se encarga de organizar los protocolos de enrutamiento más representativos en dos

categorías: protocolos con el sumidero estático y protocolos con el sumidero móvil. Se enumeran los pros y los contras de las dos categorías. Ellos han presentado una descripción general tabular de diferentes algoritmos de enrutamiento en cada categoría.

3. El artículo realizado por (Ghosh, 2016) ilustra las características fundamentales de WSN seguido de diferentes protocolos de consumo de energía. Aquí realizaron el análisis comparativo de rendimiento de diferentes protocolos de consumo de energía.

1.3. Definición del problema.

Las redes de sensores inalámbricos son en la actualidad el tema de investigación que más emplean científicos, en especial aplicando técnicas de enrutamiento. Por esto surge la necesidad de realizar la evaluación de redes de sensores inalámbricos utilizando la técnica de enrutamiento dinámico.

1.4. Justificación del problema.

Mediante la evaluación de redes de sensores inalámbricos utilizando técnicas de enrutamiento dinámico se pretende modelar la operatividad del algoritmo empleado para enrutar correctamente a una WSN.

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivo general.

Realizar la evaluación de redes de sensores inalámbricos utilizando la técnica de enrutamiento dinámico

1.5.2. Objetivos específicos.

- ✓ Describir los fundamentos teóricos de las redes de sensores inalámbricas.
- ✓ Elaborar los escenarios de simulación de una WSN empleando técnicas de enrutamiento.
- ✓ Evaluar los resultados obtenidos de la WSN utilizando técnicas de enrutamiento dinámico.

1.6. Hipótesis.

Comprobar mediante simulación que las técnicas empleadas para ahorro o eficiencia energética de los nodos sensores que se comunican inalámbricamente.

1.7. Metodología de investigación.

En el presente trabajo se emplea el enfoque cuantitativo, ya que utiliza métricas en las pruebas realizadas durante las evaluaciones de la red de sensores inalámbricos. El diseño de la investigación es descriptivo y exploratorio. Ya que se precisa de los fundamentos teóricos para poder explorar las diferentes técnicas de enrutamiento utilizadas en las redes de sensores inalámbricos.

Capítulo 2: Fundamentación Teórico de RF y Telemetría.

2.1. Visión general de WSN.

Según Bispo, Rosa, & Cunha, (2015) el uso cada vez mayor de redes inalámbricas de sensores (WSN) en numerosas aplicaciones industriales de vigilancia, atención médica y exige mayor confiabilidad en los datos transmitidos. Mientras que para Xu, Shen, & Wang, (2014) los nodos sensores asociados con WSN se comunican entre sí de forma inalámbrica mediante diferentes protocolos y algoritmos. La comunicación confiable y eficiente entre los nodos sensores que transmiten datos importantes sigue siendo un desafío importante en los WSN de próxima generación.

Los nodos de sensores tienen varias limitaciones, como seguridad, agregación de datos, programación de alto nivel, localización, requisitos de middleware, calidad de servicio (QoS), heterogeneidad de las redes de sensores y consumo de energía. Existe una tremenda necesidad de integrar un diseño innovador de middleware basado en la Arquitectura Orientada a Servicios (SOA) con WSN para abordar los desafíos asociados con su confiabilidad y eficiencia.

El enrutamiento es un proceso clave a tener en cuenta en redes de sensores inalámbricos (WSN). Debido al rango de transmisión limitado de cada nodo, puede ser necesario que un nodo sensor use otros nodos sensores que envíen un paquete a su destino, generalmente a una estación base (*Base Station, BS*). La tarea de encontrar y mantener rutas en WSN no es trivial debido a las restricciones de energía y las restricciones de alcance de transmisión. Para minimizar el consumo de energía, los protocolos de enrutamiento propuestos en la literatura para WSN emplean algunas estrategias de enrutamiento bien conocidas, tales como la agrupación (*clustering*).

Los protocolos de agrupación en WSN tienen como objetivo agrupar los nodos sensores en grupos y elegir un cabezal de grupo (*Cluster Head, CH*) para cada grupo. Para realizar un WSN energéticamente eficiente, el CHscan

agrega los datos enviados desde los miembros del clúster y los envía directamente a la BS. Un protocolo de agrupación es principalmente un protocolo de dos capas. La primera capa se utiliza para seleccionar el conjunto óptimo de CH, mientras que la segunda capa es responsable de transmitir los datos a la BS.

La Figura 2.1 muestra la vista generalizada de WSN, que consiste en un BS, CH y nodos sensores (dispositivos) desplegados en una región geográfica. El protocolo de agrupación en WSN no solo debería facilitar la transmisión de datos, sino también considerar las restricciones de los nodos sensores. También debe cumplir con los requisitos de WSN, incluida la eficiencia energética, la confiabilidad de entrega de datos y los requisitos de escalabilidad.

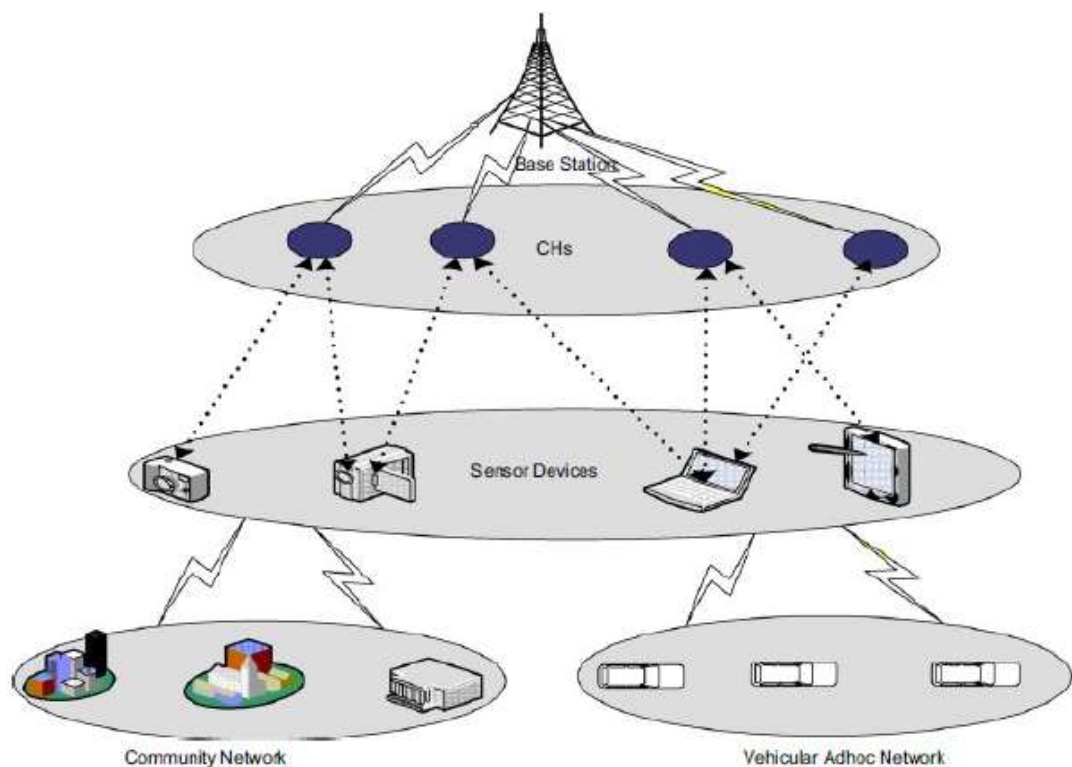


Figura 2. 1: Visión general de una red de sensores inalámbricos mediante enrutamiento de agrupación.

Fuente: (Zheng & Jamalipour, 2009)

2.2. Aplicaciones de las redes de sensores inalámbricos.

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) se están empleando actualmente en una variedad de aplicaciones que van desde médica a militar,

y desde el hogar a la industria. Las posibles aplicaciones de WSN se presentan brevemente en esta sección.

2.2.1. Sistemas de monitoreo ambiental.

La supervisión del entorno ha sido una parte importante de las aplicaciones de WSN. Los sistemas de monitoreo ambiental controlan y monitorean los parámetros ambientales, incluyendo temperatura, humedad (véase en la figura 2.2 un ejemplo de una aplicación usando WSN), luz y presión. Las aplicaciones del monitoreo ambiental han crecido rápidamente en monitoreo agrícola, monitoreo de hábitat, monitoreo de interiores, monitoreo de invernaderos, monitoreo de clima y monitoreo de bosques.

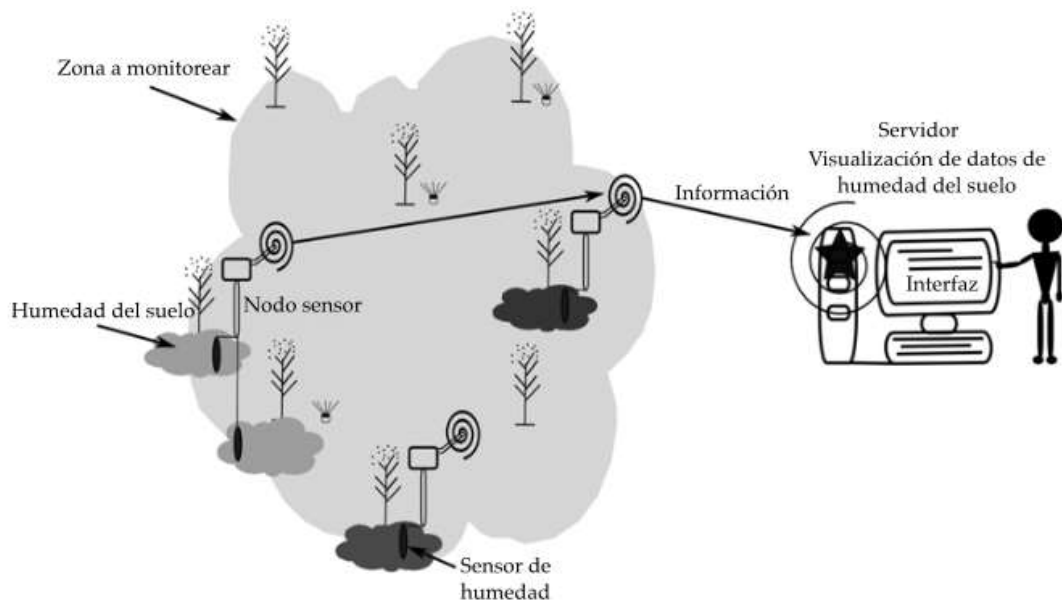


Figura 2. 2: Ejemplo de aplicación de un entorno de monitoreo de humedad utilizando una WSN.

Fuente: (Flores M., Flores G. Francisco, Velasco M., González C., & Jurado Z., 2015)

Existen varios estudios que se centran en aplicaciones de monitoreo del entorno. Los requisitos principales de las aplicaciones de monitoreo ambiental son escalabilidad, cobertura y eficiencia energética. Los sitios monitoreados pueden alcanzar varias decenas de hectáreas, por lo que el número de nodos desplegados varía de docenas a miles. Por esta razón, la escalabilidad es un problema importante cuando se desarrollan protocolos para admitir una gran cantidad de nodos y para garantizar la cobertura total del área controlada.

2.2.2. Sistemas de monitoreo del cuerpo humano.

En los últimos años, ha aumentado el interés por la investigación en el área de los sistemas inalámbricos de salud. El creciente número de personas que envejecen, las personas que necesitan un monitoreo continuo de la salud y el aumento de los costos de la atención médica han desencadenado el concepto de la novedosa tecnología inalámbrica de monitoreo del cuerpo humano.

Las redes inalámbricas de sensores corporales (*Wireless Body Sensor Network, WBSN*) tienen un gran potencial para permitir una amplia variedad de aplicaciones de vida asistida, como el control biofísico/bioquímico humano y el monitoreo de la actividad para el cuidado de la salud, la aptitud física, la detección de emergencias, el reconocimiento emocional de las redes sociales, la seguridad y juegos interactivos. (Díez, Alonso, Castillo, & Alvarez, 2018)

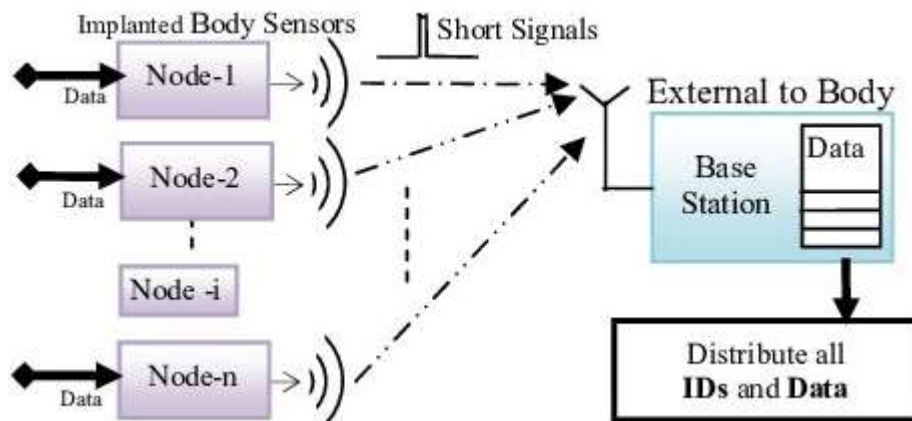


Figura 2. 3: Ejemplo de aplicación de un entorno de monitoreo del cuerpo humano utilizando una WSN.

Fuente: (Forouzandeh, Mohamed, Sawan, & Awwad, 2009)

Los investigadores han realizado varios esfuerzos para utilizar WBSN para el monitoreo del cuerpo humano. El monitoreo del cuerpo humano se realiza utilizando una red de sensores inalámbricos que pueden estar unidos a la superficie del cuerpo o implantados en el tejido corporal. Los desarrollos tecnológicos recientes han producido sensores médicos pequeños e inteligentes que se pueden usar o implantar en el cuerpo humano. Los sensores adquieren los datos y los envían al centro en el que se agregan y analizan los datos.

Las aplicaciones de monitoreo de salud exigen una alta confiabilidad porque involucran la vida de los seres humanos. La eficiencia energética de la red es otro requisito importante para garantizar el funcionamiento a largo plazo del sistema.

2.2.3. Sistema de edificios inteligentes.

Las WSNs se han adaptado recientemente para la automatización de edificios para abordar el creciente costo de la energía y el creciente movimiento ecológico. Los edificios pueden optimizar su consumo de energía, mejorar la seguridad y reducir los gastos operativos mediante el uso de nodos de sensores inteligentes. En la literatura se han propuesto varios sistemas inteligentes de gestión de edificios, que utilizan WSN.

Las WSNs utilizadas en los sistemas inteligentes de gestión de edificios consisten en diferentes tipos de nodos sensores que miden parámetros tales como temperatura, humedad, luz y humo asfixiante. Además, los sistemas pueden incluir actuadores, puertas de enlace, servidores y software de comunicación y aplicación en diferentes niveles, así como diferentes electrodomésticos.

