



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA**

**CALIDAD DE SENSADO Y EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN REDES DE SENSORES
INALÁMBRICOS (WSN)**

Tesista:

Luis Orlando Philco Asqui

Director:

Luis Armando Marrone (UNLP)

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS INFORMÁTICAS
FACULTAD DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Septiembre, 2023

Dedicatoria

A Dios, a Maura mi esposa, Matt mi hijo, por darme amor, paciencia y ese entusiasmo vital para culminar esta tesis doctoral.

A Rosa mi madre y Gerardo (+) mi padre quienes me forjaron con valores y sobre todo en la determinación para alcanzar metas.

Agradecimientos

A mi director de tesis Luis Marrone por su acertada dirección en la culminación de esta tesis doctoral en Ciencias Informáticas.

A las autoridades de la Facultad de Informática de la UNLP, profesores y personal de secretaría de la carrera de Doctorado en Ciencias Informáticas.

Glosario

3HA: Hybrid Hole Healing Algorithm

4TQS: Four Tiers Over Quality of Sensing

6LoWPAN: Ipv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks

ABC: Artificial Bee Colony Algorithm

AloTI: Alliance for IoT Innovations

AMQP: Advanced Message Queuing Protocol

AODV: Ad hoc On-Demand Distance Vector

API: Application Programming Interface

Base Station: Estación Base

CH: Cluster Head

CHDR: Cover Hole Detection and Repair

CoAP: Constrained Application Protocol

DSDV: Destination Sequence Distance Vector

DTMR: Delay Tolerance Multipath Routing

ECOSR: Enhanced Coverage Overlapping Sensing Ratio

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

FoI: Field of interest

HAHP: Hybrid Analytical Hierarchy Process

HTTP: Hypertext Transfer Protocol

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT: Internet of Things

KCEA: K-Coverage Enhancement Algorithm

LEACH: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

LoWPAN: Low Power Wireless Personal Area Networks

MAC: Medium Access Control

MA-SARSA: Multi-Agent SARSA

MiA-CODER: Multi-Intelligent Agent-Enabled Reinforcement Learning For Accurate Coverage Hole Detection and Recovery

MN: Mobile Node

MoBWo: Multi-Objective Black Widow

MOFPL: Multi-Objective Fractional Particle Lion

MQTT: Message Queuing Telemetry Transport
MTE: Minimum Total Energy
NFAP: Neuro-Fuzzy based Affinity Propagation
NSGA-II: Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II)
PSO: Particle Swarm Optimization
QoE: Quality of Experience
QoS: Quality of Service
QoSensing: Quality of Sensng
RSSI: Received Signal Strength Indicator
SARSA: State–Action–Reward–State–Action
SN: Static Node
SPIN: Sensor Protocols for Information via Negotiation)
TEEN: Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols
TE2BP: Tsallis Entropy Enabled Bayesian Probability
USCT: Unequal Sierpinski Cluster-Tree
WSN: Wireless Sensor Network
ZRP: Zone Routing Protocol

Resumen

En las redes de sensores inalámbricos (WSN), con despliegues aleatorios se producen agujeros de cobertura y mayormente originan zonas desatendidas (sin cobertura) y ocasionan errores entre los datos recolectados del nodo sensor. Para adquirir datos con precisión, es posible que sea necesario colocar sensores en ubicaciones específicas, pero en despliegues realistas esto no sucede así. Los datos son el puente entre la red y el mundo físico, y la calidad de los datos tiene un impacto importante en la aplicación.

Cuando el conjunto de datos no es confiable debido a numerosos errores en la red es necesario mejorar la calidad de los datos. Los errores entre los datos aparecen de diferentes modos, por ejemplo, la pérdida de datos por distancia indebida en ubicación entre los nodos para su comunicación, la falla o caída de datos debido a retrasos en la transmisión. Entonces se requiere que los datos se entreguen a la estación base o nodo sumidero sin ninguna pérdida de información, sin embargo, el conjunto de datos recopilado por el nodo sumidero puede dar lugar a la vez a estos errores antes mencionados. Estos problemas causan consumos de energía desequilibrados y acortan significativamente la vida útil de la red.

Las WSN operan muchas veces en un modo desatendido y, en muchos escenarios de difícil acceso, por aquello es imposible reemplazar la batería inservible del nodo después del despliegue. Un nodo sensor muere por el agotamiento prematuro de la energía en su batería y producirá en una región específica, la partición de la red o crea huecos de energía. Esto en la literatura científica se denomina agujeros de cobertura. Esto se define como la cantidad del área dentro del campo o región de interés que no está cubierta por ningún sensor 'vivo'. Los agujeros también pueden ser creados por las operaciones dinámicas de los nodos sensores con movilidad.

Los agujeros de cobertura definitivamente aparecen en escenarios con despliegue realistas de los nodos, por lo tanto, la calidad del sensado de los datos dan como efecto una WSN con derroche de energía o elevado costo energético. Para este autor el diseño de estrategias de calidad de sensado para objetivos móviles en WSN tanto en topología estrella, malla y de tipo árbol es la motivación de esta tesis doctoral. La metodología de esta tesis tiene enfoque: cuantitativo de tipo pre experimental (basada en la simulación y resultados). Como métodos de investigación: descriptiva (teoría), explorativa (simulación) y explicativa (resultados).

Se plantean dos aportaciones; la primera destinada a una WSN con topología estrella y malla con despliegue aleatorio y con un sumidero estático y recopilación de datos utilizando un enfoque basado en nodos estático y movilidad de algunos nodos. Mediante un esquema de cuatro fases o niveles por cada fase hay un algoritmo que mejoran la calidad de sensado y se complementan con un óptimo enrutamiento entre los nodos. La segunda aportación es un mecanismo por

aprendizaje de refuerzo habilitado por agentes inteligentes en topología de clústeres desiguales que por esta condición las operaciones de los nodos mayormente son dinámicas. Para la calidad de sensado se empleó métricas como tasa de cobertura, número de nodos muertos. Además de métricas de enrutamiento como throughput, retardo de paquetes, de tal forma que involucrando la calidad de sensado más técnicas eficientes de ruteo se alcance un consumo de energía eficiente para todos los nodos de la red.

Palabras claves: WSN, Calidad de Sensado. Eficiencia Energética, 4TQS. MiA-CODER

Abstract

In wireless sensor networks (WSN), with random deployments coverage holes occur and mostly cause unattended areas (no coverage) and cause errors among the data collected from the sensor node. To accurately acquire data, sensors may need to be placed in specific locations, but in realistic deployments this is not the case. Data is the bridge between the network and the physical world, and data quality has a major impact on the application.

When the data set is unreliable due to numerous errors in the network, it is necessary to improve the quality of the data. Errors between data appear in different ways, for example, loss of data due to improper distance in location between nodes for communication, failure or drop of data due to delays in transmission. The data is then required to be delivered to the base station or sink node without any loss of information, however, the data set collected by the sink node may in turn give rise to these aforementioned errors. These problems cause unbalanced energy consumption and significantly shorten the lifespan of the network.

WSN often operate in an unattended mode and, in many hard-to-reach scenarios, making it impossible to replace the dead battery in the node after deployment. A sensor node dies from premature depletion of power in its battery and will produce in a specific region, partition the network or create power gaps. This is called coverage holes in the scientific literature. This is defined as the amount of area within the field or region of interest that is not covered by any 'live' sensor. Holes can also be created by the dynamic operations of mobile sensor nodes.

Coverage holes definitely appear in scenarios with realistic deployment of the nodes; therefore, the quality of the sensing data results in a WSN with energy waste or high energy cost. For this author, the design of quality sensing strategies for mobile targets in WSN in star, mesh and tree-type topologies is the motivation of this doctoral thesis. The methodology of this thesis has an approach: quantitative of pre-experimental type (based on simulation and results). As research methods: descriptive (theory), explorative (simulation) and explanatory (results).

Two contributions are raised; the first intended for a WSN with star and mesh topology with random deployment and with a static sink and data collection using an approach based on static nodes and mobility of some nodes. Through a scheme of four phases or levels for each phase, there is an algorithm that improves the quality of sensing and is complemented by optimal routing between the nodes. The second contribution is a mechanism for reinforcement learning enabled by intelligent agents in unequal cluster topology that, due to this condition, the operations of the nodes are mostly dynamic. For the quality of sensing, metrics such as coverage rate, number of dead nodes were used. In addition to routing

metrics such as throughput, packet delay, in such a way that involving the quality of sensing plus efficient routing techniques, efficient energy consumption is achieved for all nodes in the network.