Los sistemas inteligentes de gestión de edificios requieren el uso de la comunicación multihop para cubrir edificios enteros. Se pueden utilizar protocolos jerárquicos o centrados en datos específicos para cumplir este requisito. La eficiencia energética de la red es otro requisito importante para tales sistemas.

2.3. Limitaciones, requisitos y desafíos de las redes inalámbricas de sensores

Las WSNs consisten en una gran cantidad de nodos sensores. Los nodos sensores son dispositivos a pequeña escala que tienen una cantidad muy limitada de energía que pueden almacenar. Por lo tanto, la eficiencia energética es un requisito importante en el diseño de una WSN. Las WSN deberían facilitar la transmisión de datos a la BS y al mismo tiempo considerar

el rango de transmisión limitado de los nodos sensores. La fiabilidad de la entrega de datos es otro requisito importante de los WSN.

La agrupación en clúster permite a los sensores coordinar sus interacciones locales de manera eficiente para lograr objetivos globales, como la escalabilidad y una mayor utilización de los recursos. La escalabilidad se refiere a la capacidad del sistema para realizar un trabajo útil a medida que aumenta el tamaño del sistema. Debido al rango de transmisión limitado de los nodos individuales en relación con la gran área de interés, es posible que se deban desplegar miles de sensores para una tarea determinada. Cualquier esquema de enrutamiento debe ser capaz de funcionar con este gran número de nodos de sensores.

Cualquier mecanismo empleado en una WSN debería poder adaptarse a una amplia gama de tamaños de red. Por lo tanto, la escalabilidad es otro requisito crítico en el diseño del sistema. Para medir el rendimiento de los protocolos propuestos en términos de su escalabilidad, se utiliza el número de métricas de nodos no agrupados. Un mayor número de nodos no agrupados indica un menor rendimiento en términos de escalabilidad del protocolo.

Sin embargo, debido a la naturaleza poco confiable de la comunicación inalámbrica y los recursos limitados de los nodos sensores, estos requisitos plantean desafíos para los investigadores de WSNs. Los principales desafíos para la realización de los WSN pueden resumirse de la siguiente manera:

1. La energía plantea un gran desafío para los diseñadores de WSN.

Dado que los nodos de los sensores funcionan con baterías, tienen una capacidad de energía limitada. Cuando la energía de un sensor alcanza un cierto umbral, se vuelven defectuosos y no pueden funcionar correctamente, lo que afecta el rendimiento general de la red. En consecuencia, los protocolos de enrutamiento diseñados para los sensores deben ser lo más eficientes en cuanto a energía para minimizar el consumo de energía de los nodos y, por lo tanto, prolongar la vida útil de la red.

2. La tarea principal en WSN es la transmisión de datos desde el área objetivo a la BS. Sin embargo, los nodos sensores tienen un rango de transmisión limitado. Además, la calidad del enlace entre los nodos del sensor debe maximizarse para mejorar el rendimiento de la red y, por lo tanto, mejorar la confiabilidad de la entrega de datos de la red. Se deben emplear técnicas de agrupamiento junto con protocolos de enrutamiento de múltiples saltos para lograr este requisito.
3. Las WSNs consisten en un número extremadamente alto de nodos y una densidad de nodo relativamente alta. Puede ser un gran desafío para los diseñadores de WSNs diseñar un protocolo de enrutamiento que sea lo suficientemente escalable como para funcionar con este gran número de nodos de sensores.
4. Encontrar la mejor agrupación y rutas en WSN se ve muy afectado por la métrica de calidad de enlace utilizada. Muchos protocolos de agrupación basados en la calidad de enlace o basados en la ubicación suponen que cada nodo está equipado con hardware de auto localización como un Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Aunque esta es una solución simple y efectiva, el costo resultante hace que tal solución sea ineficiente y poco realista. Para diseñar protocolos realistas, no se deben hacer suposiciones sobre las ubicaciones de los nodos

2.4. Métricas de calidad de enlace en redes inalámbricas de sensores

La estimación de la calidad del enlace en WSNs tiene un impacto fundamental en el rendimiento de la red y afecta el diseño de los protocolos de enrutamiento y agrupamiento. Muchos de los protocolos de enrutamiento y agrupamiento propuestos anteriormente utilizaron la distancia entre dos nodos como una métrica de la calidad de su enlace. Sin embargo, esta solución sufre los siguientes problemas:

1. Para calcular la distancia entre dos nodos, cada nodo debe estar equipado con hardware de auto-localización, como por ejemplo un Sistema de Posicionamiento Global (*Global Position System, GPS*). El costo resultante de conectar un GPS a cada nodo hace que tal solución sea ineficiente y poco realista.

2. La asimetría de enlaces es una característica importante de una WSN. El uso de la distancia entre dos nodos como una métrica de calidad de enlace ignora este hecho y supone que los enlaces son simétricos.
3. Varios estudios han demostrado que la calidad del enlace en una WSN no está necesariamente correlacionada con la distancia.

Otras dos métricas destacadas de calidad de enlace son, el indicador de intensidad de señal recibida (*Received Signal Strength Indicator, RSSI*) y el indicador de calidad de enlace (*Link Quality Indicator, LQI*). Estas métricas son proporcionadas por la mayoría de los chips de sensores inalámbricos. El RSSI es un parámetro que representa la intensidad de la señal observada en el receptor en el momento de la recepción del paquete. El LQI se describe como la caracterización de la fuerza y la calidad de los paquetes recibidos.

Varios estudios demostraron que RSSI puede proporcionar una estimación rápida y precisa de si un enlace es de muy buena calidad. Algunas investigaciones realizaron mediciones empíricas del rendimiento de entrega de paquetes de varias plataformas de sensores. Descubrieron que había una fuerte correlación entre RSSI y la tasa de entrega de paquetes (*Packet Delivery Rate, PDR*). Además, demostraron que si el RSSI de un enlace es -87dBm o más fuerte, está casi completamente configurado para tener un $\text{PDR} \geq 99\%$. Por debajo de este valor, un cambio en el RSSI tan pequeño como 2 dBm puede cambiar un enlace bueno a uno malo y viceversa, lo que significa que el enlace está en la región de transición o desconectada.

Se estudió la simetría de RSSI y LQI en dos direcciones, y se analizó la relación entre RSSI y LQI como métricas de calidad de enlace. Los resultados experimentales mostraron una correlación significativa entre las dos direcciones del enlace en RSSI, pero una correlación débil entre ellas en LQI. Además, las pruebas estadísticas sobre los datos recopilados mostraron una correlación significativa entre RSSI y la distancia en escenarios de corta distancia, lo que hace de RSSI una métrica de calidad de enlace de protocolo de enrutamiento.

Capítulo 3: Simulación y resultados obtenidos de enrutamiento basado en ciclos de servicio dinámico y eficiencia de energía

3.1. Descripción general del trabajo.

El trabajo se puede dividir en dos partes. Los nodos funcionan de forma autoorganizada para adaptarse a los cambios en la WSN. Solo hacen la transmisión de paquetes y hacen algunas estimaciones que se obtienen de sus transmisiones de paquetes. Por cierto, actualizan su ciclo de trabajo o su conjunto de reenviadores de manera distribuida. El objetivo es reducir la sobrecarga de comunicación causada por la comunicación a través de vecinos o receptor. Además, los nodos pueden adoptar los cambios en una WSN con éxito sin el conocimiento global de WSN. No hay sobrecarga de comunicación para la coordinación entre los nodos.

La actualización del ciclo de trabajo basado en las estadísticas del nodo tiene una sobrecarga mucho menor. Si se recopilan estadísticas satisfactorias con precisión, la vida útil de la red y la demora se pueden optimizar en WSNs. Este documento presenta un nuevo esquema de ciclo de servicio dinámico. En el modelo propuesto, los nodos ajustan su ciclo de trabajo basándose en la información compartida con la capa de red y la energía restante de los nodos de manera distribuida.

Como resultado de las evaluaciones, la vida útil de la red se prolonga y se obtiene un balance de energía entre los nodos sensores. Además, el rendimiento de retardo no se degrada significativamente en el modelo de ciclo de trabajo dinámico propuesto. Los nodos sensores son muy sensibles a los efectos ambientales. La probabilidad de falla de los nodos sensores aumenta especialmente en áreas urbanas.

Por lo tanto, las WSNs tolerantes a fallos se vuelven obligatorias para la recuperación. En WSNs, la coordinación entre los nodos no se puede garantizar y se convierte en una tarea complicada. Los nodos de sensores autoorganizados son robustos para la dinámica de la red y tienen capacidad de adaptación a las fallas de los nodos, a las cambiantes condiciones del

tráfico, etc. Para esto se presenta una técnica de reenvío geográfico adaptativo que considera la selección de sumideros en una WSN con múltiples ciclos de trabajo dinámicos.

Los nodos sensores autoorganizados intentan determinar las fallas de los nodos en sus vecinos. Si el nodo sensor autoorganizado siente una falla en sus vecinos que llevan al nodo receptor, intenta enviar sus paquetes mediante el uso de nodos alternativos de manera oportunista. Por lo tanto, el paquete se puede redireccionar a otro sumidero que no tiene orificios de enrutamiento.

Si no se siente ninguna falla, la técnica propuesta funciona como la técnica de reenvío geográfico. Aquí, después de alcanzar el umbral para el retardo por salto, el nodo remitente comienza a sospechar de (sentir) un fallo de nodo y complementa su conjunto de reenvío, que puede contener otros nodos vecinos diferentes de los nodos en su conjunto de reenvío actual. Mediante este enfoque, los paquetes podrían reenviarse a diferentes sumideros que son accesibles desde el nodo remitente.

Como resultado de las simulaciones extensas que utilizan varios escenarios de falla de nodos, se observa que la extensión propuesta a la técnica de reenvío geográfico reduce la tasa de pérdida de paquetes de manera efectiva. Desafortunadamente, el retardo de extremo a extremo aumenta porque la ruta entre el origen y el destino se alarga. Existe una compensación entre el rendimiento de retardo y la pérdida de paquetes.

3.2. Ajuste del ciclo de trabajo dinámico basado en un conjunto de promotores de bajo consumo de energía.

En esta sección se presenta el esquema de ciclo dinámico. En el método, los nodos sensores utilizan las estadísticas de la capa de red y la energía restante para actualizar el ciclo de trabajo. Los nodos no necesitan comunicarse entre sí antes de actualizar sus ciclos de trabajo. Así que se deshacen de la sobrecarga de comunicación. Por lo tanto, la vida útil de la red se prolonga y la eficiencia energética de los nodos mejora. Se definen muchas

métricas de vida útil de la red relacionada con el tiempo de partición de la red, el porcentaje de nodos muertos en la topología, el umbral para la tasa de entrega de paquetes. La vida útil generalmente se define como la hora de la primera falla del nodo sensor. Sin embargo, las WSNs pueden ser capaces de entregar datos para que se hundan después de la primera falla del nodo. Así que se define la vida útil como el tiempo de muerte del nodo que causa una partición de red. Además, se debe tener en cuenta que la demora es otra métrica crítica, especialmente para las aplicaciones de WSN en tiempo real.

Como resultado de las simulaciones extensas que utilizan diversos escenarios, se observó que la principal contribución es la prolongación de la vida útil de la red sin degradar el rendimiento de la red de manera significativa mediante el ajuste dinámico del ciclo de trabajo. Para hacer que el esquema sea aplicable, el método se puede aplicar a diferentes tipos de protocolos de MAC asíncronos y los protocolos de enrutamiento oportunista.

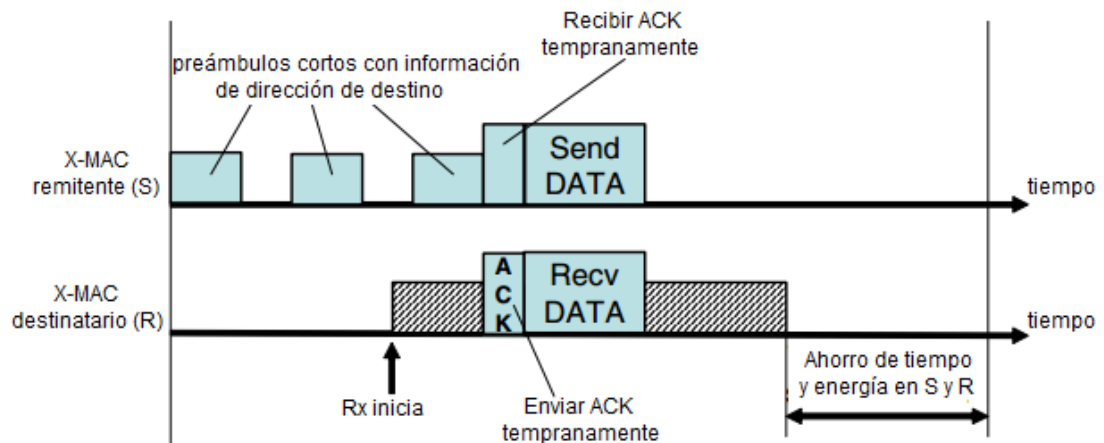


Figura 3. 1: Uso de preámbulos cortos en XMAC.

Elaborado por: Autor

En el resto de esta subsección, primero se presenta el protocolo XMAC. Luego se introduce un reenvío geográfico basado en conjunto de reenviadores. Finalmente se da el ciclo de trabajo dinámico basado en el conjunto de promotores propuesto.

3.2.1. Protocolo XMAC.

Cada nodo sensor sigue un ciclo de trabajo entre los períodos de suspensión y activo. Los protocolos de MAC asíncronos no necesitan

cronogramas de activación/suspensión sincronizados. Por lo tanto, el ahorro de energía es el lado más favorable de los protocolos MAC asíncronos. En este trabajo, se emplea el protocolo XMAC debido a su menor latencia y mayor rendimiento en comparación con el protocolo MAC. XMAC, que es un protocolo MAC iniciado por el remitente, el remitente envía breves preámbulos al siguiente salto. Si un receptor potencial está inactivo o envía otro paquete, no puede recibir el preámbulo.

Si el receptor (el siguiente nodo) detecta un preámbulo, el nodo devuelve un acuse de recibido (ACK). Si el nodo de detección no es el siguiente salto previsto que está determinado por el remitente, vuelve a estar en suspensión. El preámbulo estroboscópico permite que el receptor no espere demasiado tiempo hasta el final del preámbulo tal como se muestra en la figura 3.1.

En XMAC, el destinatario está determinado por el remitente. Sin embargo, las rutas estáticas no son apropiadas, especialmente en WSNs con funciones asíncronas. El remitente podría esperar tanto tiempo para un próximo salto previsto. Decidir el siguiente salto entre el conjunto de vecinos potenciales como en los protocolos de enrutamiento oportunistas puede llevar al ahorro de energía. Por lo tanto, se modifica el protocolo XMAC para que sea compatible con el enrutamiento oportunista.

3.2.2. Enrutamiento geográfico basado en conjunto de reenviadores

El enrutamiento oportunista es un protocolo de enrutamiento ampliamente aplicado para WSN con ciclos de trabajo. El oportunismo se utiliza para aprovechar los nodos activos que podrían recibir paquetes en el momento del envío de paquetes. En este trabajo, se emplea el reenvío basado en la contención. En el reenvío basado en la contención, los nodos del conjunto de reenviadores determinan un temporizador según la distancia a la que se hundan.