Keywords: WSN, Quality of sensing. Energy efficiency, 4TQS. MiA-CODER

Índice General

Glosario	III
Resumen	V
Abstract	VII
Índice de Figuras	XIII
Índice de Tablas	XVI
CAPÍTULO 1:	15
INTRODUCCIÓN	15
1.1 Contexto y Motivación	16
1.2. Objetivos y preguntas de investigación	18
1.2.1 Objetivos Específicos.....	18
1.3 Contribución	18
1.4 Publicaciones	19
1.5 Estructura de la tesis:	19
CAPÍTULO 2:	22
ESTADO DEL ARTE EN WSN	22
2.1 Funcionamiento de una WSN.....	23
2.2 Clasificación de WSN	26
2.3 Infraestructura de red WSN.....	27
2.3.1 Topología de WSN.....	28
2.4 Sensado en WSN.....	30
2.5 Enrutamiento en WSN.....	32
2.5.1 Clasificación de protocolos de enrutamiento para WSN	34
2.5.1.1 Protocolos basados en la organización de red	35
2.5.1.2 Protocolos por descubrimiento de ruta	36
2.5.1.3 Protocolos de enrutamiento basados en su operación	38
2.6 WSN y la Interoperabilidad.....	39
2.6.1 Interoperabilidad Técnica.....	41
2.7 Heterogeneidad en IoT	42
2.7.1 El papel de la estandarización IoT	44
2.8 Arquitectura IoT	45
2.8.1 Arquitectura IoT de tres capas	46

2.8.2 Arquitectura IoT de cinco capas	47
2.8.2.1 Capa Middleware en IoT	48
2.9 Computación en la nube en arquitectura IoT	49
2.9.1 Arquitectura IoT de la computación en niebla	51
CAPÍTULO 3:	52
DESCRIPCIÓN DE LA CALIDAD DE SENSADO EN WSN	52
3.1 Consumo de energía en nodos de una WSN	54
3.1.1 Requisitos para desempeño conveniente en WSN	55
3.2 La cobertura de detección en WSN	56
3.3 Modelos de detección	56
3.3.1 Despliegue Aleatorio vs. Determinístico	57
3.3.2 Homogéneas vs. Heterogéneas	57
3.3.3 Direccional Vs. Omni-direccionales	58
3.4 Criterios de cobertura en WSN con despliegue aleatorio	59
3.4.1 Agujeros de cobertura	60
3.4.2 Diseño de estrategia contra agujeros de cobertura	62
3.5 Criterios de consumo energético WSN	63
CAPÍTULO 4:	64
DISEÑO Y EVALUACIÓN DE CALIDAD DE SENSADO PARA WSN EN TOPOLOGÍAS ESTRELLA Y MALLA	64
4.1. Trabajos relacionados	65
4.2 Propuesta	69
4.2.1 Fase de agrupación en clústeres	70
4.3 Fase de programación de suspensión	73
4.4 Fase de mejora de la cobertura	74
4.5 Fase de enrutamiento	77
4.6 Evaluación Experimental	78
4.6.1 Entorno de simulación	78
4.6.2 Métricas de Cobertura	80
4.6.2.1 Tasa de cobertura (<i>Coverage Rate: C Rate</i>)	80
4.6.3 Métrica de evaluación de desempeño	80
4.6.3.1 Relación de conectividad (<i>Connectivity ratio: C ratio</i>)	80

4.6.3.2 Retardo de extremo a extremo (<i>E2E Delay</i>).....	80
4.6.3.3 Rendimiento (<i>Throughput: Thr</i>).....	81
4.6.4 Métrica de consumo energético.....	81
4.6.4.1 Consumo de energía (Energy Consumption: EC).....	81
4.7 Análisis de QoSensing	81
4.7.1 Análisis de la tasa de cobertura (Coverage rate).....	81
4.7.2 Análisis de la relación de conectividad (<i>Connectivity ratio</i>).....	82
4.7.3 Análisis de retardo extremo a extremo (E2E Delay)	83
4.7.4 Análisis del rendimiento o Throughput.....	84
4.7.5 Análisis del consumo de energía (Energy consumption)	84
4.8 Evaluación sobre otros métodos	85
4.9 Discusión.....	86
CAPÍTULO 5:	87
DISEÑO Y EVALUACIÓN DE ALGORITMOS EN QoSENSING PARA TOPOLOGÍA BASADA EN CLÚSTERES	87
5.1 Motivación y objetivos	88
5.1.1 Contribuciones de la propuesta	88
5.2 Trabajos relacionados en WSN con topología de clústeres	89
5.3 El problema principal en WSN con topología de clústeres	92
5.4 Trabajo propuesto	96
5.5 Construcción de topología de árbol de clústeres desiguales.....	96
5.6 Programación dinámica del sueño	101
5.7 Detección y reparación de agujeros de cobertura	102
5.8 Evaluaciones	107
5.8.1 Configuración de simulación	107
5.8.2 Análisis	109
5.8.2.1 Impacto de la tasa de cobertura	109
5.8.2.2 Impacto del número de nodos muertos	110
5.8.2.3 Impacto del rendimiento	111
5.8.2.4 Impacto de la fiabilidad	112
5.8.2.5 Impacto del consumo medio de energía	116
5.9 Discusión.....	117

CAPÍTULO 6:	118
CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS	118
Conclusiones	119
Referencias	121
Apéndice A: Artículos publicados en revistas.....	132
Producción científica 1	132
Producción científica 2	134
Producción científica 3	136
Apéndice B: Artículos de conferencia.....	138
Apéndice C: Capturas en Network Simulator 3	143

Índice de Figuras

Capítulo 1.

Figura 1. 1 Estructura de la tesis	21
--	----

Capítulo 2.

Figura 2. 1. Esquema general de funcionamiento de una WSN.	23
---	----

Figura 2. 2. Comunicación entre sensores localizados en diferentes zonas geográficas.....	24
---	----

Figura 2. 3 Escenarios de detección y monitoreo con WSN.....	25
--	----

Figura 2. 4 Topologías en WSN.....	28
------------------------------------	----

Figura 2. 5 Topologías (a) de red jerárquica y (b) de red plana o malla	29
---	----

Figura 2. 6. Modelos de enrutamiento (a) salto único/estrella (b) múltiples saltos	30
--	----

Figura 2. 7. (a) Cobertura de área. (b) Cobertura de objetivo/punto.	31
---	----

Figura 2. 8 Cobertura de barrera (a) fuerte y (b) débil	32
---	----

Figura 2. 9 Clasificación de los protocolos de enrutamiento.....	34
--	----

Figura 2. 10. Dispositivos no interoperables que utilizan el mismo estándar.	41
---	----

Figura 2. 11 La heterogeneidad en IoT	43
---	----

Figura 2. 12 Arquitecturas referenciales para IoT de 3 y 5 capas.....	47
---	----

Figura 2. 13. El cloud convencional	49
---	----

Figura 2. 14 Escenario IoT y cloud computing	50
--	----

Capítulo 3.

Figura 3. 1. Nodo sensor.....	53
-------------------------------	----

Figura 3. 2. Mota TelosB modelo CM5000	55
--	----

Figura 3. 3 Despliegue determinista (a) y despliegue aleatorio (b) en WSN.	57
---	----

Figura 3. 4. Red WSN con nodos heterogéneos	58
---	----

Figura 3. 5 Nodos con diferente rango de sensado.....	58
---	----

Figura 3. 6. Nodos Omnidireccional y Direccional en WSN	59
---	----

Figura 3. 7 Agujero de cobertura en área supervisada.....	61
Figura 3. 8 Escenarios con agujeros de cobertura y conectividad por muerte del nodo D.....	61
Figura 3. 9 Escenario de nodos redundante en WSN.....	62
Figura 3. 10 Escenario con dirección de movimiento de un nodo sensor	62
Capítulo 4.	
Figura 4. 1 Arquitectura WSN con nodos estáticos y móviles	70
Figura 4. 2. Proceso neuro difuso en NFPA	71
Figura 4. 3 Algoritmo 1, NFAP basado en agrupamiento.....	72
Figura 4. 4 (a) Programación de sueño para SNs de baja prioridad (b) Programación de sueño para SNs de alta prioridad.....	73
Figura 4. 5. Pasos en ESLS	74
Figura 4. 6. Algoritmo 2, HAHP de mejora de la cobertura	77
Figura 4. 7. Pasos involucrados en el algoritmo DTMR.....	78
Figura 4. 8. WSN con topología estrella visto en NS.3	79
Figura 4. 9. WSN con topología malla visto en NS.3	79
Figura 4. 10 <i>Coverage rate</i> o tasa de cobertura	82
Figura 4. 11. <i>Connectivity ratio</i> o relación de conectividad	82
Figura 4. 12. <i>E2E Delay</i> o retardo extremo a extremo.....	83
Figura 4. 13. Throughput o rendimiento en dos topologías de WSN.....	84
Figura 4. 14. <i>Energy consumption</i> o energía consumida	85
Capítulo 5.	
Figura 5. 1. Arquitectura general de la propuesta para WSN	96
Figura 5. 2 Pseudocódigo de formación de clústeres	97
Figura 5. 3 Topología árbol de clústeres de Sierpinski desigual	98
Figura 5. 4 Pseudocódigo para la selección de la cabeza del grupo	101

Figura 5. 5 Pseudocódigo para la selección óptima del nodo móvil	104
Figura 5. 6 Detección y reparación de agujeros de cobertura	105
Figura 5. 7 Pseudocódigo: Reparación de agujeros de cobertura	106
Figura 5. 8 Diagrama de flujo de MiA-CODER.....	107
Figura 5. 9. Número de nodos frente a tasa de cobertura.....	109
Figura 5. 10. Tiempo de simulación frente a tasa de cobertura	110
Figura 5. 11. Tiempo de simulación frente a número de nodos muertos.....	111
Figura 5. 12. Throughput frente al número de nodos sensores.....	112
Figura 5. 13. Paquetes transmitidos (antes de reparación del agujero) vs tiempo de simulación	113
Figura 5. 14. Paquetes recibidos (antes de reparación del agujero) vs tiempo de simulación.....	113
Figura 5. 15. Paquetes de control (antes de reparación del agujero) vs. tiempo de simulación.....	114
Figura 5. 16 Paquetes transmitidos (después de reparación del agujero) vs. tiempo de simulación	115
Figura 5. 17. Paquetes recibidos (después de reparación del agujero) vs. tiempo de simulación	115
Figura 5. 18. Paquetes de control (después de reparación del agujero) vs. tiempo de simulación	116
Figura 5. 19. Tiempo de simulación vs. promedio. consumo de energía.....	117

Índice de Tablas

Capítulo 3.

Tabla 3. 1. Perfil de consumo energético de sensores TelosB.	54
---	----

Capítulo 4

Tabla 4. 1 Parámetros de simulación en NS-3.....	78
--	----

Tabla 4. 2 Comparativa de 4Tier con otros métodos	85
---	----

Capítulo 5.

Tabla 5. 1. Síntesis de investigación en trabajos anteriores	95
--	----

Tabla 5. 2 Consumo de energía en la programación del sueño.....	102
---	-----

Tabla 5. 3. Configuración del sistema.....	108
--	-----

Tabla 5. 4 Parámetros de simulación.....	108
--	-----

Tabla 5. 5. Datos cuantitativos de la tasa de cobertura	110
---	-----

Tabla 5. 6. Número de análisis de nodos muertos	111
---	-----

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto y Motivación

Dentro de una WSN con despliegue aleatorio y con nodos sensores estáticos y móviles la mejora en la recolección de datos contribuye en la vida útil de una WSN. El proceso de detección o registro de datos podría llegar a ser una etapa con consumo de energía crítico. Encontrar mejoras a esta etapa está relacionado con la calidad de sensado¹ o detección (Quality of Sensing en inglés).

En el presente trabajo doctoral mi motivación principal es la propuesta de mecanismos de mejoras en detección o localización de agujeros de cobertura junto con conectividad equilibrada donde se reduzcan pérdida de información, asegurando un mínimo consumo de energía entre los nodos de la red. Se sabe que la fuente de energía para los nodos sensores es una batería, y generalmente no es recargable ni reemplazable.

El agotamiento prematuro de la energía en los nodos produce en una región determinada la división de la red o crean agujeros de cobertura (Sharmin, Karmaket, Lambert, & Alam, 2020). El factor principal para la formación de agujeros de cobertura es el despliegue de los nodos sensores de manera aleatoria o no estructurada, el nodo sensor puede quedar aislado cuando se forman agujeros de cobertura. (Antil & Malik, 2014), (Jam, Farman, & Javed, 2017) y (Hajjej & Zaied, 2020)

Cuando la energía en un nodo se drena de forma no controlada, entonces en poco tiempo se le agota su energía y ‘muere’, dentro de la red. Por lo tanto, es vital evitar los agujeros de cobertura de manera efectiva. Cuando se produce un agujero de cobertura, el rango de detección de los nodos cercanos se maximiza para cubrir el área descubierta. Sin embargo, exige un alto costo en términos de consumo de energía y conectividad en la red. La detección de agujeros de cobertura ayuda a identificar vías de comunicación alternativas y ayuda a regular el flujo de tráfico de datos. La ausencia de algoritmos de detección de agujeros eventualmente causará problemas en el enrutamiento. (Sahoo, Chiang, & Wu, 2016) y (Zhuo, Liu, Zhou, & Tian, 2021).

En un despliegue WSN estructurado, todos o algunos de los nodos de sensores se colocan de una manera pre planificada, lo que significa la

¹ Es importante aclarar que según la Real Academia de la Lengua Española (RAE), la palabra sensar no es reconocida en el idioma español, pero no quiere decir que no se la pueda utilizar, en este caso, el sustantivo sensado es la adaptación del inglés y se la emplea en esta tesis para diferenciar de términos como censar o censado. En español, existen los sustantivos sensor y censor, homófonos. Sin embargo, si se busca en el Diccionario de la lengua española (DLE), no se encuentra un verbo asociado a cada sustantivo. Sí está registrado censar, pero no en sensar, que sería el más adecuado en este contexto.

implementación de un menor número de nodos, un menor coste de mantenimiento y gestión de la red y se puede proporcionar una mejor cobertura. En cambio, en una WSN no estructurada esta contiene una densa colección de nodos de sensores que pueden ser desplegados de manera ad-hoc en el campo, y la cual se deja desatendida para realizar funciones de supervisión y generación de informes, lo cual dificulta el mantenimiento de la red (Rueda & Talabera, 2017).

Cuando los paquetes se transfieran desde el origen hasta su destino, es frecuente que los nodos sensores efectúen comunicación de múltiples saltos y además pierdan energía debido a las 'sobre-escuchas', lo que significa que un nodo está siempre encendido recibiendo paquetes que están destinados a otros nodos. O en caso contrario por la presencia de agujeros de cobertura se retransmitan paquetes haciendo que la batería de esos nodos se malgaste de forma no planificada. Los nodos de una red con comunicación de múltiples saltos pueden morir por agotamiento de sus baterías, desconectando así la red prematuramente (Sobin, 2020). Por lo tanto, el efecto de tener una cantidad de nodos muertos es una indicación de la gestión de energía en toda la WSN

El enfoque de investigación en esta tesis se orienta a los parámetros de red (rendimiento controlado) y en la calidad de la información detectada con el fin de lograr eficiencia energética entre los nodos de la red. Al respecto se tienen dos conceptos que se utilizan ampliamente para expresar el servicio proporcionado por una red y sus aplicaciones: Calidad de servicio (QoS) y Calidad de experiencia (QoE). El primero se utiliza para describir la experiencia general que recibe un usuario o una aplicación a través de una red, y normalmente está asociado a un número estricto de métricas de rendimiento utilizadas por las redes tradicionales (Pereira, 2016). El segundo proporciona una evaluación de las expectativas humanas y la satisfacción con un servicio o aplicación específicos.

La QoSensing se define como el rendimiento utilizado para detectar o actuar en el entorno WSN, que afecta la calidad de la información detectada y proporcionada por el servicio. La medición de QoSensing no depende de opiniones subjetivas de los usuarios, sino que se centra en la calidad de la información recopilada y transmitida. Tiene un alcance mayor que QoS y es más objetivo y específico que QoE (Pereira, 2016). La QoSensing es un término clave de estudio y evaluación en esta tesis doctoral.

En WSN, la expresión "redes de mejor esfuerzo" se refiere a una red donde la QoS no está garantizada y el tráfico no tiene ningún tratamiento diferenciado. Pero además existe el concepto que involucra las demandas o cumplimiento de niveles de rendimiento en la WSN. Por lo tanto, se pueden dividir en dos grupos; WSN con rendimiento controlado y WSN de mejor esfuerzo. El primer grupo se utiliza en escenarios críticos, como aplicaciones de salud, instalaciones industriales y militares, donde existe la necesidad de un cierto nivel de rendimiento. El segundo se utiliza en WSN de rendimiento no

exigentes, como la vigilancia ambiental y el monitoreo de la agricultura. Por lo tanto, estudiar y evaluar las WSN con rendimiento controlado y eficiencia energética, a través de la calidad de detección o sensado, es la motivación principal del autor de esta tesis doctoral.

1.2. Objetivos y preguntas de investigación

Después de establecer el contexto y la motivación de la tesis, se recalca que el objetivo principal de este trabajo es alcanzar eficiencia energética a través de la calidad de sensado evitando y/o reduciendo los agujeros de cobertura en WSN con despliegues aleatorios.

Se determinan preguntas de investigación específicas que precisan y sistematizan los objetivos específicos en este trabajo doctoral.

Pregunta de investigación 1:

¿Cuáles son los criterios de calidad de sensado en las WSN?

Pregunta de investigación 2:

¿Cuáles son las métricas de WSN con calidad de sensado, teniendo en cuenta la eficiencia energética?

Pregunta de investigación 3:

¿Cómo mejorar la calidad de sensado y conectividad de la red en topologías existentes para WSN?

Para responder a las preguntas de investigación indicadas, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

1.2.1 Objetivos Específicos

Se plantean los objetivos específicos para alcanzar eficiencia energética en redes de sensores inalámbricos (WSN).

- 1) Especificar criterios de calidad de detección o sensado para maximizar la vida útil de una red WSN.
- 2) Determinar métricas de cobertura y conectividad para redes WSN con rendimiento energético eficiente.
- 3) Evaluar método basado en cuatro fases para calidad de sensado en red estrella y malla con nodos fijos y móviles
- 4) Evaluar algoritmos para calidad de sensado basada en aprendizaje por refuerzo con multiagentes inteligentes para topología árbol de clústeres desiguales.