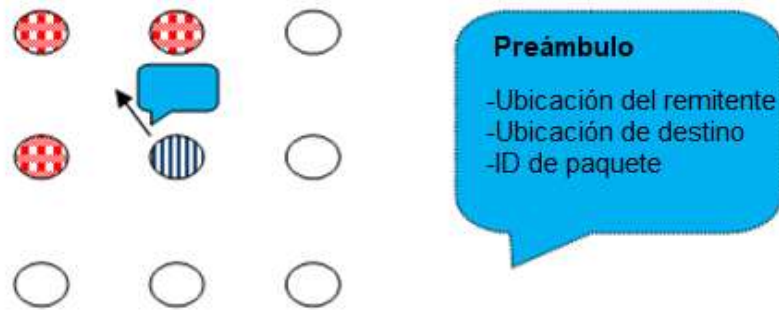
El nodo más cercano al sumidero (sink) tiene un temporizador con un valor más pequeño. Cuando el temporizador de un nodo expira, el nodo difunde un paquete ACK y los otros nodos en la lista de reenviadores reciben

ACK y cancelan sus temporizadores. Además, se adoptan esquemas de supresión para seleccionar el nodo en el conjunto de reenviadores. El objetivo de los esquemas de supresión es determinar el conjunto de reenviadores cuyos nodos están a una distancia de un salto entre sí.

Se debe tener en cuenta que cada remitente intenta enviar un paquete a un próximo salto previsto en XMAC. Sin embargo, el siguiente salto no está previsto y se selecciona entre los posibles nodos de reenvío en el reenvío basado en la contención. Se debe proporcionar compatibilidad entre XMAC y reenvío basado en la contención. El remitente envía los preámbulos que contienen su ubicación, ubicación de destino y la identificación del paquete para la compatibilidad entre XMAC y el reenvío basado en la contención. Cada remitente vecino, que recibe el preámbulo y está más cerca del destino que el remitente, configura un temporizador y contenidos para que sirvan como el siguiente salto.

En la figura 3.2, se presentan XMAC y el reenvío geográfico que se adoptaron en las evaluaciones. Se suministra compatibilidad entre el reenvío geográfico y XMAC para WSN con ciclos de trabajo. En primer lugar el remitente (nodo azul) envía preámbulos. El nodo que está en el conjunto de reenvío y no está en reposo, recibe el preámbulo y establece un temporizador en función de su distancia al sumidero. Si el nodo está en reposo, no puede recibir los preámbulos.

Los nodos en el conjunto de reenviadores no necesitan conocer la ubicación específica del destino. El preámbulo contiene la información sobre la ubicación del destino específico. El nodo más cercano al receptor (nodo verde) envía un ACK en primer lugar. Porque su temporizador caduca en primer lugar. Entonces, la transmisión de paquetes comienza entre el remitente y el receptor.



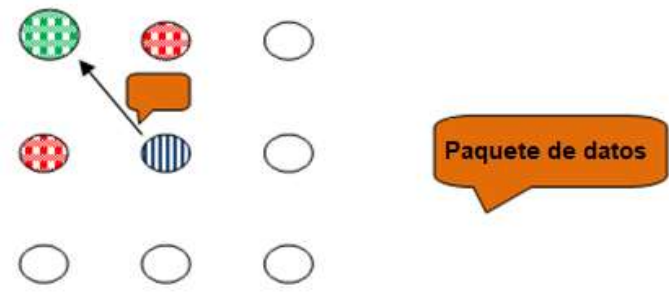
nodos en conjunto de reenviador
 nodo de envío
 preámbulo

(a) Preámbulo de envío.



nodos en conjunto de reenviador
 nodo de envío
 Paquete ACK
 El nodo más cercano al receptor en el conjunto de reenviadores, envía backpACK

(b) El nodo más cercano al sumidero envía ACK.



nodos en conjunto de reenviador
 nodo de envío
 paquete de datos
 Siguiendo salto seleccionado, nodo receptor

(c) Transmisión de paquetes entre remitente y receptor.

Figura 3. 2: Reenvío geográfico y XMAC.

Elaborado por: Autor

3.2.3. Técnica de eficiencia energética de ciclo de trabajo dinámico.

El esquema de ciclos de trabajo basado en el conjunto del reenviador combina la energía restante de los nodos y la información obtenida de la capa de red. En primer lugar, el nodo emisor decide la dirección del ajuste del ciclo de trabajo (ya sea incremento o decremento). La decisión se toma en base a la información obtenida de la capa de red. En la transmisión de paquetes de un salto, generalmente se incluyen más de un nodo en el conjunto del reenviador. Uno de ellos es seleccionado como el siguiente salto. Algunos nodos no pueden ser el siguiente salto a pesar de estar en el conjunto de reenviador. Estos nodos podrían ser el próximo salto para equilibrar el consumo de energía entre los nodos.

Los nodos recopilan dos estadísticas que están representadas por ε y θ , en cada período de ajuste del ciclo de trabajo. Los nodos no mantienen ninguna información adicional como el remitente u otros nodos en el conjunto del reenviador. ε , indica el número de veces que el nodo del sensor ha estado en el conjunto de reenviador en cada período de ajuste del ciclo de trabajo. θ , es el número de veces que el nodo ha sido el siguiente salto. Además, se supone que el número medio de nodos en un conjunto de reenviadores para la WSN se conoce y se denomina como α . Donde α es una variable relacionada con el grado de nodo. Por lo tanto, se supone que se conoce la densidad de la red en la fase de implementación.

El ajuste del ciclo de trabajo se realiza en función de la energía restante de los nodos teniendo en cuenta su ciclo de trabajo actual como se indica en:

$$d_i = \begin{cases} d_i + \left(c \times d_i \times \left(\frac{E_R}{E_{full}} \right) \right) \theta < (\varepsilon/\alpha) \\ d_i - \left(c \times d_i \times \left(1 - \frac{E_R}{E_{full}} \right) \right) \theta > (\varepsilon/\alpha) \end{cases}$$

Donde d_i es el ciclo de trabajo del nodo i . c es una constante específica de la red que determina el rango de actualización del ciclo de trabajo. E_R y E_{full} , son las energías restante e inicial del nodo, respectivamente.

ε/α da el número medio de veces que cada nodo ha sido el siguiente salto. Si las tasas de consumo de energía de cada nodo en WSN son similares, la cantidad de paquetes que envíen debería ser similar. El balance de energía entre los nodos puede ser proporcionado por un número similar de transmisiones de paquetes entre nodos. Porque los nodos sensores consumen la mayor parte de su energía en las transmisiones de paquetes.

Si algún nodo envía demasiados paquetes en comparación con sus vecinos, puede agotar su energía. De manera básica, ε/α proporciona un umbral en toda la red para encontrar los nodos que envían demasiados paquetes en comparación con sus vecinos. Si θ de un nodo es inferior a ε/α , significa que el nodo no tiene la posibilidad de ser el siguiente salto con frecuencia. Por lo tanto, su ciclo de trabajo se incrementa para aumentar la probabilidad de ser el siguiente salto.

Se supone que cada nodo tiene la probabilidad de que $1/\alpha$ sea el siguiente salto. Si θ del nodo es inferior a ε/α , esto implica que el nodo ha sido el siguiente salto en muchas transmisiones de paquetes. Luego, el ciclo de trabajo del nodo se reduce para disminuir el consumo de energía del nodo. Dicho enfoque reduce la probabilidad de estar activo en las siguientes transmisiones de paquetes para el nodo.

La energía restante se utiliza como una restricción en el ajuste del ciclo de trabajo. Si la energía restante del nodo se reduce dramáticamente, el ciclo de trabajo del nodo no aumenta con una tasa más alta. Se considera al agotamiento de energía de los nodos como una restricción. Así que se utiliza la relación entre la energía restante de los nodos y la energía total de los nodos como un parámetro de escala.

Mientras, que $\frac{E_R}{E_{full}}$ es la escala de incremento del ciclo de trabajo para evitar el agotamiento de energía de los nodos altamente utilizados. Y viceversa, $\left(1 - \frac{E_R}{E_{full}}\right)$ es la escala de decremento del ciclo de trabajo

considerando la energía restante de los nodos. Si la energía restante del nodo es alta, entonces su ciclo de trabajo disminuye con una escala más baja.

Finalmente, debe tenerse en cuenta que los nodos que se colocan especialmente en las esquinas de la WSN generalmente no tienen la oportunidad de ser el próximo salto en muchas transmisiones de paquetes. Solo generan paquetes y envían los paquetes al siguiente salto. Por lo tanto, ε puede usarse para verificar si el nodo correspondiente es un nodo de esquina o no. Si ε del nodo es cero durante un largo período, el ciclo de trabajo del nodo se reduce drásticamente. Debido a que el ciclo de trabajo del nodo no se ajusta y el nodo no envía ni recibe paquetes en muchos períodos de ajuste del ciclo de trabajo.

Entonces los nodos comienzan a agotar su energía en los periodos de escucha. En consecuencia, los nodos consumen su energía en la escucha inactiva. Por lo tanto, el ciclo de trabajo de este tipo de nodos puede reducirse drásticamente para evitar la escucha inactiva. Por otro lado, la muerte de este tipo de nodos no afecta la vida útil de la red. En consecuencia, no se puede observar la ganancia de rendimiento en las evaluaciones al extender la vida útil de este tipo de nodos.

3.3. Selección adaptativa de sumidero (sink) usando un ciclo de trabajo dinámico basado en un conjunto de reenviadores.

Aquí se presenta la técnica de reenvío geográfico adaptativo que considera la selección de sumideros en una WSN con múltiples ciclos de trabajo dinámicos. En primer lugar, los nodos sensores auto-organizadores intentan determinar las fallas de los nodos en sus vecinos. Luego trata de enviar sus paquetes utilizando nodos alternativos de manera oportunista, si el nodo sensor auto-organizado detecta un agujero de enrutamiento en su conjunto de reenviador. Se determina el tiempo máximo de espera para detectar un orificio de enrutamiento por un nodo sensor. El número máximo de preámbulos se define para representar el tiempo máximo de espera. El

nodo sensor envía su paquete al siguiente salto con el retardo por salto en XMAC (3.2).

$$\begin{aligned} Lat = & (duración\ del\ preámbulo + escucha\ ACK) \\ & \times (\text{número esperado de repeticiones requeridas}) \\ & + (duración\ para\ enviar\ el\ paquete) \end{aligned}$$

El número máximo de iteraciones requeridas para enviar un paquete se puede obtener utilizando el período máximo de suspensión permitido en WSN. En el peor de los casos, el nodo envía un preámbulo y todos sus vecinos comienzan su período de suspensión. Por lo tanto, cualquiera de los vecinos del nodo sensor se activa y no puede recibir el paquete hasta el final del período de suspensión. Se define a N_{max} como el número máximo de preámbulos enviados por el nodo sensor, según la ecuación:

$$N_{max} = \frac{(T_{sleep} + T_{pre} + T_{ACK})}{(T_{pre} + T_{ACK})}$$

Donde, T_{sleep} es la duración del período de sueño máximo permitido. T_{pre} , es la duración del preámbulo y T_{ACK} es la duración del acuse de recibo que envía el nodo en el conjunto del reenviador.

Por otro lado, si la tasa de tráfico es alta y cualquier nodo puede ser una fuente en la WSN, el número de preámbulos puede ser mayor que N_{max} . Cuando el nodo emisor envía preámbulos, los vecinos del nodo emisor también podrían enviar preámbulos o recibir paquetes. El número máximo de preámbulos para enviar un paquete puede ser mayor que N_{max} , considerando todos los casos posibles.

Por lo tanto, el número máximo de preámbulos debe definirse como el más alto. Sin embargo, el objetivo del ciclo de trabajo es evitar la escucha inactiva y generalmente se aplica en WSNs que no tienen tasas de tráfico altas. Si la tasa de tráfico es alta, el tiempo de espera de los nodos se reducirá debido a las transmisiones de paquetes y al envío de preámbulos. Por lo tanto,

los casos en que el número máximo de preámbulos es mayor que N_{max} , también son muy raros en WSNs de ciclo de trabajo bajo.

En las WSNs, los nodos pueden romperse y los nodos sensores no pueden acceder a algunos de los nodos de sumidero. Por lo tanto, los paquetes que se enrutan a nodos de sumidero inalcanzables se eliminan y en consecuencia la calidad de rendimiento disminuye. Se modifica el reenvío basado en la contención para dirigir estos paquetes a uno de los otros receptores en WSN de múltiples sumideros y reducir la tasa de pérdida de paquetes. Se propuso una extensión para obtener resistencia a fallos en WSN de múltiples sumideros.

En el modelo, el nodo remitente sospecha que siente una falla de nodo después de enviar preámbulos N_{max} . Los preámbulos de N_{max} son un umbral para estimar la falla del nodo o el orificio de enrutamiento. Después de alcanzar el umbral, el nodo emisor intenta complementar su conjunto de reenviadores y notificar la extensión de su conjunto de reenvíos a sus vecinos mediante sus preámbulos.

También, se modifica el reenvío basado en la contienda al extender el conjunto de reenviadores en el caso de una falla de nodo. En el reenvío geográfico basado en la disputa, si el nodo más cercano al sumidero (sink) devuelve un ACK, todos los demás nodos en la región de reenvío pueden escuchar el ACK y regresar a sus ciclos de trabajo. Por lo tanto, todos los nodos en el conjunto del reenviador están a una distancia de un salto entre sí.

En el modelo propuesto, el conjunto de reenviadores se complementa después de enviar preámbulos N_{max} . Por lo tanto, es posible que no todos los nodos del conjunto del reenviador estén a una distancia de un salto. Se añadió un campo de nodo receptor en los paquetes de datos del nodo remitente. La modificación en el reenvío basado en la contienda se puede resumir paso a paso:

- El nodo remitente envía los preámbulos a los nodos en su conjunto de reenviador.

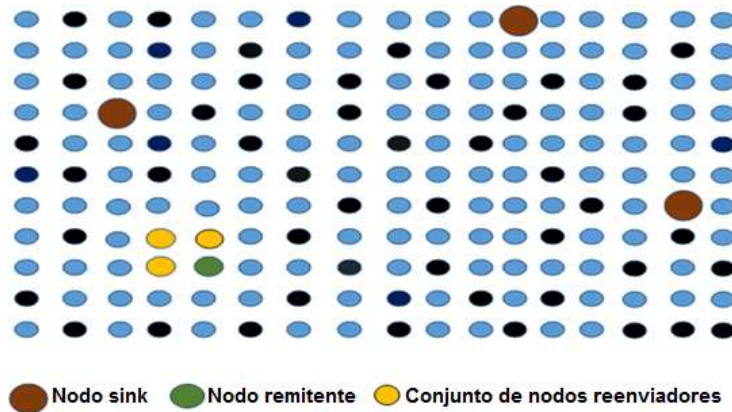
- El temporizador del nodo más cercano al sumidero expira primero. El nodo más cercano al sumidero devuelve un ACK.
- El nodo remitente espera el final del tiempo de espera para todos los ACK que envían otros nodos en el conjunto del reenviador.
- El nodo remitente espera el final del tiempo de espera para todos los ACK que envían otros nodos en el conjunto del reenviador.
- El nodo emisor envía paquetes de datos cuyo campo de nodo receptor contiene el nodo con el temporizador más pequeño.
- Los nodos en el conjunto de reenviadores verifican el paquete de datos si son el siguiente salto o no. Si no son el siguiente salto, entonces regresan su período de ciclo de trabajo.