1.3 Contribución

La contribución de esta tesis doctoral consiste en:

- Un método con cuatro protocolos de características específicas que actúan por fases en WSN con despliegue no planificado para mejorar detección y comunicación logrando eficiencia energética. El método se denomina 4TQS: cuatro niveles en la calidad de detección con mejora de la energía en WSN.
- Un mecanismo multi-agente basado en SARSA, State–Action–Reward–State–Action), Este mecanismo se lo denomina MiA-CODER para detección y recuperación de agujeros de cobertura basados en aprendizaje por refuerzo para mejorar la QoSensing y la vida útil de red en topología árbol de clúster.

1.4 Publicaciones

Durante el desarrollo de esta tesis doctoral, se publicaron 3 artículos científicos en revistas indexadas SCOPUS (véase el Apéndice A).

1° Artículo: Multihop Deterministic Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks MDR. Publicado en la revista: International Journal of Communications, Network and System Sciences.

2° Artículo: 4TQS: Four Tiers OVER Quality of Sensing with Energy Improvement in Wireless Sensor Network. Publicado en la revista: International Journal of Communications, Network and System Sciences.

3° Artículo: MiA-CODER: A Multi-Intelligent Agent-Enabled Reinforcement Learning For Accurate Coverage Hole Detection and Recovery in Unequal Cluster-Tree-Based QoSensing WSN. Publicado en la revista Applied Sciences.

Además, disertación en cuatro conferencias realizadas en congresos internacionales. Son reconocidas como artículos de conferencia y son Indexados por Scopus, ISI, entre otros. (más detalles, en el Apéndice B).

- CISTI (Conferencia Ibérica sobre Sistemas y Tecnologías de la Información / Conferencias Ibéricas de Sistemas y Tecnologías de Información) Actas; 2019, p1-4, 4p
- CHILECON Conferencia Chilena IEEE sobre Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Tecnologías de la Información y la Comunicación. Valparaíso, Chile, 2019, pp. 1-7.
- ICITS 2020 Conferencia internacional sobre tecnología y sistemas de la información, Bogotá, Colombia págs. 589-598

1.5 Estructura de la tesis:

El presente trabajo está estructurado en 6 capítulos que se detallan a continuación:

Capítulo 1. Presenta la motivación para la investigación realizada en el contexto de la tesis doctoral, sus objetivos iniciales, contribuciones y la estructura de la tesis.

Capítulo 2. Estado del arte; introduce el enfoque del funcionamiento de una red WSN hasta la actualidad.

Capítulo 3. Descripción de problema de investigación para alcanzar eficiencia energética en una red WSN a través de calidad de sensado y comunicación.

Capítulo 4. Evaluación de algoritmos de sensado y mejoras en enrutamiento para eficiencia energética en WSN con topología estrella y malla.

Capítulo 5. Evaluación de algoritmos inteligentes para sensado y mejoras de enrutamiento para eficiencia energética en WSN basada en topología árbol de clústeres diferentes.

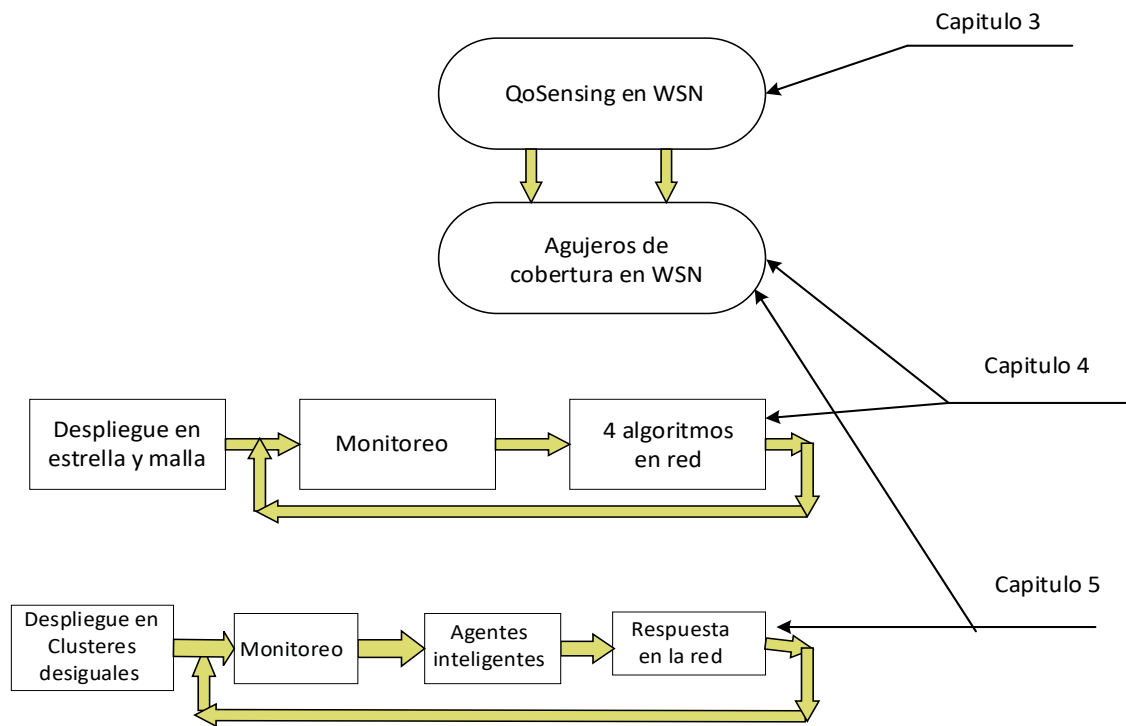
Capítulo 6. Conclusiones de la tesis doctoral

Apéndice A: Presenta evidencias de publicaciones científicas logradas en el desarrollo de la tesis doctoral

Apéndice B. Presenta evidencias de publicaciones de artículos de conferencia logradas en el desarrollo de la tesis doctoral.

Apéndice C: Muestra detalles del uso del simulador Network Simulator 3. Presenta algunas capturas de pantalla por el rendimiento generado en una red WSN usando el método 4Tier (4 fases).

En la figura 1.1 se muestra una descripción gráfica de la organización de la tesis, donde se integran los capítulos 3, 4 y 5 con las etapas para el diseño y evaluación de mecanismos para detección y reparación de agujeros de cobertura alcanzando mejoras en sensado de datos y así mismo en la conectividad para WSN con despliegues aleatorio tanto en topología, estrella, malla y árbol de clústeres desiguales.



QoSensing más mejoras en enrutamiento = Eficiencia energética en WSN con despliegues aleatorios

Figura 1. 1 Estructura de la tesis

CAPÍTULO 2:

ESTADO DEL ARTE EN

WSN

En este capítulo se describe el funcionamiento de una red WSN, su clasificación y arquitectura.

2.1 Funcionamiento de una WSN

La principal tarea de un nodo de una red de sensores es coleccionar datos de un cierto dominio, procesarlos y transmitirlos a la estación base (BS, Base Station) en ciertos casos una interfaz de comunicación permitirá que esta red intercambie datos con la nube o con otros sistemas integrados. Sin embargo, asegurar una conexión directa entre el sensor y la BS para transmitir información puede provocar un desgaste de energía significativo. Por ello, es fundamental que los otros nodos transmitan los mensajes del nodo origen hasta la BS.

En la Figura 2.1 se ilustra el esquema general de funcionamiento de una red de sensores inalámbricos. Además, se puede observar que hay en el interior de cada nodo sensor y como se interconectan estas unidades. Básicamente, cada nodo sensor comprende la parte de energía y módulos para realizar los procesos de detección, procesamiento y transmisión. Además, contiene una unidad movilizadora y un sistema de búsqueda de posición. Algunos de los componentes mencionados anteriormente son opcionales como el caso del movilizador.

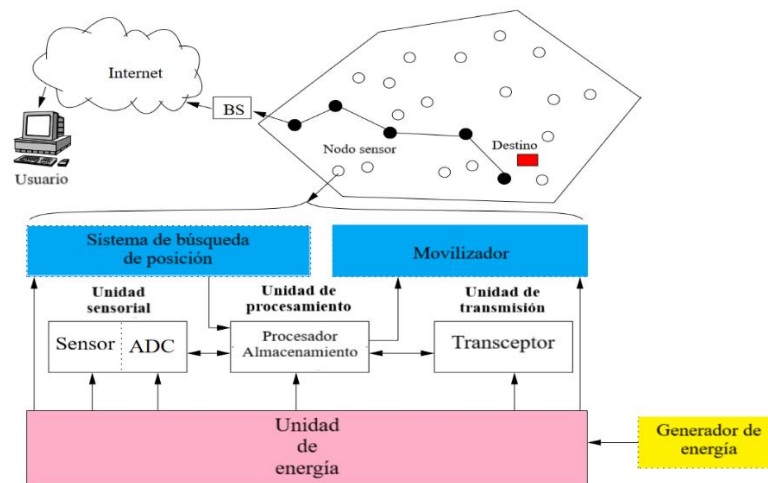


Figura 2. 1. Esquema general de funcionamiento de una WSN.

Fuente: (Al-Karaki & Kamal, 2004)

Los nodos sensores generalmente están dispersos en un “campo de sensores”, es decir repartidos en un área para recopilar datos de interés y las envían a uno o más estaciones base, y estas transmiten los datos sensados a un centro de datos remoto. Cada uno de los nodos basa sus decisiones en su misión, la información que tiene actualmente y el conocimiento de sus recursos informáticos, de comunicación y de energía.

Cada uno de estos nodos sensores tiene la capacidad de recopilar y enrutar datos a otros sensores o de regreso a una BS externa. Una BS puede ser un nodo fijo o un nodo móvil capaz de conectar la red de sensores a una red existente, a una infraestructura de comunicaciones o a Internet, donde un usuario puede tener acceso a los datos informados.

Los nodos sensores en redes desatendidas (sin monitoreo o intervención humana) pueden tener un profundo efecto en la eficacia de muchas aplicaciones, tales como la captura de imágenes de un objetivo, detección de intrusión, monitoreo del tiempo, vigilancia de seguridad y táctica, computación distribuida, detección de condiciones ambientales tales como temperatura, movimiento, sonido, luminosidad o la presencia de ciertos objetos y manejo de desastres.

El despliegue de una red de sensores en estas aplicaciones puede realizarse de forma aleatoria, por ejemplo, se pueden dejar caer desde un avión en una operación de gestión de desastres. También puede realizarse de forma manual, por ejemplo, situando sensores de alarma contra incendios en una instalación. Estos sensores en red pueden ayudar a las operaciones de rescate localizando sobrevivientes, identificando áreas de riesgo y haciendo que los equipos de rescate estén mejor informados de la situación general en el área del desastre.

Mientras que muchos sensores se conectan directamente a los controladores y estaciones de procesamiento (por ejemplo, redes de área local), un número creciente de sensores comunican los datos recogidos de forma inalámbrica a una estación de procesamiento centralizada. Esto es importante ya que muchas aplicaciones de red requieren cientos o miles de nodos de sensores, a menudo implementados en áreas remotas e inaccesibles. Por lo tanto, un sensor inalámbrico tiene integrado no solo un componente de detección, sino también unidades de procesamiento, comunicación y almacenamiento. En la Figura 2.2 se muestran dos campos de sensores que monitorean dos regiones geográficas diferentes y se conectan a internet usando sus BSs.

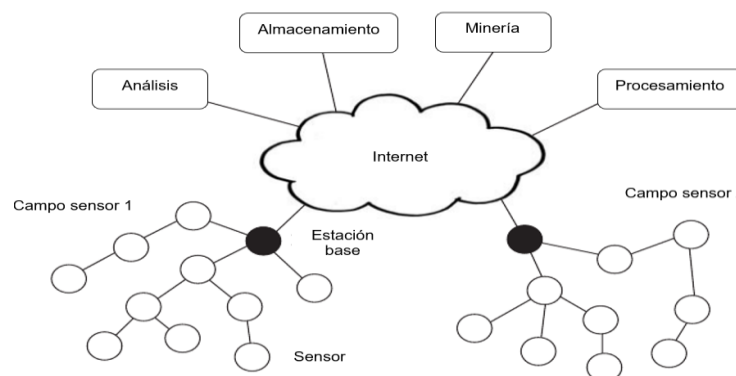


Figura 2. 2. Comunicación entre sensores localizados en diferentes zonas geográficas.

Fuente: (Dargie & Poellabauer, 2010)

Las capacidades de los nodos en una WSN pueden variar ampliamente, es decir, los nodos simples pueden monitorear un único fenómeno físico, mientras que los dispositivos más complejos pueden combinar muchas técnicas de detección diferentes, por ejemplo, acústica, óptica, magnética. También pueden diferir en sus capacidades de comunicación, por ejemplo, usando tecnologías de ultrasonido, infrarrojo o radio frecuencia con tasas de datos y latencias variables.

Si bien los sensores simples solo pueden recopilar y transmitir información sobre el entorno observado, los sensores más potentes, es decir, los dispositivos con gran capacidad de procesamiento, energía y almacenamiento también pueden realizar funciones más complejas de procesamiento y agregación. Tales dispositivos generalmente asumen responsabilidades adicionales en una WSN, por ejemplo, pueden formar redes troncales de comunicación que pueden ser utilizadas por otros dispositivos de recursos limitados para llegar a la BS.

En la figura 2.3 se muestran escenarios de monitoreo, detección de variables en un campo de interés.

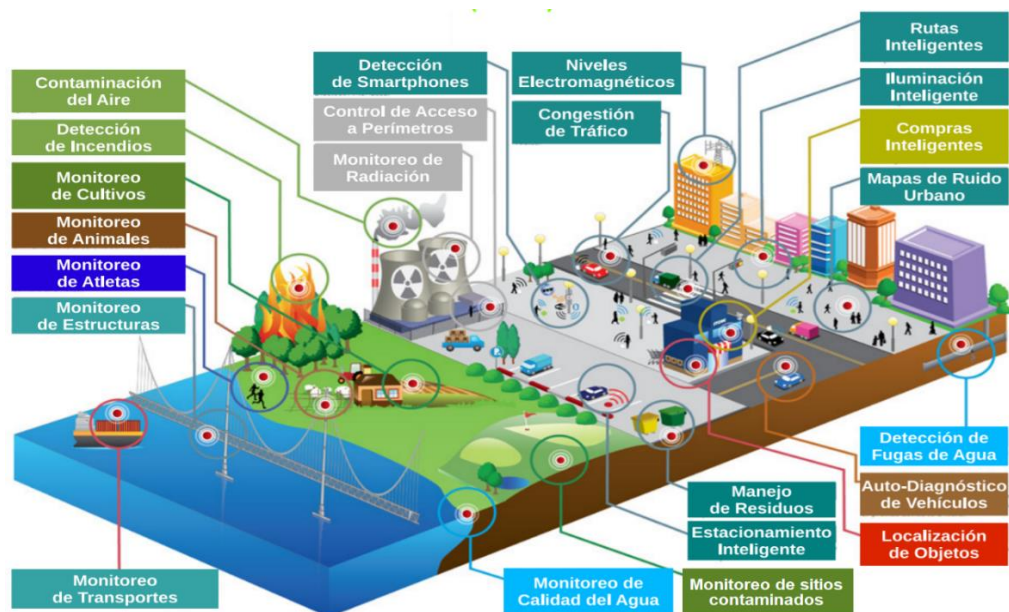


Figura 2. 3 Escenarios de detección y monitoreo con WSN

Fuente: (Libelium, 2015)

Algunos dispositivos pueden tener acceso a tecnologías de soporte adicionales, por ejemplo, receptores del sistema de posicionamiento global (GPS, Global Positioning System), lo que les permite determinar con precisión su posición, etc. Desde el diseño y ya en el despliegue o implementación, el costo de los nodos se debe mantener bajo para minimizar el costo total de la red (hardware de nodo, energía, etc.). Para equilibrar el costo y el rendimiento, se debe tomar en cuenta, que el costo de una red con sus nodos es proporcional al cuadrado del número de nodos de la red.

2.2 Clasificación de WSN

Las WSN son extremadamente específicas de la aplicación y se implementan de acuerdo con sus requisitos. Por lo tanto, las características de un WSN serán diferentes a las de otro WSN.

Independientemente de la aplicación, las redes inalámbricas de sensores en general se pueden clasificar en las siguientes categorías.

- WSN estática y móvil: En muchas aplicaciones, todos los nodos sensores se fijan sin movimiento y se trata de redes estáticas. Cuando los sensores están dentro de un vehículo o medio no estático, se dicen que son móviles.
- WSN determinista y no determinista: En una WSN determinista, la posición de un nodo sensor se calcula y se fija. El despliegue planificado previamente de nodos de sensado solo es posible en un número limitado de aplicaciones. En la mayoría de las aplicaciones, no es posible determinar la posición de los nodos del sensor debido a varios factores, como el entorno hostil o las condiciones de funcionamiento hostiles. Dichas redes no son deterministas y requieren un sistema de control complejo.
- BS única y BS múltiple: En una WSN con BS única, solo se usa una BS que se encuentra cerca de la región del nodo sensor. Todos los nodos sensores se comunican con esta BS. En el caso de una WSN de BS múltiple, se utiliza más de una BS y un nodo sensor puede transferir datos a la BS más cercana.
- BS estática y BS móvil: Similar a los nodos sensores, incluso las BSs pueden ser estáticas o móviles. Una BS estática tiene una posición fija generalmente cerca de la región de detección. Una BS móvil se mueve alrededor de la región de detección para que la carga de los nodos del sensor esté equilibrada.
- WSN de salto simple y salto múltiple: En una WSN de un solo salto, los nodos del sensor están conectados directamente a la BS. En el caso de WSN de múltiples saltos, los nodos pares y los cabezales de clúster se utilizan para transmitir los datos para reducir el consumo de energía.
- Auto configurable y no configurable: En la mayoría de las WSN, los nodos sensores son capaces de auto configurarse y mantener la conexión y trabajan en colaboración con otros nodos sensores. En cambio, en una WSN no auto configurable, sus sensores no pueden configurarse de forma automática y además dependen de una unidad de control para recopilar información. (Xing, Wang, Zhang, & Lu, 2009).
- WSN homogénea y heterogénea: En una WSN homogénea, todos los nodos sensores tienen un consumo de energía, potencia de cálculo y

capacidades de almacenamiento similares. Una red de sensores heterogénea consiste en dispositivos con diferentes capacidades de hardware, por ejemplo, los nodos sensores pueden tener más recursos de hardware si sus tareas de detección requieren mayor capacidad de cómputo y almacenamiento o si son responsables de recopilar y procesar datos de otros sensores dentro de la red. Algunas aplicaciones cumplirán requisitos específicos de rendimiento y calidad, por ejemplo, bajas latencias para eventos críticos del sensor o alto rendimiento para los datos recopilados. La existencia de un conjunto heterogéneo de sensores plantea muchos problemas técnicos relacionados con el enrutamiento de datos (Chen, Wang, & Chen, 2013).