Los preámbulos contienen la ubicación del nodo remitente, la ubicación del receptor de destino, el campo flexible y la identificación del paquete para la compatibilidad entre XMAC y el reenvío basado en la contención. El campo flexible se establece como activo, si el nodo emisor estima una falla de nodo. Si el nodo remitente no puede enviar su paquete a cualquier siguiente salto después de los preámbulos de N_{max} , comienza a considerar la posibilidad de falla o la posibilidad de que se agote la energía. Así que establece el campo flexible como activo en los preámbulos.

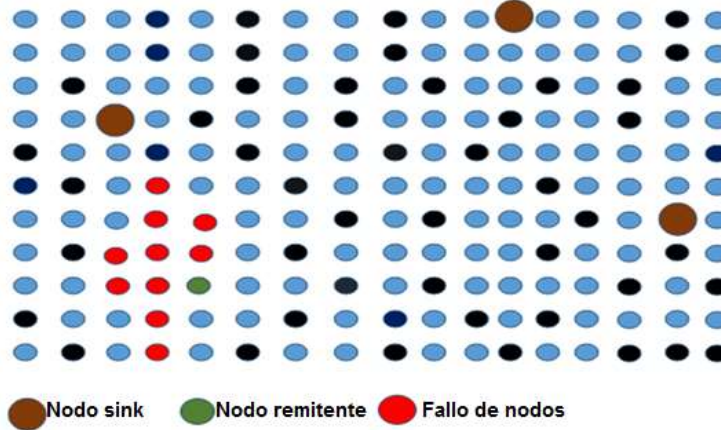
Normalmente, un nodo vecino que recibe un preámbulo, responde un ACK, si y solo si está más cerca del receptor de destino que el nodo emisor. Cuando se envían menos preámbulos de N_{max} , el protocolo de enrutamiento funciona igual que el reenvío geográfico. Cuando el nodo remitente envía preámbulos N_{max} , el nodo emisor establece el campo flexible como activo en sus preámbulos.

Todos los vecinos que reciben dicho preámbulo envían un ACK, si están más lejos del sumidero de destino que el nodo emisor. Además, el nodo también complementa su conjunto de reenviadores, si recibe n paquetes cuyos campos flexibles están activos. Por lo tanto, los paquetes no son ping-

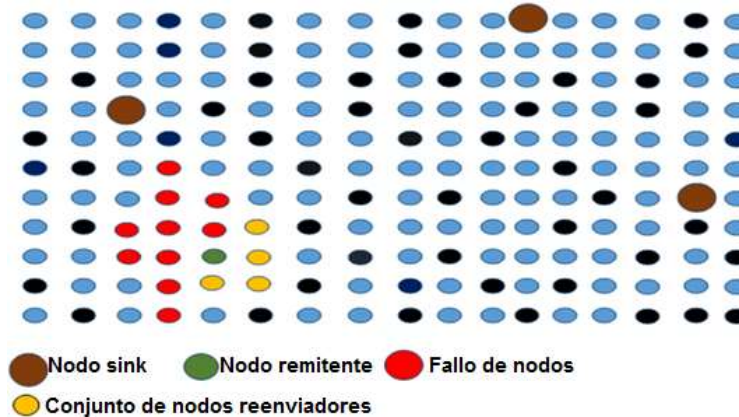
pong entre nodos similares y se envían a otro sumidero con menos número de saltos.



(a) No hay caso de falla: reenvío geográfico al sumidero más cercano.



(b) Los nodos en el conjunto de reenviador fallan.



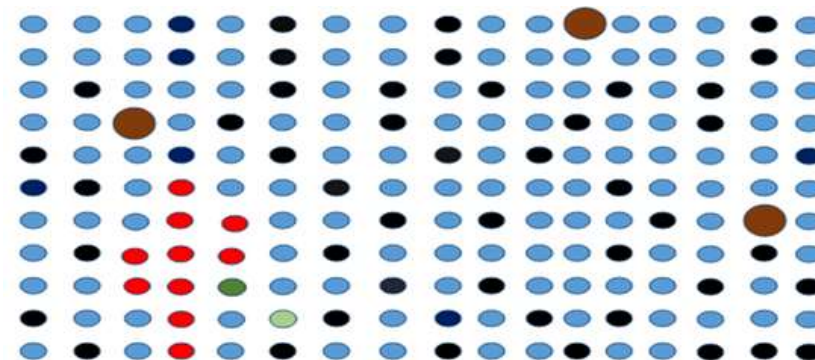
(c) El conjunto del reenviador se complementa después de la detección de fallas de nodo.

Figura 3. 3: Actualización de los conjuntos de reenviadores – I.
Elaborado por: Autor

Cuando un nodo fuente decide transmitir un paquete de manera oportunista, establece el límite flexible definido en toda la red en el paquete. El límite flexible depende del tamaño de la red y la cantidad de sumideros en

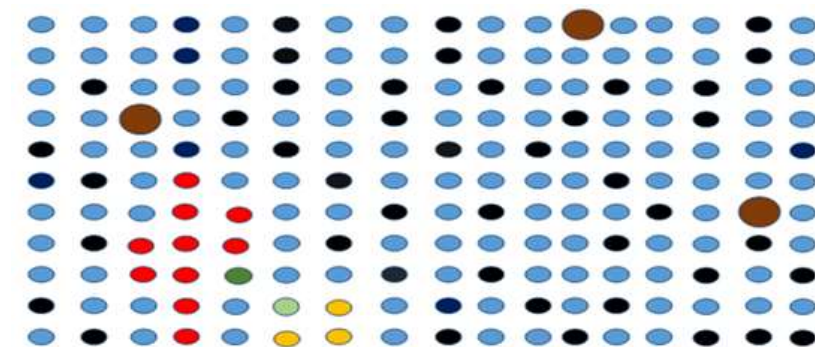
la WSN. Si el límite flexible no se asigna correctamente, la demora del rendimiento se degrada drásticamente debido a las rutas más largas entre el origen y el destino.

En la figura 3.3 y en la figura 3.4, se demuestra el enfoque propuesto. Los nodos negros representan nodos en el periodo inactivo. El nodo emisor (nodo verde) envía sus paquetes a los nodos en su conjunto de reenvío geográfico (nodos amarillos). Algunos nodos se caen debido a un agotamiento o fallo de energía (nodos rojos). Por lo tanto, el nodo emisor no puede transmitir sus paquetes a los nodos rojos en su conjunto de reenviadores. Si el nodo emisor no puede transmitir su paquete a un nodo de siguiente salto después de los preámbulos de N_{max} , el conjunto de reenviadores se complementa y se cambia el número de receptores alternativos.



● Nodo sink ● Nodo remitente ● Fallo de nodos
● Nodo receptor

(a) El nodo receptor en el nuevo conjunto de reenviador.



● Nodo sink ● Nodo remitente ● Fallo de nodos
● Conjunto de nodos reenviadores ● Nodo receptor

(b) El conjunto de reenviadores se complementa después de recibir n paquetes cuyos campos flexibles están activos.

Figura 3. 4: Actualización de los conjuntos de reenviadores – II.

Elaborado por: Autor

Si el nodo receptor recibe n paquetes cuyos campos flexibles están activos, también complementa su conjunto de reenviadores. Los paquetes pueden utilizar rutas alternativas. Por lo tanto, el paquete puede llegar a otros receptores sin ping-pong entre nodos similares. La pérdida de paquetes puede reducirse cambiando los miembros del conjunto de reenviadores.

3.4. Análisis de resultados obtenidos.

En las secciones anteriores, se mencionaron los principios de diseño y las propiedades del ciclo de trabajo dinámico basado en el conjunto de reenvío y la selección de sumidero adaptativo en WSNs de múltiples sumideros. En esta sección, se presenta el entorno de simulación y la comparación de rendimiento de las técnicas propuestas con las demás.

3.4.1. Entorno de simulación

Los resultados de la simulación se obtienen de la simulación de eventos discretos desarrollada mediante el lenguaje de programación Java. Se supone que los nodos sensores conocen su ubicación exacta con la ayuda de GPS o algoritmos de localización. El supuesto es hecho por todas las obras relacionadas que adoptan el reenvío geográfico.

XMAC y el reenvío geográfico basado en la contención se emplean en las simulaciones. Para XMAC, los valores de los parámetros de simulación se toman de la tabla 3.1. Además, los parámetros de consumo de energía de los nodos sensores, que incluyen el costo computacional, se establecen en la tabla 3.2. También se tiene en cuenta el coste computacional. El consumo de energía para el cálculo es tan pequeño en comparación con el consumo de energía en las transmisiones de paquetes.

Sin embargo, el modelo propuesto causa un costo computacional adicional de los nodos sensores. Por lo tanto, el costo computacional se considera para observar la influencia de las operaciones de ajuste del ciclo de trabajo en el consumo de energía de los nodos. Las tasas de consumo de energía y los parámetros de simulación de XMAC se enumeran en las tablas 3.1 y 3.2.

La energía inicial de cada nodo se toma como en 50 J. El ciclo de trabajo inicial se asigna como 10%. C se toma como 0,8. El ajuste del ciclo de trabajo se realiza en un período de cada 20 s. La red continúa enviando paquetes desde una fuente a destino hasta que haya una partición de red. Por lo tanto, se ejecutan las simulaciones hasta que se produce una partición de red. La partición de red se prueba después de la muerte de cada nodo por el primer algoritmo de búsqueda de amplitud. Múltiples nodos generalmente envían sus medidas al sumidero de la WSN. Por lo tanto, las fuentes se seleccionan de acuerdo con la distribución uniforme en cada tiempo de generación de paquetes.

Tabla 3. 1: Valores de XMAC empleados.

| Variable de XMAC | Duración |
|--|----------|
| Preámbulo (SP) | 2 ms |
| ACK escucha y ACK envía (R_a y S_{at}) | 2 ms |
| Datos del remitente y datos del receptor (S_d y R_d) | 4 ms |

Elaborado por: Autor

Tabla 3. 2: Consumo energético de los nodos de TelosB.

| Operación | Consumo de energía |
|---------------------------|--------------------|
| Transmite por 1 ms | 54 mW |
| Escucha 1 ms | 60 mW |
| Recibir por 1 ms | 61 mW |
| Inactivo de 1 ms | 35 μ W |
| Calcular para 1 T_{CLK} | 1.2 nJ |

Elaborado por: Autor

3.5. Resultados del ciclo de trabajo dinámico basado en el conjunto de reenviadores

Se prueba el modelo de ciclo de trabajo dinámico basado en un conjunto de reenviadores propuesto con una topología grid (cuadrícula). En la implementación de simulación se utilizan 36 nodos en una topología de cuadrícula de 60x60m² con una distancia entre nodos de 10 m. El rango de transmisión de cada nodo se toma como 15 m. El grado de los nodos puede cambiar de tres a ocho. Los nodos sensores se colocan en la esquina inferior

izquierda de la esquina superior derecha de la fila de la cuadrícula, fila por fila, con ID crecientes, tal como se muestra en la figura 3.5.

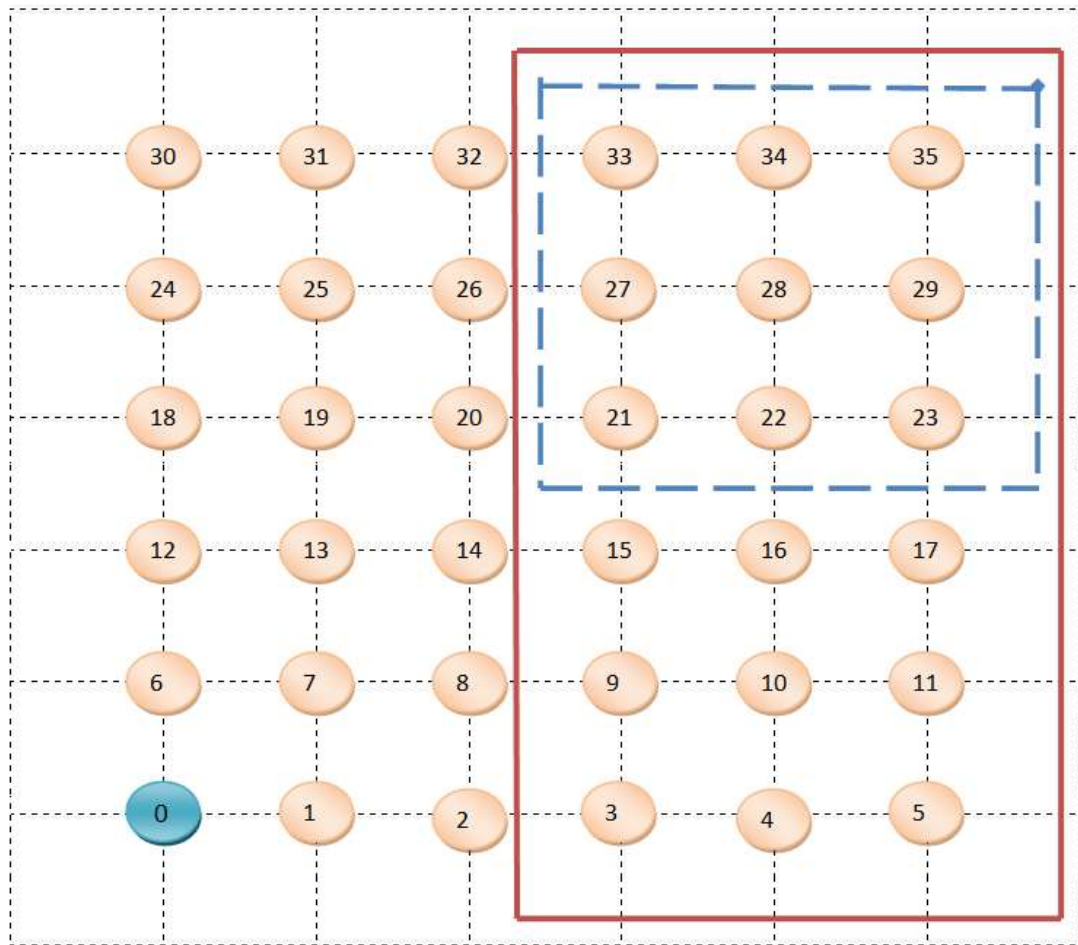


Figura 3. 5: Configuración de la topología de cuadrícula.
Elaborado por: Autor

El sumidero (sink) es el nodo con ID # 0. Las fuentes se eligen de toda la WSN con distribución uniforme. El tráfico de la red es negativo distribuido exponencialmente. La media de distribución es 1 s y el tiempo mínimo de generación de paquetes entre el tiempo observado se establece en 250 ms. Todas las fuentes intentan enviar sus paquetes al nodo receptor con el ID # 0 (véase la figura 3.5)

Cuando se estudian los resultados, se observa que, si las fuentes se eligen de forma aleatoria entre todos los nodos de la topología, el rendimiento de retardo produce altas fluctuaciones. Debido a que los paquetes que son generados por los nodos más cerca del sumidero, experimentan menores retrasos y tales resultados podrían ser confusos. Por lo tanto, se decidió

seleccionar las fuentes con distribución uniforme en la parte superior derecha de la parte superior de la topología y en la parte derecha de la topología en una parte de las evaluaciones que se muestran con el rectángulo de líneas discontinuas que se observa en la figura 3.5. Finalmente, también se evaluaron los resultados para diferentes casos de selección de fuente. También, se incluye la evaluación de resultados de las simulaciones para la vida útil de la red, la energía restante de los nodos y el retardo de extremo a extremo.