2.3 Infraestructura de red WSN

La infraestructura que compone una red de sensores se la puede resumir en los siguientes componentes:

1. Los nodos sensores que son dispositivos con recursos restringidos de energía, comunicación, memoria y capacidad de cómputo, cuya función principal es realizar la medición de un fenómeno específico y transmitir el resultado de la misma. (Sohraby, Minoli, & Znati, 2007).
2. Los nodos sumideros o *sinks*, son nodos centrales con mayor capacidad de comunicación y cómputo, hacia los cuales se transmite la información recolectada por los nodos sensores. Según el campo de aplicación, el sumidero puede pertenecer a la red de sensores (y actuar como otro sensor), o bien ser una entidad externa a la red o funcionar como un gateway a otra red más grande, como redes corporativas en Internet. La información recolectada por los sumideros en algunos casos es transmitida hacia otros equipos de mayor jerarquía llamados BSs, los cuales ya son equipos externos de la red, desde donde se gestiona la misma y se procesa la información obtenida en grandes volúmenes (Sohraby, Minoli, & Znati, 2007). Generalmente la BS cumple esta función, aunque puede ser un nodo diferente.
 - Estación Base o Coordinador: Sus funciones más importantes son: controlar y gestionar la WSN, recolectar información sobre los nodos (nodos en funcionamiento, nodos con fallas, etc.), e inicializar la WSN.
 - Nodos router o simplemente nodos: Tienen la función de retransmitir datos generados por otros nodos para que alcancen el destino final. También pueden detectar variables.
 - Nodos finales o End Devices: Su función es recolectar datos y transmitirlos hacia nodos routers, para que puedan alcanzar el nodo sumidero. No pueden rutear datos, solo pueden comunicarse con el nodo ruteador. Este tipo de nodo puede ser de menor costo, ya que su protocolo de ruteo es muy simple: transmitir el dato al router más cercano. También puede tener un consumo de energía mucho menor al

resto de los tipos de nodos, ya que solo se enciende para transmitir su dato y recibir cualquier mensaje destinado a él, y puede permanecer apagado el resto del tiempo, independientemente de las comunicaciones entre los demás nodos.

2.3.1 Topología de WSN

Las estructuras de enlace o topologías para comunicación en WSN consisten principalmente en los nodos de sensado, los nodos de sumidero (sink) que agregan los datos medidos de varios nodos de sensor y los nodos de puerta de enlace (gateway) que interconectan los nodos de sumidero con la infraestructura de red por ejemplo Internet y enrutan el tráfico a los destinos adecuados. Hay casos en los que los nodos sumideros tienen interfaces de red integradas para el reenvío de datos y, por lo tanto, coinciden con los nodos de puerta de enlace. Con respecto a la topología de comunicación de la red de sensores, puede formar una red de un solo salto donde cada nodo sensor envía directamente los datos al nodo sumidero a través de una topología en estrella, o una red de múltiples saltos donde cada nodo sensor depende de sus nodos vecinos para reenviar sus datos sensados al nodo de sumidero respectivo. Las redes multisalto pueden formar una topología en malla, en serie o en árbol, como se muestra en la Figura 2.4. El mal funcionamiento de algunos nodos debido a una falla de energía puede causar cambios significativos y podría requerir el re-encaminamiento de paquetes y la reorganización de la red (Alnawafa & Marghescu, 2018). Es importante notar que, en la mayoría de los casos, los nodos sensores no presentan funcionalidad de movilidad.

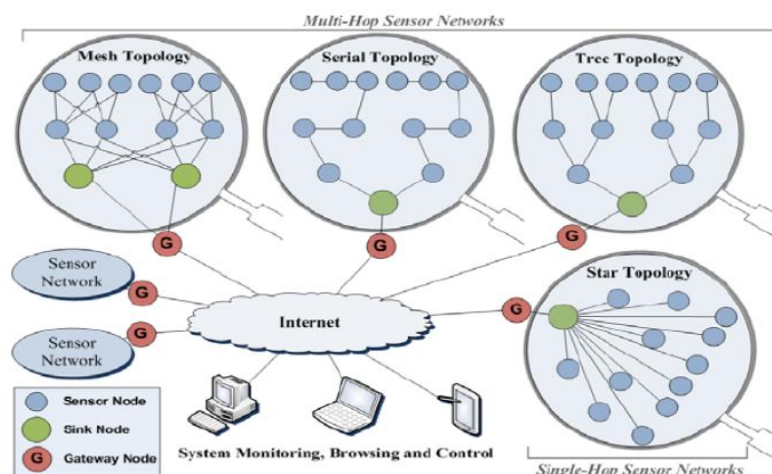


Figura 2. 4 Topologías en WSN

Fuente: (Zafeiropoulos, Spanos, Arkoulis, & Konstantinou, 2011)

La figura 2.4 muestra un sistema de supervisión y control empleando distintos tipos de topologías WSN. Cuando la topología es en árbol, se la identifica

también como redes jerárquicas. Un clúster es administrado por un nodo seleccionado conocido como cabeza de clúster (CH, Cluster Head)). El CH es responsable de coordinar las actividades de los miembros y comunicarse con otros CHs o la BS. Las técnicas de clúster ayudan a limitar el consumo de energía a través de diferentes medios:

- Reducen el rango de comunicación en el interior el clúster que requiere menos potencia de transmisión.
- Limitan el número de transmisiones gracias a la fusión realizada por el CH.
- Reducen operaciones intensivas en energía como coordinación y agregación a la cabeza del clúster.
- Permiten apagar algunos nodos dentro del clúster mientras que el CH asume las responsabilidades de reenvío.
- Equilibran el consumo de energía entre los nodos a través de la rotación del CH.

Además de la eficiencia energética, las arquitecturas de clúster también mejoran la escalabilidad de la red al mantener una jerarquía en la red. Una red jerárquica puede observarse como estrellas extendidas. En la figura 2.5 (a) se muestra comunicación con 3 CHs los cuales dirigen o enrutan datos recolectados por el resto de los nodos y los envía al nodo sumidero.

Estos nodos enrutadores deben tener los recursos suficientes para poder:

- Realizar el muestreo de sus propios sensores.
- Recibir información de sensores inalámbricos vecinos.
- Crear mensajes con los datos locales y datos agregados recibidos de los nodos vecinos.
- Actualizar su información de enrutamiento (si hay más de una ruta),
- Transmitir los mensajes hacia el siguiente salto, en dirección hacia el destino final.

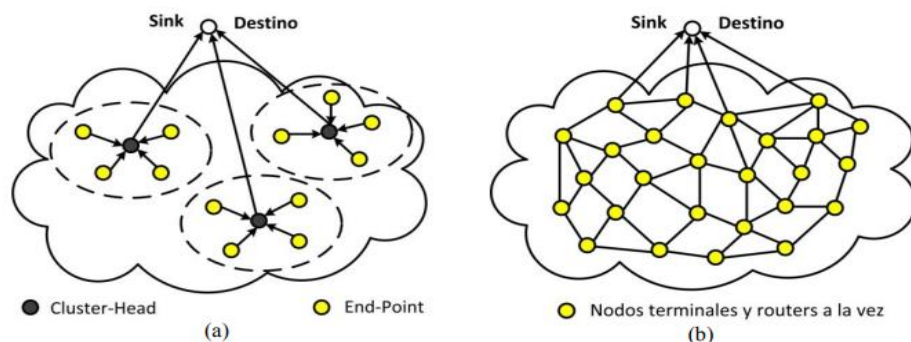


Figura 2. 5 Topologías (a) de red jerárquica y (b) de red plana o malla

Fuente: (Ortega-Corral, Acosta del Río, & López, 2017).

En la figura 2.5 (b) muestra redes planas (mallas) con nodos intermediarios que son nodos terminales y routers a la vez, es decir sirven de repetidores (si sólo extienden conexiones de punto a punto) o de enrutadores (capaces de conocer una o más rutas hacia el destino).