Comparando el esquema de ciclo de trabajo basado en el conjunto de reenvíos propuesto con la técnica de ciclo de trabajo heterogéneo basada en grados de nodos y el ciclo de trabajo constante. Inicialmente, los mismos ciclos de trabajo se asignan a todos los nodos como en el esquema de ciclo de trabajo constante. Los ciclos de trabajo de los nodos no se modifican durante la vida útil de la red. Cada nodo actualiza su ciclo de trabajo como en la ecuación 3.1, donde d_0 es el ciclo de trabajo inicial del nodo. El grado de un nodo se actualiza si el nodo descubre nuevos vecinos.

$$d_i = d_0 \times (\text{degree}(i))^{-\beta} \quad (3.1)$$

β , es un parámetro sintonizable tomado como $\frac{1}{2}$. Si el nodo tiene un grado más alto, entonces disminuye su ciclo de trabajo. No es aplicable para WSNs con nodos de sensores estáticos. Debido a que el grado del nodo no proporciona información sobre la dinámica de la red durante el tiempo de vida de la red. El grado del nodo se determina en la fase de despliegue de la red. Por lo tanto, el esquema de ciclos de trabajo basado en grados de nodo no es robusto a la dinámica de red.

3.5.1. Vida útil de la red.

Se comparan las duraciones de red de las tres técnicas. Los resultados para cada escenario se obtienen a partir de 20 iteraciones. En los escenarios de simulación, si un nodo no está muerto cuando ocurre una partición de red, la vida útil del nodo se toma igual al tiempo de partición de red, ya que se detiene la simulación. La línea discontinua negra representa la vida útil media

de la red de 20 iteraciones. La línea verde es la vida media de cada nodo en la topología. Además, el intervalo de confianza 95% de la vida útil de cada nodo se traza con barras de error.

La figura 3.6 muestra el esquema de ciclo de trabajo constante, la vida útil de los nodos está cerca uno del otro. Los nodos críticos que están cercanos al sumidero (sink) han agotado su energía. Por lo tanto, la vida útil de la red termina dramáticamente en poco tiempo. La vida útil de la red se limita a la muerte de los nodos críticos.

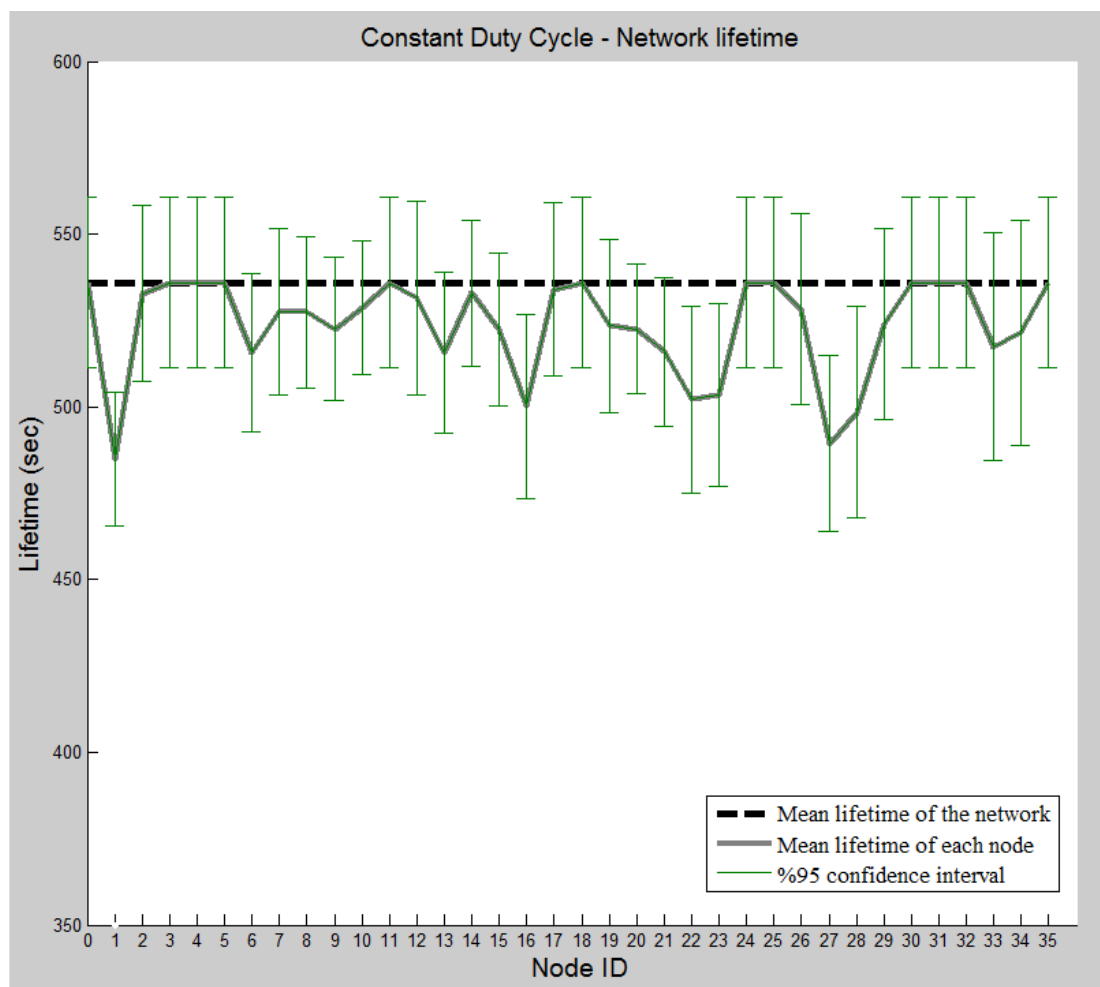


Figura 3. 6: Duración de la red utilizando la técnica de ciclo de servicio constante.
Elaborado por: Autor

La figura 3.7 muestra el esquema del ciclo de trabajo basado en el grado del nodo muestra resultados de mayor duración. Aquí, las vidas útiles de los nodos críticos se incrementan mediante el uso de rutas alternativas. Ciclo de trabajo de los nodos de alto grado se reducen. Luego se incrementan las vidas

de nodos de alto grado. Los paquetes son reenviados por otros nodos con mayor retraso.

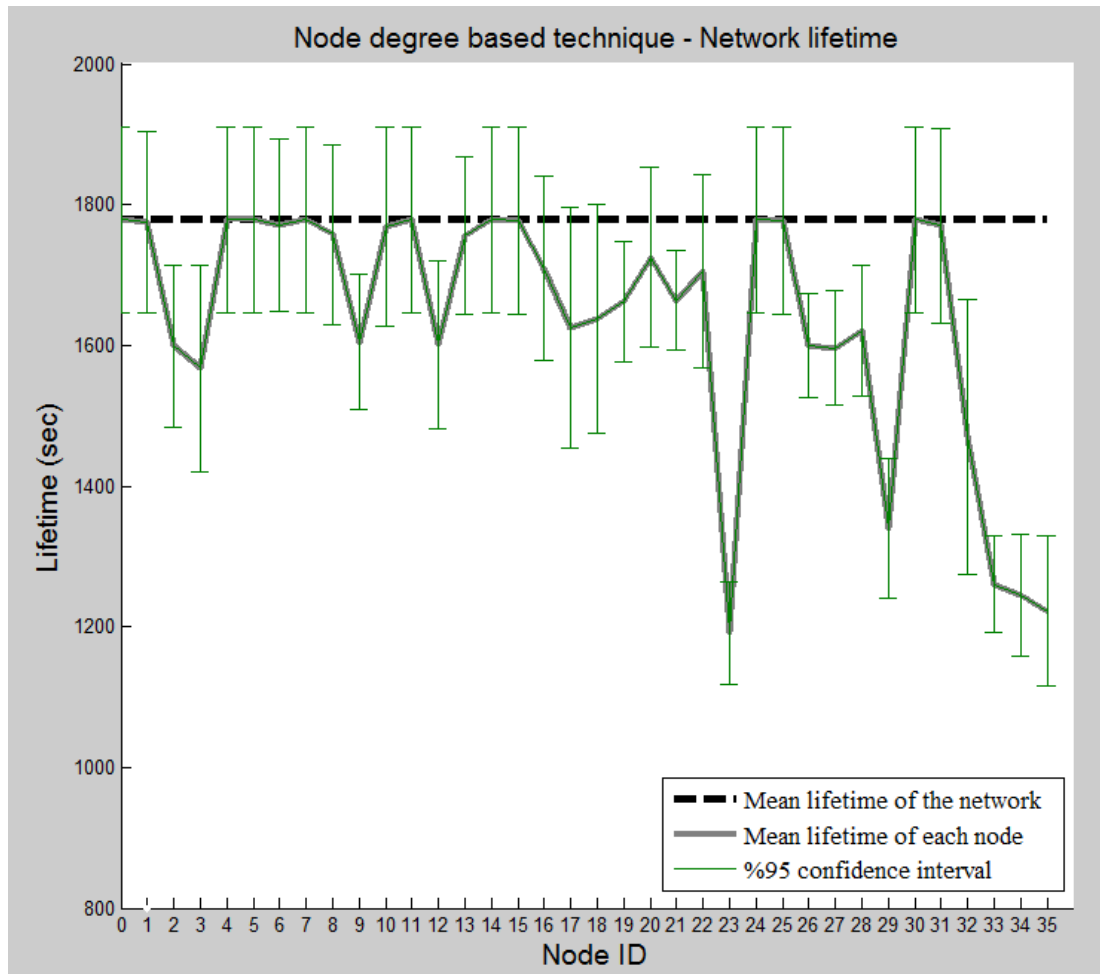


Figura 3. 7: Duración de la red utilizando la técnica basada en el grado del nodo.
Elaborado por: Autor

El esquema de la figura 3.8 proporciona una vida útil aproximadamente 2 veces más larga en comparación con el método de grado del nodo y una vida útil 6 veces más larga en comparación con el ciclo de trabajo constante. También, se muestra que, tras el mayor consumo de energía de los nodos críticos, los otros nodos, que están a una distancia de un salto hacia ellos, se convierten en receptores en las próximas transmisiones de paquetes. Se obtuvo una extensión de por vida al equilibrar la carga de tráfico de los nodos críticos en el conjunto de reenviadores.

Por lo tanto, se trata de extender la vida útil de los nodos altamente utilizados. Los nodos que no transmiten tantos paquetes y que están en el

conjunto de reenviadores en el período de contención tienden a aumentar su ciclo de trabajo en función del esquema propuesto. Este ajuste aumenta la posibilidad de ser ganador en el período de contención. Por otro lado, aumentando el ciclo de trabajo también causa el agotamiento de la energía de los nodos como inconveniente.

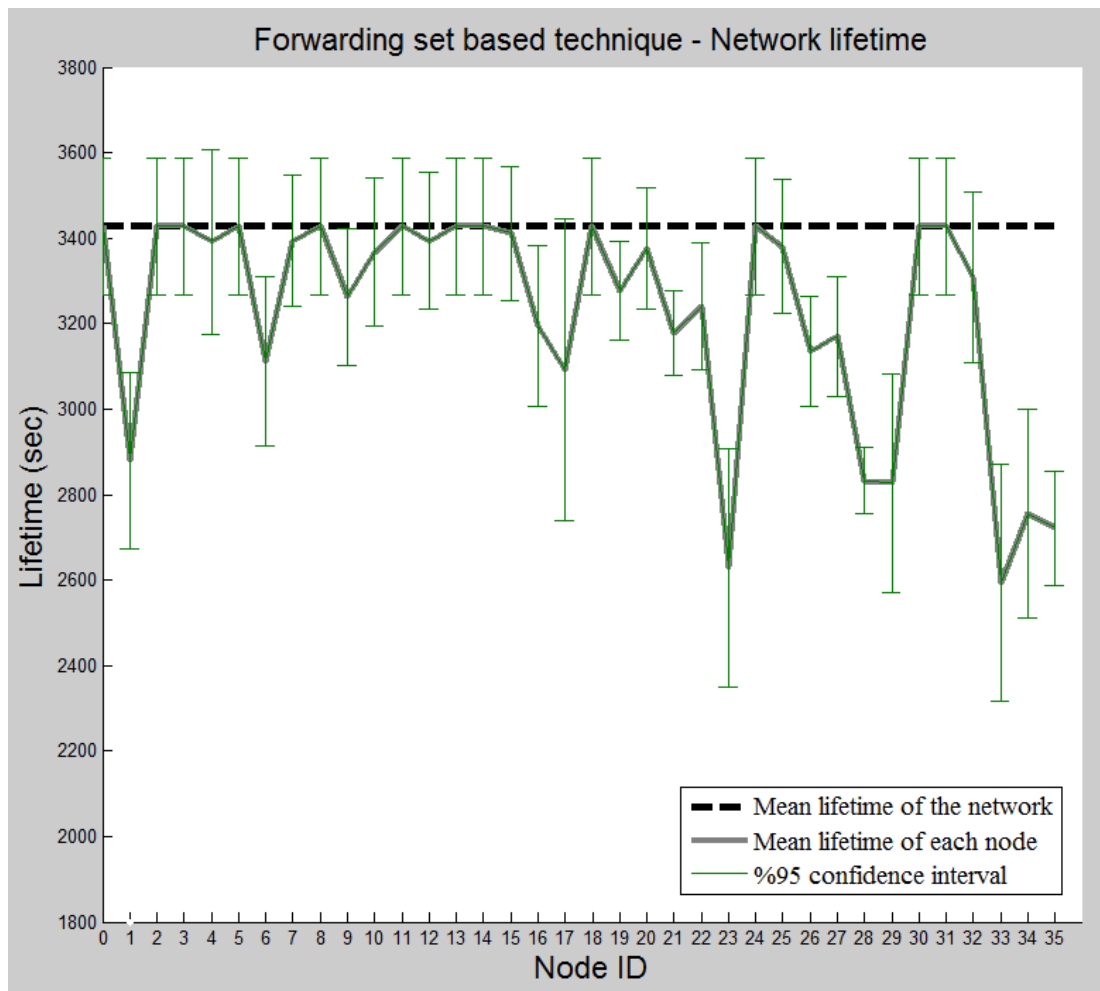


Figura 3. 8: Duración de la red utilizando la técnica basada en el conjunto de reenviadores.