En redes pequeñas, donde los nodos y la puerta de enlace están cerca, puede ser factible la comunicación directa (un solo salto) entre ellos, como se muestra en la Figura 2.6 (a). Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones WSN requieren un gran número de nodos que cubren áreas grandes por lo que requieren un enfoque de comunicación indirecto (multisalto). Ver Figura 2.6 (b), en este caso, la tarea crítica de la capa de red de todos los nodos sensores es identificar una ruta desde el sensor a la puerta de enlace a través de otros muchos nodos de sensores que actúan como relés (Kamgueu, Nataf, & Djotio, 2017). Es decir, los nodos no solo deben generar y transmitir su propia información, sino también servir nodos de reenvío para otros nodos.

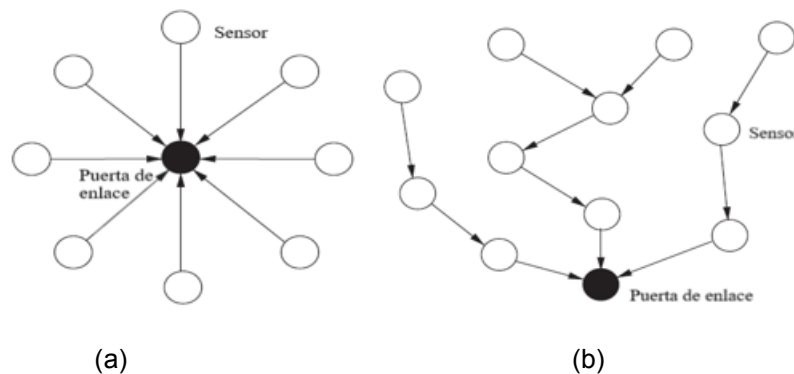


Figura 2. 6. Modelos de enrutamiento (a) salto único/estrella (b) múltiples saltos

Fuente: (Dargie & Poellabauer, 2010)

2.4 Sensado en WSN

La unidad de detección contiene sensores para capturar datos de su entorno y el módulo transceptor integrado es responsable de la transmisión y recepción de datos. La etapa de detección de nodos en WSN está referida de forma coyuntural con la cobertura de detección del campo de interés (FoI, Field of Interest), esto representa una función importante de los nodos sensores en las WSN conectadas. (Sadagopan, Krishnamachari, & Helmy, 2003). La cobertura en WSN puede tener un doble significado: el rango y la localización espacial. El rango se refiere al área geométrica de una misión de detección designada, mientras que la localización espacial enfatiza las posiciones espaciales relativas de los nodos sensores y objetivos para obtener los requerimientos exactos.

Se dice que un campo de interés (con variables como; humedad, temperatura, velocidad, etc.) está cubierto, si cada punto en dicho campo es monitoreado por al menos un nodo sensor. Por lo tanto, la detección y la conectividad son características importantes en diseño e implementación de una WSN. La cobertura de una WSN representa qué tan bien los sensores monitorean un

campo de interés donde se implementan. Es la medida de la capacidad de detección de la red (índices de cobertura). En cambio, la conectividad representa qué tan bien se pueden comunicar los nodos. Por lo tanto, la falla de cualquier enlace entre los nodos sensores puede provocar la falla de la comunicación en la red. (Tripathi, Prabhat, Dutta, Mishra, & Shukl, 2018).

Sin embargo, la cobertura de detección puede ser de dos tipos; como cobertura de área y cobertura de puntos. Las diferentes aplicaciones requieren diferentes índices de cobertura de detección; por ejemplo, algunas aplicaciones pueden requerir que una ubicación en una región sea monitoreada por un solo sensor, mientras que otras aplicaciones requieren un número significativamente mayor de sensores para lo mismo. En la figura 2.7 se muestra la cobertura en un campo de interés.

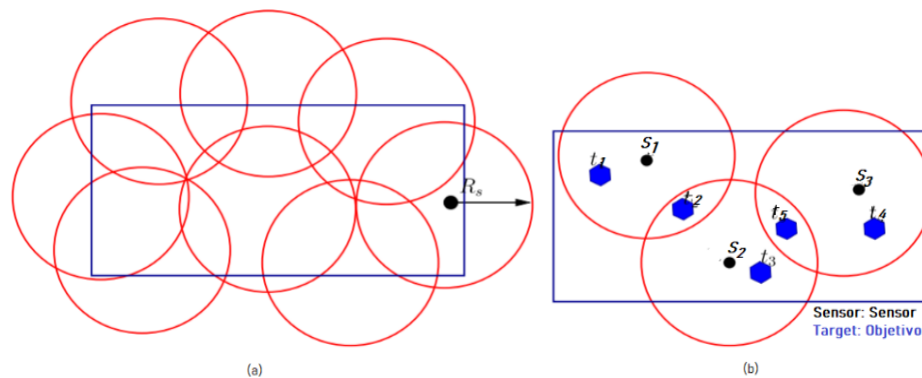


Figura 2. 7. (a) Cobertura de área. (b) Cobertura de objetivo/punto.

Fuente: (Tripathi, Prabhat, Dutta, Mishra, & Shukl, 2018)

La cobertura de área, que también se conoce como cobertura general, es monitorear el campo de interés mediante un conjunto de nodos de sensores implementados en las WSN. La parte (a) de la figura 2.7 ilustra un ejemplo de un WSN desplegado aleatoriamente para monitoreo, donde los círculos representan el rango de detección de los nodos sensores. La cobertura de objetivos, que también se conoce como cobertura de puntos, monitorea los objetivos dados en el campo de interés. La parte (b) de la Figura. 2.7 ilustra un escenario de cobertura de objetivos en el que se despliegan tres nodos sensores para monitorizar los cinco objetivos en el campo de interés. Los objetivos (target) t_1 , t_3 y t_4 están cubiertos por un solo nodo sensor. Los otros objetivos t_2 y t_5 están cubiertos simultáneamente por dos nodos sensores. La cobertura de objetivos reduce el consumo de energía porque monitorea solo la ubicación dada de los objetivos en el campo de interés.

Así también puede existir un escenario con cobertura de barrera, donde la cobertura de barrera es implementada para la detección de intrusos. Si se produce una intrusión a lo largo de la barrera, los nodos sensores pueden detectar la intrusión. Escenarios de cobertura de barrera se ilustra en la Figura. 2.8.

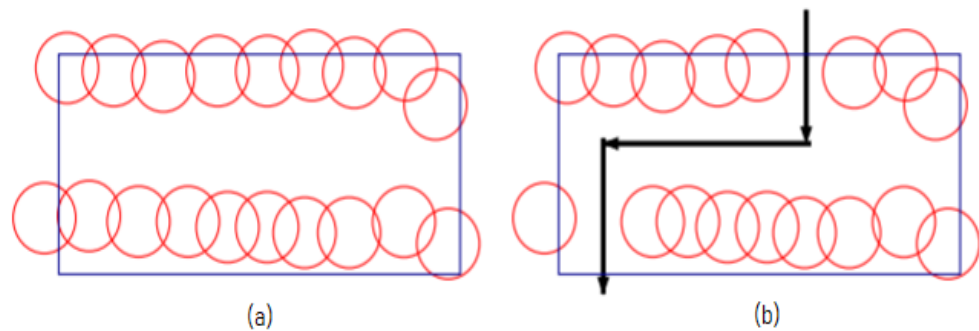


Figura 2. 8 Cobertura de barrera (a) fuerte y (b) débil

Fuente: (Tripathi, Prabhat, Dutta, Mishra, & Shukl, 2018)

Según la calidad de la detección de los eventos en el límite del campo de interés, la cobertura de la barrera se puede dividir en las siguientes dos categorías: cobertura de barrera débil y cobertura de barrera fuerte. La cobertura de barrera débil consiste en alguna región o agujeros descubiertos como se muestra en la parte (b) de la Figura. 2.8. Solo asegura el seguimiento de los objetivos que se mueven a lo largo de trayectorias convenientes. Sin embargo, hay algunas rutas que pueden ser complejas y no pueden ser detectadas por ningún sensor. A diferencia de la cobertura de barrera débil, la cobertura de barrera fuerte asegura que los nodos sensores deben monitorear o rastrear a los intrusos. La parte (a) de la figura 2.8 ilustra dos coberturas de barrera donde una intrusión es detectada por al menos dos nodos sensores.

Sin embargo, la forma más general de definir la cobertura de detección es, considerar la relación entre el área de detección y el área de interés, lo que significa la fracción de área que puede cubrir la red de sensores. La cobertura de detección alcanzable depende en gran medida de la planificación de la implementación del nodo. No obstante, los sensores deben implementarse de tal manera que maximicen la cobertura y minimicen el número requerido de sensores. La implementación de nodos no siempre es posible en algunas aplicaciones de redes de sensores no estructuradas, como la vigilancia en el campo de batalla, el monitoreo de bosques, etc. Por lo tanto, en tales aplicaciones, los nodos de sensores se implementan aleatoriamente para proporcionar la cobertura requerida. Sin embargo, puede ser importante predecir la cantidad mínima de nodos de sensores que brindan un nivel aceptable de cobertura.

Otro procedimiento para minimizar el consumo de energía en WSN, emplea criterios del enrutamiento a partir de diferentes enfoques de diseño.