Elaborado por: Autor

Por lo tanto, la muerte de este tipo de nodos que no están en posiciones críticas en la WSN no afecta a las transmisiones de paquetes. En las figuras 3.6 a 3.8, la vida útil de los nodos en la parte superior derecha de las topologías Grids puede ser más corta. Pero la red no está dividida por los nodos muertos en la parte superior derecha. También, los nodos en la parte superior izquierda de la topología grid (cuadrícula) no se utilizan con frecuencia en las transmisiones de paquetes. En consecuencia, sus ciclos de

trabajo no se ajustan en los períodos de ajuste del ciclo de trabajo que no tienen transmisiones de paquetes. Si el nodo no transmite un paquete después de 3 s, entonces disminuye drásticamente su ciclo de trabajo.

Por lo tanto, las vidas útiles de los nodos en la parte superior izquierda de la topología grid (cuadrícula) son más largas en comparación con otros nodos en la topología. La vida útil de los nodos puede variar dependiendo de la topología de la red o la dinámica de la red como se ve en la evaluación. Finalmente, el esquema propuesto tiene una vida útil más larga al equilibrar el consumo de energía entre los nodos críticos.

3.5.2. Retardo o Delay.

En la figura 3.9 las barras indican el error medio y retardo con un 95% de intervalo de confianza, para lo cual se han trazado para 10 iteraciones. El mejor rendimiento de retardo se obtiene con un ciclo de trabajo constante como se esperaba. Aquí, los nodos seleccionan los nodos más cercanos al sumidero (sink) y los ciclos de trabajo de todos los nodos son fijos. Así que las posibilidades de que los nodos vecinos sean el próximo salto son las mismas.

Los esquemas de ciclos de trabajo dinámico intentan suministrar rutas alternativas para la transmisión de paquetes. Los paquetes se pueden reenviar a través de rutas más largas empleando los nodos menos utilizados en la transmisión de paquetes. Así que el retardo puede aumentar por los esquemas dinámicos de ciclos de trabajo. Por lo tanto, los esquemas de ciclos de trabajo dinámico tienen mayores resultados de retardo en comparación con los ciclos de trabajo constante.

El ciclo de trabajo dinámico basado en grados de nodo tiene como objetivo mejorar el retardo de extremo a extremo en el peor de los casos y su retardo medio es ligeramente superior al retardo medio del esquema del ciclo de trabajo constante. El esquema tiene un tiempo de retardo medio más cercano al esquema basado en el grado del nodo tal como se muestra en la figura 3.9. El esquema evita demoras más largas al proporcionar al menos un nodo con un ciclo de trabajo más alto en el conjunto de reenviadores.

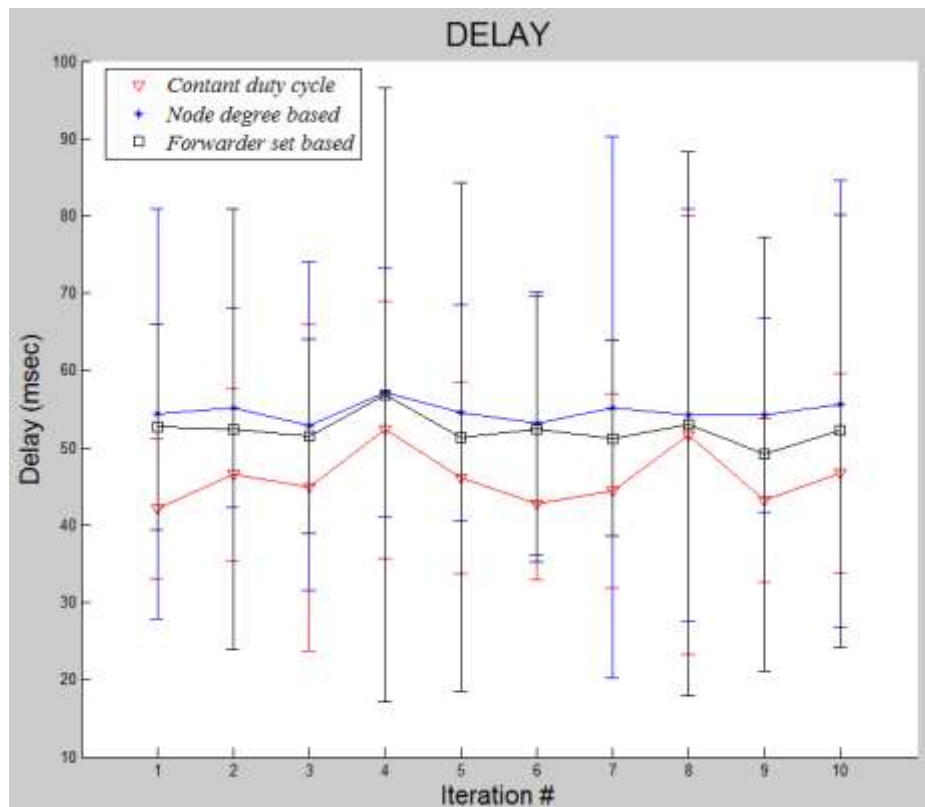


Figura 3. 9: Gráfica del retardo de las tres técnicas basado en: ciclo de trabajo constante, grado del nodo y conjunto de reenviadores.
Elaborado por: Autor

Se utiliza α para la probabilidad media de ser el siguiente salto. Por lo tanto, el ajuste del ciclo de trabajo se realiza en función del equilibrio del consumo de energía en el conjunto de reenviadores básicamente. Por lo tanto, los paquetes pueden ser transmitidos por nodos ciclados de servicio superior. Por lo tanto, el rendimiento de retardo de extremo a extremo no se degrada significativamente en comparación con el ciclo de trabajo constante.

3.5.3. Energía remanente de los nodos sensores.

En las figuras 3.10, 3.11 y 3.12 la energía restante de los nodos se muestra siguiendo la partición de la red. Los nodos se colocan tal como se mostró en la figura 3.5. Las líneas sobre la barra de la energía restante representan el intervalo de confianza del 95%. La energía restante de los nodos que están cerca del sumidero (sink) y las fuentes (cuarta parte superior derecha de la topología), se reduce drásticamente en las tres técnicas. Debido a que estos nodos son nodos muy utilizados en las transmisiones de paquetes.

En los ciclos de trabajo constante (véase la figura 3.10), la energía restante de los nodos activos generalmente es más alta que las otras técnicas. Dado que la comunicación se detiene después de la inactividad de los nodos críticos y los otros nodos aún tienen una cantidad razonable de energía.

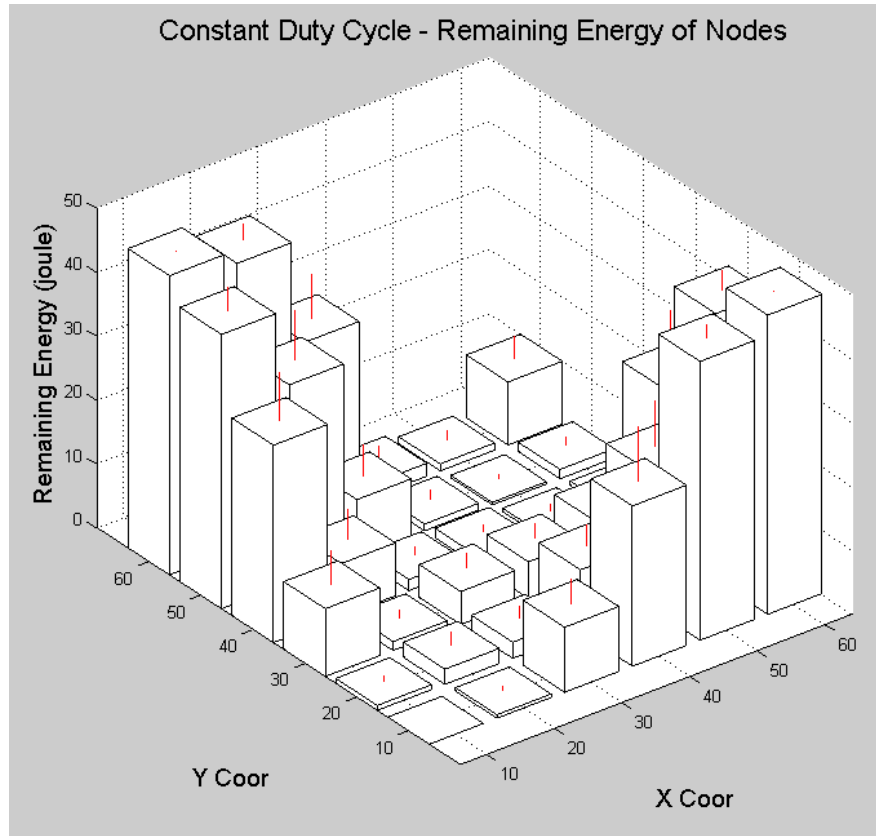


Figura 3. 10: Energía restante de cada nodo utilizando la técnica de ciclo de servicio constante.

Elaborado por: Autor

La técnica de ciclos de servicio basada en el grado del nodo (véase la figura 3.11) causa el agotamiento de la energía de los nodos, excepto los nodos de esquina que no tienen posibilidad de ser fuente. Los nodos que están más cerca de los nodos sumidero no han agotado su energía antes de la vida útil de la red. El motivo es el envío de preámbulos y el ajuste del ciclo de trabajo. Los nodos actualizan su ciclo de trabajo basado en el grado del nodo. Los nodos internos en la topología de la cuadrícula tienen ciclos de trabajo más bajos debido a su alto grado de nodos.

Los nodos que se comportan como fuentes de la topología consumen la mayor parte de su energía en el envío de preámbulos. Cuando cualquier nodo

fuente de la parte superior derecha de la topología envía un paquete, necesita enviar tantos preámbulos a la espera del tiempo de activación de los posibles nodos receptores. Así, los nodos internos se vuelven a consumir la mayor parte de su energía en el envío de preámbulos.

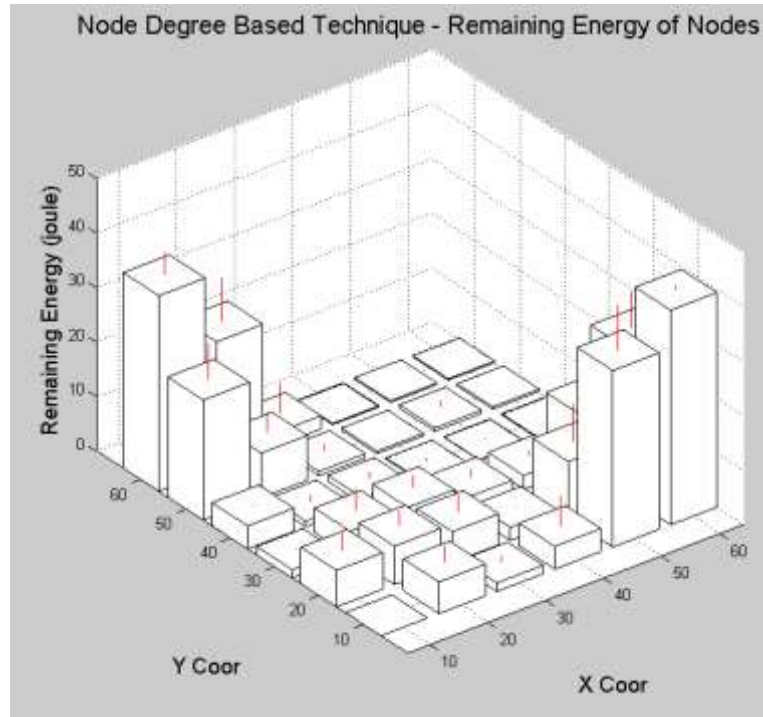


Figura 3. 11: Energía restante de cada nodo utilizando la técnica de ciclo de trabajo dinámico basado en el grado de nodo.
Elaborado por: Autor

El esquema también causa el agotamiento de la energía de nodos similares con el método de ciclo de trabajo dinámico basado en grados de nodo, en consecuencia, es un resultado esperado. Se puede ver que el esquema tuvo una vida útil más larga al utilizar una porción más alta de nodos en la transmisión de paquetes. El esquema de ciclos de trabajo propuesto actualiza el ciclo de trabajo de los nodos al evitar un alto número de envíos de preámbulos. Por lo tanto, el agotamiento de energía de los nodos se pospone y la vida útil de la red se prolonga. La razón de los intervalos de confianza más altos en la energía restante de la parte superior izquierda de la topología de la cuadrícula y la parte inferior derecha de la topología de la cuadrícula es el número fluctuante de transmisión de paquetes de estos nodos. Otros nodos en la topología de cuadrícula tienen valores de intervalo de confianza más pequeños debido a su alto uso en las transmisiones de paquetes.

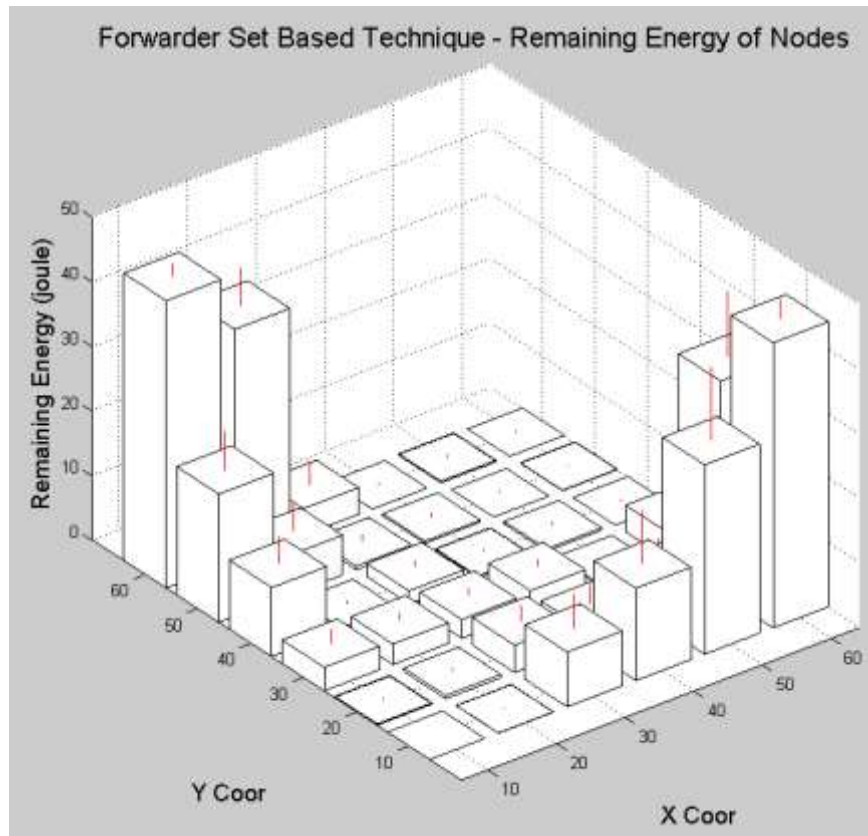


Figura 3. 12: Energía restante de cada nodo utilizando la técnica de ciclo de trabajo dinámico basado en el conjunto de reenviadores.

Elaborado por: Autor

3.5.4. Casos de selección de fuente.

Como se mencionó anteriormente, si las fuentes se eligen entre todos los nodos en una WSN, el rendimiento de retardo da resultados altamente fluctuantes. En las simulaciones anteriores, los nodos de origen se seleccionan al azar con una distribución uniforme de toda la topología de la WSN tal como se muestra en la figura 3.5. En esta sección, los resultados obtenidos se basan en los tres casos considerando la ubicación de las fuentes. Los tres casos que consideran la ubicación son:

- Las fuentes son del cuarto superior derecho (cuarta parte)
- Las fuentes son de la mitad derecha (la mitad).
- Todos los nodos pueden ser una fuente, excepto el nodo receptor (completo).

Como se ve en la figura 3.13 la vida útil no difiere significativamente a medida que cambia la selección de fuente. El caso del primer cuarto tiene

resultados ligeramente más altos en comparación con los otros casos. La vida más larga en el caso cuarta parte, es un resultado de evaluación esperado.

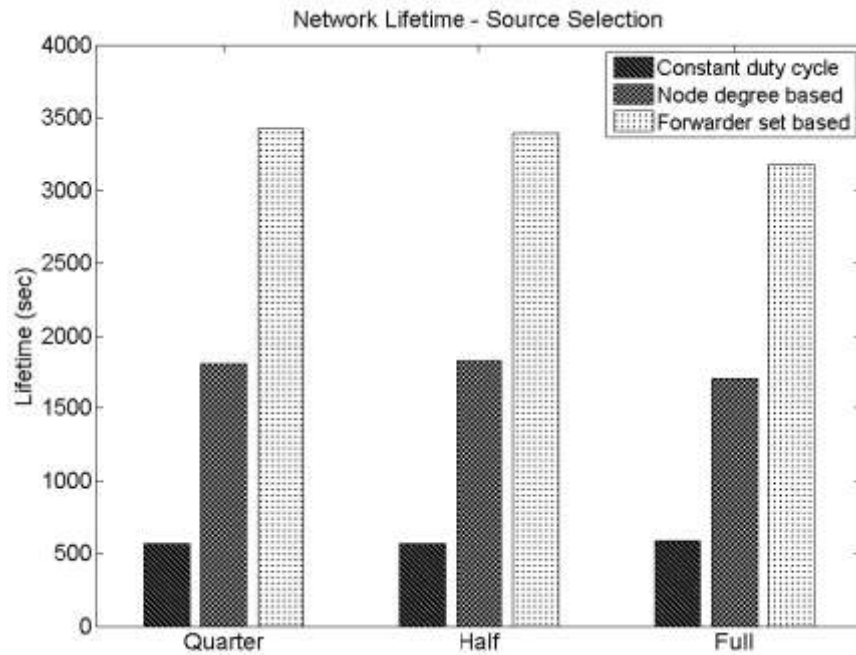


Figura 3. 13: Realización de técnicas bajo diversos casos de selección de fuentes.
Elaborado por: Autor

Enviar un paquete es una de las operaciones que consumen más energía para los nodos sensores. En el caso del primer cuarto, menos número de nodos son considerados fuentes y la ubicación de estos nodos no está cerca del sumidero (sink). Después de un tiempo, los nodos fuente (origen) agotan su energía. Sin embargo, la red puede tolerar la inactividad (muerte) de los nodos fuente. Debido a que los nodos fuente tienen larga distancia para el sumidero (sink), aunque no son críticos para la cobertura de la red.

La diferencia entre la vida útil de la red para tres técnicas no es tan diferente entre sí. Debido a que la métrica de vida útil de la red en la evaluación es la partición de red. La partición de red se produce cuando los nodos críticos agotan su energía. Los tiempos de inactividad (muertos) de los nodos críticos no afectan los casos de selección de nodo fuente. Sin embargo, de extremo a extremo de cada paquete, se obtienen resultados más estables en el caso de la cuarta parte, en comparación con el caso completo. En el caso completo, el nodo de origen puede tener varias distancias de salto para el sumidero

(sink), luego el retardo de extremo a extremo de los paquetes tiene resultados fluctuantes.

3.6. Resultados para la selección de sumidero adaptativo en redes de sensores inalámbricos de múltiples sumideros.

Esta parte se utiliza las WSNs de múltiples sumideros en las evaluaciones. En el escenario de prueba, se implementan 144 nodos en una topología de cuadrícula de $120 \times 120 m^2$ con una distancia entre nodos de 10 m y un rango de transmisión de 15 m. Se supone que los nodos sensores conocen su ubicación exacta con la ayuda de GPS o algoritmos de localización. Hay cuatro sumideros que se colocan en las esquinas de la topología de WSN.

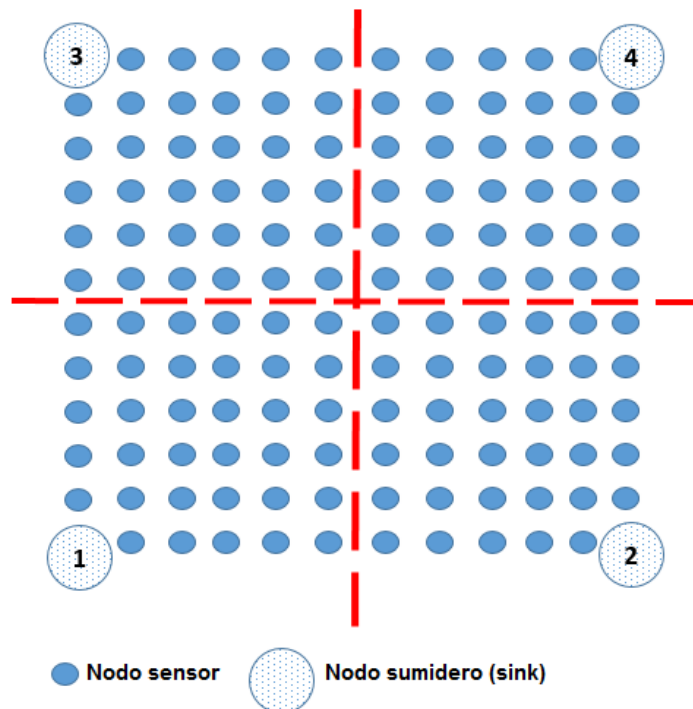


Figura 3. 14: Topología de rejilla multi-sumidero.
Elaborado por: Autor

Cada nodo sensor solo conoce el sumidero que está más cerca de sí mismo y envía su paquete al nodo receptor más cercano utilizando la técnica de reenvío geográfico. Los nodos sensores no tienen información sobre los otros sumideros. Inicialmente, cada sumidero tiene una región de nodos que intentan enviar sus paquetes a sí mismos. La topología de cuadrícula que se emplea en las simulaciones se muestra en la figura 3.14.

Las regiones virtuales se dividen con líneas discontinuas. En la presente evaluación no se adopta ninguna métrica de vida de la red. Por ejemplo, inactividad del primer nodo ya que la vida útil de la red no es una métrica eficiente para WSN de múltiples sumideros. Con la inactividad del primer nodo, este no impide las transmisiones por paquetes a los sumideros, en particular, en WSN de múltiples sumideros.

Cuando la partición de red se establece como tiempo de vida de la red, la selección de sumidero adaptativo en WSN de múltiples sumideros no se puede observar, especialmente después de la inactividad de muchos nodos. Finalmente se define una duración suficiente para las evaluaciones. Las simulaciones se ejecutan hasta 4000 s en las evaluaciones.

La distribución de Poisson se utiliza para la generación de tráfico debido a su propiedad sin memoria. En las evaluaciones, ocurre un evento, luego los paquetes se generan para el evento y se envían al nodo receptor. El tráfico de red se crea en base a la distribución de Poisson. La tasa de distribución media se toma como 1pkts/s. No hay cola en los nodos del sensor debido a la baja tasa de tráfico. Los nodos envían sus medidas al sumidero. Las fuentes se seleccionan de acuerdo con la distribución uniforme en cada tiempo de generación de paquetes.

3.6.1. Escenarios de fallo de nodos.

Se crearon orificios de enrutamiento en escenarios de fallas de nodos, porque el modelo propuesto redirige los paquetes a otros receptores y se puede observar el desempeño del modelo propuesto al enrutar los orificios con precisión. En las evaluaciones se utilizan escenarios sin falla y cuatro escenarios con falla de nodo diferentes. Los nodos rotos (nodos rojos) y su posición en la topología se muestran en la figura 3.15. Los nodos fallan en varios momentos en cada escenario. Para obtener resultados más precisos, todos los nodos fallidos en los escenarios se rompen antes de 500 s del tiempo de simulación. Límite flexible establecido como 2 en el escenario sin fallas, Escenario 1 y Escenario 2 y como 5 en el Escenario 3 y Escenario 4. Dado

que los nodos fallidos en el Escenario 3 y Escenario 4, están más cerca de Sink 4 que en el Escenario # 1 y el Escenario # 2.

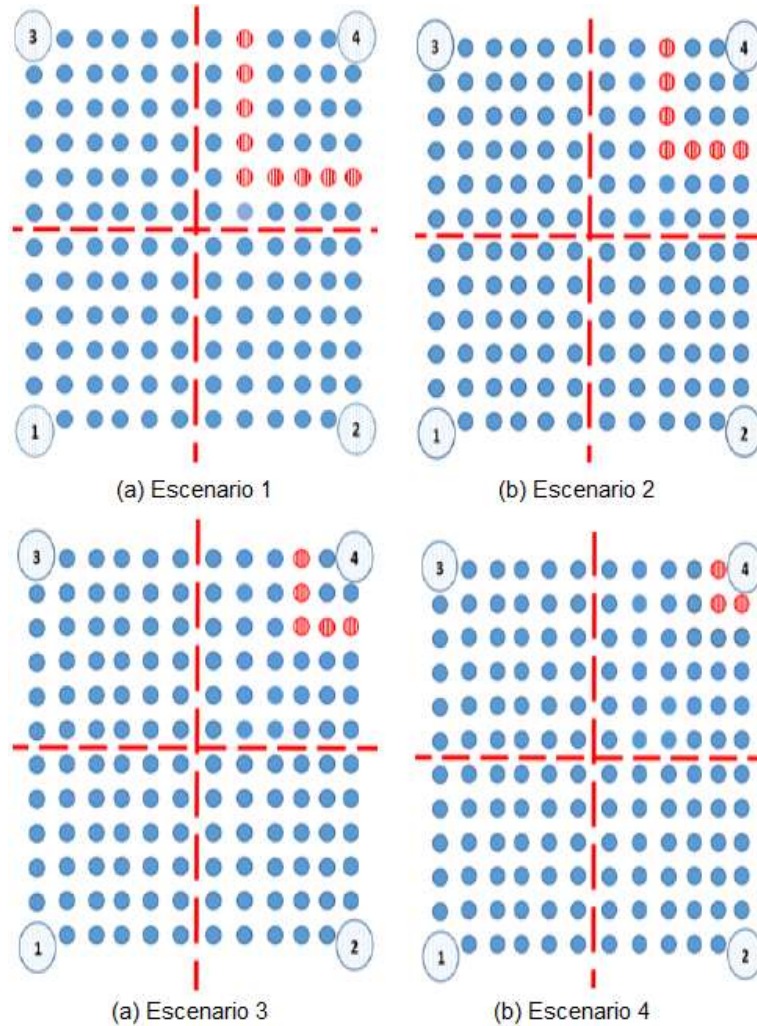


Figura 3. 15: Escenarios de fallo de nodo.
Elaborado por: Autor

3.6.2. Rendimiento

La motivación del modelo propuesto es reducir el número de paquetes perdidos observados con la técnica de reenvío geográfico cuando se producen fallas en los nodos de la WSN.

Como se muestra en la figura 3.16, el modelo propuesto logra un mayor rendimiento en los escenarios de falla de nodos. Cada sumidero tiene regiones virtuales que constan de nodos cuyo sumidero más cercano es el mismo. Cuando se produjo un orificio de enrutamiento en la región del sumidero 4, los nodos en la región del nodo 4 no pueden enviar su paquete al sumidero más cercano.

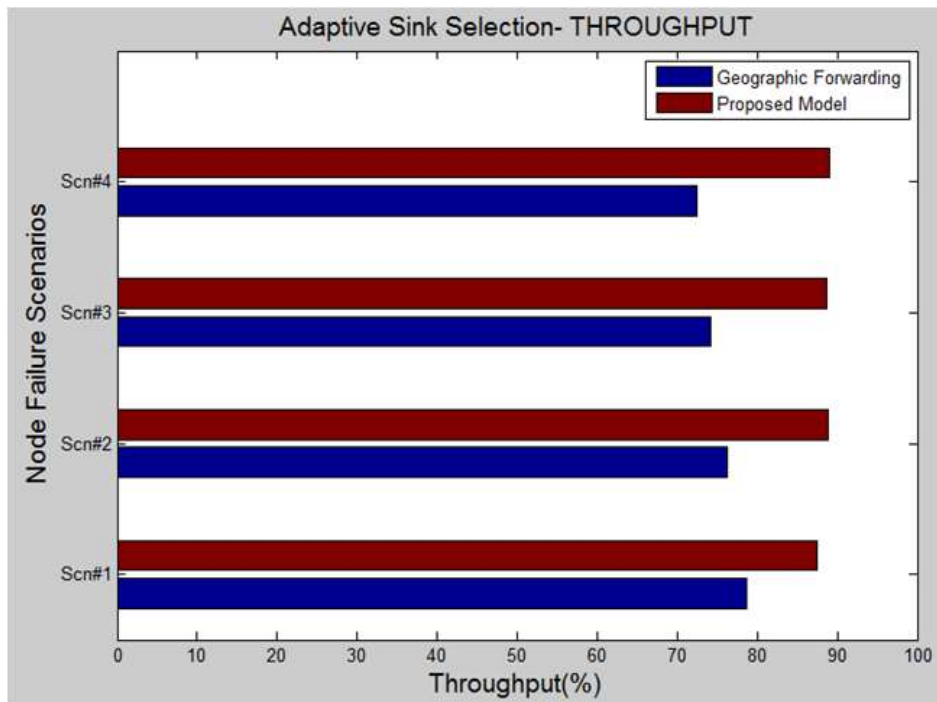


Figura 3. 16: Rendimiento obtenido por técnica propuesta y reenvío geográfico.
Elaborado por: Autor

La tasa de pérdida de paquetes aumenta drásticamente. En el reenvío geográfico, la tasa de pérdida de paquetes es de aproximadamente el 25%. Las técnicas propuestas tienen como objetivo reducir la pérdida de paquetes en el caso de orificios de enrutamiento al reenviar los paquetes a otros receptores.

La distancia del agujero de enrutamiento al nodo sumidero (sink) aumenta paso a paso desde el Escenario # 1 al Escenario # 4. El modelo propuesto redirige los paquetes a otro nodo sumidero sucesivamente y aumenta el rendimiento en el caso de orificio de enrutamiento. El rendimiento se incrementa lo suficiente al estimar las fallas de los nodos y al redireccionar los paquetes a otros receptores en cada escenario de falla de nodos.

3.6.3. Retardo.

En el esquema propuesto, los paquetes se envían a los otros receptores para reducir la tasa de caída de paquetes en caso de fallas de nodo. Naturalmente, a medida que aumenta el número de saltos necesarios para el sumidero, también aumenta el retardo de extremo a extremo. Aquí, la

degradación en el retardo es tolerable en comparación con las tasas reducidas de pérdida de paquetes. Además, se establece el TTL (tiempo de vida) para cada nodo para evitar un retraso E2E (extremo a extremo) más prolongado. Si el paquete se reenvía a través de rutas más largas como resultado de estimaciones engañosas sobre la falla del nodo, los paquetes se eliminan después de alcanzar el TTL.

Cuando se redireccionan los paquetes a otros receptores, se incrementan el número de saltos entre el origen y el destino. La degradación por retardo en comparación con el reenvío geográfico es un resultado esperado. Así se compara el retardo en el rendimiento entre las regiones virtuales. En la figura 3.17, se presentan las regiones virtuales que son creadas por nodos de sumidero. Por ejemplo, el sumidero más cercano de los nodos en la Región # 1 es Sink 1. Luego, la región que consta de los nodos cuyo sumidero más cercano es Sink 1, se llama Región # 1.

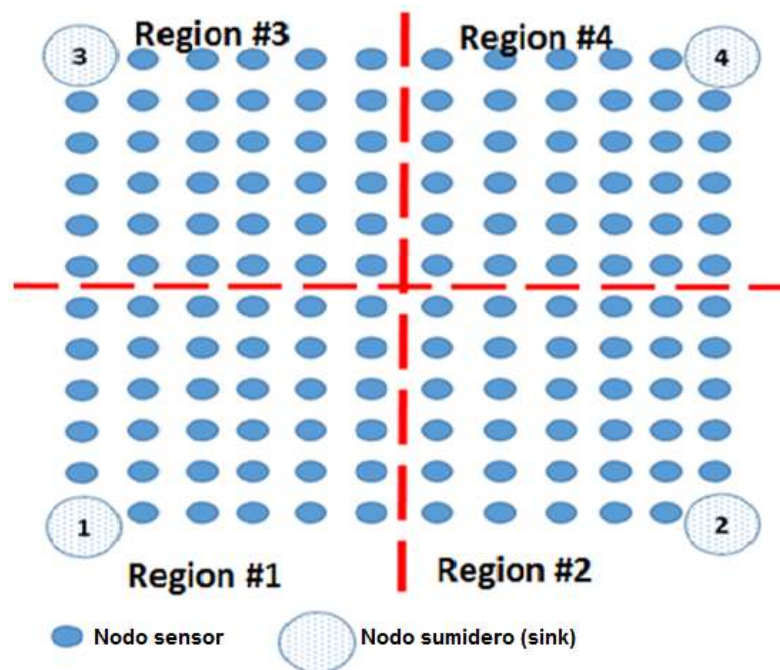


Figura 3. 17: Las regiones virtuales son creadas por los sumideros.
Elaborado por: Autor

En la figura 3.18 se compara el rendimiento de retardo de cuatro regiones. El retardo E2E de la Región # 4 es mayor que el de otras regiones debido a los orificios de enrutamiento ocurridos en la Región # 4. El retardo E2E de la Región # 4 es el más alto en el Escenario # 4 en comparación con

otros escenarios de falla de nodo. Debido a que los orificios de enrutamiento ocurrieron más cerca del sumidero que los otros escenarios de falla de nodo. Por lo tanto, se observa una mayor cantidad de saltos entre el origen y destino cuando se redireccionan los paquetes a otros receptores.

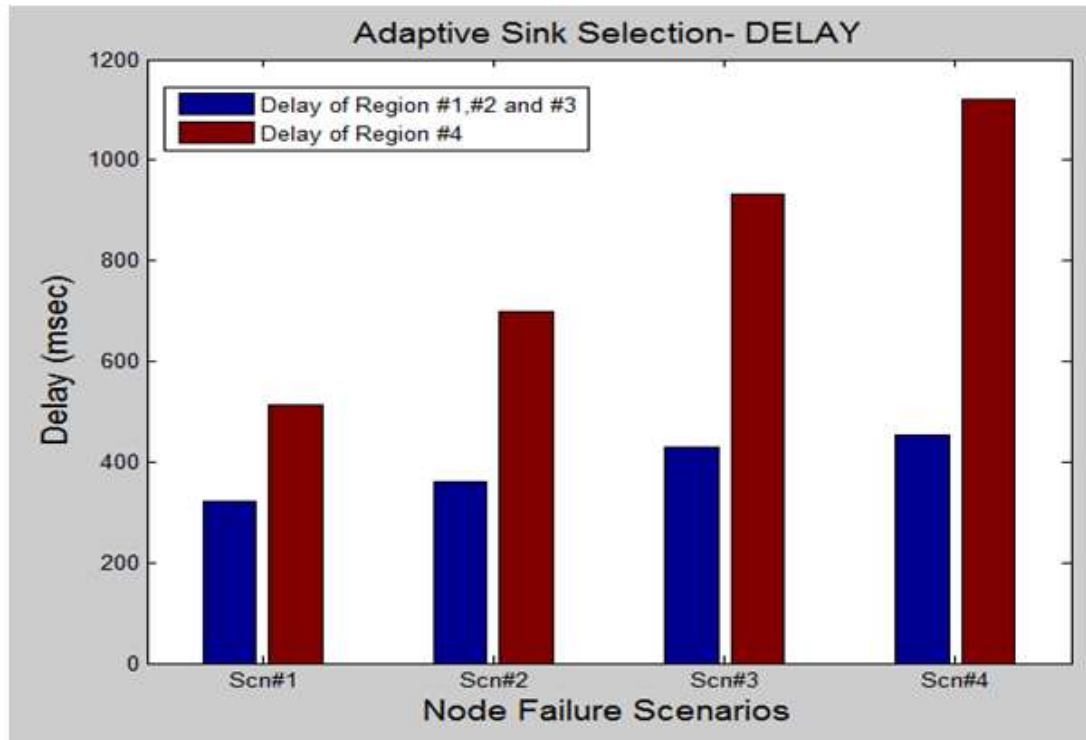


Figura 3. 18: Retraso obtenido por la técnica propuesta para regiones virtuales.
Elaborado por: Autor

El rendimiento de retardo más alto ocurre en las Regiones # 1, # 2 y # 3 y también se observa en el Escenario #4. El número de paquetes redireccionados aumenta, cuando el orificio de enrutamiento ocurre más cerca del sumidero. Luego, la tasa de tráfico en otras regiones aumenta debido a los paquetes redireccionados. Por lo tanto, el retardo E2E de la Región # 1, # 2 y # 3 se incrementa a medida que los resultados den una mayor tasa de tráfico en su región.

Conclusiones

Este trabajo de titulación presenta una investigación sobre WSN autoorganizados. Los nodos establecen sus ciclos de trabajo y conjuntos de reenviadores en función de las estadísticas que se obtienen de la capa de red. Debido a que la coordinación entre los nodos vecinos necesita la transmisión de paquetes y causa la sobrecarga de la comunicación. Además, la comunicación con el sumidero para la coordinación no es sólida para las WSNs a gran escala.

El ciclo de trabajo se usa ampliamente para la eficiencia energética. Se propone un ajuste dinámico del ciclo de trabajo para equilibrar la energía y prolongar la vida útil de la red. Los nodos no necesitan comunicar a sus vecinos cuando actualizan sus ciclos de trabajo en función de estar en el conjunto de reenviadores, ganando el período de contención y energía restante. También, se compara el modelo propuesto con el ciclo de trabajo constante y el ciclo de trabajo basado en el grado de nodo. El esquema de ciclo de trabajo dinámico propuesto supera el ciclo de trabajo constante con una vida útil seis veces más larga y un ciclo de trabajo basado en grados de nodo con una vida útil dos veces más larga. Además, la energía restante de los nodos después de la partición de la red está más equilibrada en el modelo propuesto en comparación con el ciclo de trabajo constante y el ciclo de trabajo basado en el grado de nodo. El rendimiento del retardo no se degrada significativamente en comparación con el ciclo de trabajo constante. Además, el modelo propuesto obtiene un rendimiento de retardo similar con el esquema de ciclo de trabajo basado en el grado de nodo.

En segundo lugar, la selección de sumidero adaptativo es realizada por cada nodo sensor en el caso de fallas de nodo para WSN de sumidero múltiple. Nuestro objetivo es evitar la pérdida de paquetes debido a agujeros de enrutamiento y fallas de nodos. El modelo propuesto redirigió los paquetes a otros sumideros y evitó la pérdida de paquetes de una manera autoorganizada. Cuando el nodo tiene un paquete para transmitir, envía preámbulos.

Recomendaciones

A través del trabajo realizado se realizan las propuestas de trabajos futuros recomendados:

1. Simulación del protocolo MAC adaptativo de bajo consumo de energía para redes de sensores inalámbricos.
2. Enrutamiento oportunista energéticamente eficiente en redes inalámbricas de sensores

Bibliografía

- Akkaya, K., & Younis, M. (2005). A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 3(3), 325–349. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2003.09.010>
- Bispo, K., Rosa, N., & Cunha, P. (2015). SITRUS: Semantic Infrastructure for Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 15(11), 27436–27469. <https://doi.org/10.3390/s151127436>
- Díez, I. D. la T., Alonso, C. M. B., Castillo, G., & Alvarez, A. B. (2018). Estudio de la Seguridad en Redes de Sensores Corporales aplicadas al Ámbito Sanitario. *KnE Engineering*, 3(1), 784. <https://doi.org/10.18502/keg.v3i1.1500>
- Elhabyan, R., Shi, W., & St-Hilaire, M. (2019). Coverage protocols for wireless sensor networks: Review and future directions. *Journal of Communications and Networks*, 21(1), 45–60. <https://doi.org/10.1109/JCN.2019.000005>
- Flores M., M., Flores G. Francisco, Velasco M., V., González C., G., & Jurado Z., F. (2015). Monitoreo de humedad en suelo a través de red inalámbrica de sensores. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(5), 75–88.
- Forouzandeh, F. F., Mohamed, O. A., Sawan, M., & Awwad, F. (2009). TBCD-TDM: Novel Ultra-Low Energy Protocol for Implantable Wireless Body Sensor Networks. *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2009.5425815>
- Ghosh, R. (2016). Comparative Performance Analysis of Routing Protocols in Wireless Sensor Network. *International Journal of Sensor Networks and*

Data Communications, 05(04). <https://doi.org/10.4172/2090-4886.1000148>

Goyal, R., & Khandnor, P. (2017). Routing protocols based on sink mobility in wireless sensor networks—A review. *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2131–2135. <https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2017.8300137>

Verdone, R. (Ed.). (2008). *Wireless sensor and actuator networks: Technologies, analysis and design*. Amsterdam: Academic Press.

Xu, G., Shen, W., & Wang, X. (2014). Applications of Wireless Sensor Networks in Marine Environment Monitoring: A Survey. *Sensors*, 14(9), 16932–16954. <https://doi.org/10.3390/s140916932>

Yang, X., Deng, D., & Liu, M. (2015). An overview of routing protocols on Wireless Sensor Network. *2015 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, 1000–1003. <https://doi.org/10.1109/ICCSNT.2015.7490905>

Yi, W., Lo, K., Mak, T., Leung, K., Leung, Y., & Meng, M. (2015). A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems. *Sensors*, 15(12), 31392–31427. <https://doi.org/10.3390/s151229859>

Zheng, J., & Jamalipour, A. (Eds.). (2009). *Wireless sensor networks: A networking perspective*. Piscataway, NJ : Hoboken, N.J: IEEE ; Wiley.



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Pérez Baque, Fabricio Xavier** con C.C: # 091705691-3 autor del trabajo de titulación: Evaluación del rendimiento de técnicas de enrutamiento en redes de sensores inalámbricos, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

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

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

Guayaquil, 24 de septiembre del 2019

f. _____

Nombre: **Pérez Baque, Fabricio Xavier**

C.C: 091705691-3



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



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

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

| | | | |
|---|--|--|----|
| TÍTULO Y SUBTÍTULO: | Evaluación del rendimiento de técnicas de enrutamiento en redes de sensores inalámbricos. | | |
| AUTOR(ES) | Pérez Baque, Fabricio Xavier | | |
| REVISOR(ES)/TUTOR(ES) | M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; M. Sc. Zamora Cedeño, Néstor Armando / M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando | | |
| INSTITUCIÓN: | Universidad Católica de Santiago de Guayaquil | | |
| FACULTAD: | Sistema de Posgrado | | |
| PROGRAMA: | Maestría en Telecomunicaciones | | |
| TÍTULO OBTENIDO: | Magister en Telecomunicaciones | | |
| FECHA DE PUBLICACIÓN: | 24 de septiembre del 2019 | No. DE PÁGINAS: | 64 |
| ÁREAS TEMÁTICAS: | Teoría de la Comunicación, Comunicaciones Inalámbricas, Sistemas de Comunicaciones | | |
| PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS: | Métricas, Rendimiento, Sensores, WSN, Enrutamiento, Técnicas | | |
| RESUMEN/ABSTRACT: | <p>El presente trabajo consistió en realizar la evaluación del rendimiento de técnicas de enrutamiento en redes de sensores inalámbricos (WSN). Las WSNs son la tecnología que más se investiga en la actualidad, para lo cual se realizó la búsqueda de información y se encontraron una variedad de trabajos investigativos publicados en repositorios digitales (tesis de pregrado y posgrado) y en revistas científicas. A partir de esto, se procedió a investigar sobre los beneficios de una WSN y entre tantos, se analizó el consumo de energía en las WSNs. Inicialmente, el trabajo se define el problema a investigar, así como el objetivo general, objetivos específicos y la hipótesis. También, se realizó una breve descripción de los fundamentos teóricos de las redes inalámbricas, como visión general, diversas aplicaciones de WSNs, limitaciones, requisitos, desafíos y de las métricas de calidad en WSNs. Finalmente, se propusieron dos técnicas basadas en enrutamiento para evaluar el rendimiento de una WSN.</p> | | |
| ADJUNTO PDF: | <input checked="" type="checkbox"/> SI | <input type="checkbox"/> NO | |
| CONTACTO CON AUTOR/ES: | Teléfono: +593998282901 | E-mail: fabricioxpb@yahoo.com | |
| CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE): | Nombre: Manuel Romero Paz | | |
| | Teléfono: 0994606932 | | |
| | E-mail: mromeropaz@yahoo.com | | |
| SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA | | | |
| Nº. DE REGISTRO (en base a datos): | | | |
| Nº. DE CLASIFICACIÓN: | | | |
| DIRECCIÓN URL (tesis en la web): | | | |