2.5 Enrutamiento en WSN

El proceso de establecer rutas desde una fuente a un receptor (por ejemplo, a una puerta de enlace) a través de uno o más nodos intermedios se denomina enrutamiento y es una tarea clave de la capa de red de la pila de protocolos de comunicación. Los protocolos de enrutamiento son responsables de identificar o descubrir rutas desde una fuente o emisor hasta el receptor deseado. Es

decir, debe garantizar la comunicación entre dos nodos de una WSN cuando la comunicación es de único salto. En el caso del enrutamiento multisalto consiste en descubrir varias rutas disjuntas entre dos nodos en lugar de una sola, de manera que, si la comunicación entre dos nodos se ve interrumpida debido a la falla de un nodo perteneciente a la ruta, pueda hacerse uso de una ruta alternativa. Este proceso de descubrimiento de ruta también se puede usar para distinguir entre diferentes tipos de protocolos de enrutamiento (Ahmad, Javaid, Khan, Qasim, & Alghamdi, 2014). Dadas las características y complejidad de las WSN, resulta arduo encontrar un algoritmo de enrutamiento que funcione bien para la mayoría de los casos

El diseño de un protocolo de enrutamiento es desafiante debido a las características únicas de las WSN, incluida la escasez de recursos o la falta de fiabilidad del medio inalámbrico (Li, Kim, Han, & Lee, 2019). Se indica que en toda esta tesis doctoral se utilizará el término fiabilidad² (reliability, en inglés) para referirse a la probabilidad de que el mensaje llegue de forma correcta y con éxito a su destino. La fiabilidad se refiere también a la capacidad de un sistema para realizar sus funciones requeridas dentro de condiciones específicas y durante un período de tiempo determinado, sin experimentar fallas o interrupciones significativas.

Por ejemplo, el procesamiento limitado, almacenamiento, ancho de banda y las capacidades de energía requieren soluciones de enrutamiento que sean ligeras, mientras que los frecuentes cambios dinámicos en una WSN (cambios en la topología debido a fallas en los nodos) requieren soluciones de enrutamiento que sean adaptativas y flexibles.

Además, a diferencia de los protocolos de enrutamiento tradicionales para redes cableadas, los protocolos para redes de sensores pueden no ser capaces de confiar en esquemas de direccionamiento globales (por ejemplo, direcciones IP en Internet).

En una red WSN, se requiere eficiencia energética para enviar información recopilada a la BS central (nodo coordinador o gateway). En la BS, los datos recibidos se procesan más, por consiguiente, se 'traza' el número máximo de rutas de eficiencia energética de tal manera que cada ruta sea un conjunto de sensores seleccionados (en lugar de todos los sensores). Debido al rango de comunicación restringido y la alta densidad de nodos de sensores, el reenvío de paquetes en las redes de sensores generalmente se realiza a través de la

² Por traducción al español en ciertos trabajos académicos se utiliza la palabra 'confiabilidad'. La diferencia entre "confiabilidad" y "fiabilidad" en español es mínima y, en muchos casos, se usan indistintamente para referirse a la capacidad de un sistema para realizar su función sin fallos durante un período de tiempo determinado. En el contexto específico de la transmisión de paquetes en WSN, es preferible usar "fiabilidad", ya que se escucha más técnico y específico para este campo.

transmisión de datos de múltiples saltos. (Liu, y otros, 2019). Por lo tanto, el enrutamiento en redes de sensores inalámbricos se ha considerado un campo de investigación importante durante la última década.

En base la selección adecuada del protocolo de enrutamiento se puede otorgar a la WSN desempeños aceptables, pues la densidad y la distribución de los nodos de la red contribuyen a aumentar problemas como red inestable, frecuentes repeticiones de comunicaciones que hacen que la batería se descargue, y el consumo energético puede verse afectado por escenarios de fallido enlace (Mostafaei, 2019). Por aquello, la selección de los protocolos de enrutamiento tiene una dependencia con el tipo de aplicación para la cual se desea implementar la red.

2.5.1 Clasificación de protocolos de enrutamiento para WSN

Se han clasificado los protocolos de enrutamiento existentes en WSN desde dos perspectivas diferentes: (1) estructura de la red y (2) operación del protocolo (Al-Karaki & Kamal, 2004). Sin embargo, se ha agregado una opción en la clasificación (Shabbir & Hassan, 2017), así se tienen tres clasificaciones diferentes;

1. Basadas en la estructura de red u organización.
2. Proceso de descubrimiento de ruta y
3. Operación de protocolo.

En la figura 2.9 se presentan las tres clases de protocolos de enrutamiento con sus respectivos tipos.



Figura 2. 9 Clasificación de los protocolos de enrutamiento.

Fuente: Traducido de (Shabbir & Hassan, 2017)

2.5.1.1 Protocolos basados en la organización de red

Con respecto a la organización de la red, la mayoría de los protocolos de enrutamiento se ajustan a una de tres clases: planos o centrados en datos, jerárquicos y basados en ubicación.

Protocolos de enrutamiento planos: En el enrutamiento plano o también llamado centrado en datos, las técnicas se basan principalmente en la transmisión de información especificada por ciertos atributos en lugar de recopilar datos de ciertos nodos. Dado que los datos se solicitan a través de consultas, la denominación basada en atributos es necesaria para especificar las propiedades de los datos.

El protocolo de sensor para información vía negociación (SPIN. Sensor Protocols for Information via Negotiation) es el primer protocolo centrado en datos, que considera la negociación de datos entre nodos para eliminar datos redundantes y ahorrar energía. Más tarde, la difusión dirigida (Intanagonwiwat, Govindan, & Estrin, 2000) se ha desarrollado y se ha convertido en un gran avance en el enrutamiento centrado en datos.

También se han propuesto muchos otros protocolos basados en la difusión dirigida (DD), como el enrutamiento consciente (eficiente, óptimo) de la energía, el enrutamiento de 'rumores' basado en consultas; la idea es enrutar las consultas a los nodos que hayan observado un evento en particular en vez de inundar toda la red para obtener información sobre un evento. Está concebido para entornos donde el enrutamiento geográfico no es posible. Tiene buen desempeño solo si el número de eventos es pequeño, de lo contrario los costos de mantener los nodos *sinks* y las tablas de eventos se vuelven inviables. (Shah & Rabaey, 2002).

En resumen, en los protocolos de enrutamiento centrado en datos o planos, los nodos juegan un papel igual y pueden establecer una ruta por operación local y retroalimentación de información entre ellos fácilmente. Pero para las redes a gran escala, la detección frecuente de topología puede invalidar las rutas descubiertas, lo que llevaría a un alto retraso y gasto en la red. Este fenómeno se puede resolver de manera eficiente en una red de enrutamiento basada en la jerarquía.

Protocolos de enrutamiento jerárquico: En el enrutamiento basado en la jerarquía (Niu, Tao, Wu, Huang, & Cui, 2006) y (Hyeon & Kim, 2010) todos los nodos se dividen en diferentes grupos (zonas o clústeres). Cada grupo elige una cabeza de grupo CH de acuerdo con reglas específicas. El intercambio de datos entre los clústeres fue transmitido por el nodo de puerta de enlace, sin tener en cuenta los detalles de cómo se transmitirán los datos transmitidos al destino. En una palabra, el enrutamiento basado en la jerarquía no solo minimiza el gasto de la red al disminuir el número de nodos que participan en el mantenimiento del enrutamiento, sino que también aumenta la estabilidad de la red al dividir la red en subredes fáciles de controlar. Algunos nodos pueden

reenviar datos en nombre de otros, mientras que otros nodos solo generan y propagan sus propios datos (Zhang, Xu, & Xu, 2015).

Los protocolos jerárquicos designan un nodo guía del agrupamiento (CH) que puede ser seleccionado de entre los sensores desplegados o puede ser más robusto que otros nodos sensores en términos de energía, ancho de banda y memoria. Por lo tanto, la carga de la transmisión a la BS se maneja a través del nodo guía. El protocolo jerárquico consta de dos capas principales. Una de ellas se usa para seleccionar los nodos maestros o CH y la otra se encarga del enrutamiento. Sin embargo, muchas técnicas de esta categoría no se centran en el enrutamiento, sino en dictaminar quién y cuándo se enviarán o procesarán los datos, o en la asignación de un canal.

Protocolo basado en ubicación o localización: Los protocolos basados en la ubicación utilizan la información de posición para transmitir los datos a las regiones deseadas. Es decir, se basan en el conocimiento de la posición de cada uno de los dispositivos conformadores de la red. El direccionamiento de los nodos se realiza mediante la ubicación de cada uno de ellos y en la mayoría de estos protocolos se calcula la distancia entre nodos mediante la detección de la potencia recibida de los nodos vecinos (Maroto, 2010). En otras palabras, dependen de la información de ubicación de los nodos para tomar decisiones de enrutamiento.

2.5.1.2 Protocolos por descubrimiento de ruta

En función del mecanismo (descubrimiento de ruta) utilizado para encontrar la ruta hasta el destino o en otras palabras por la forma en que la fuente crea una ruta hacia el destino, estos protocolos de enrutamiento se pueden clasificar en: proactivos, reactivos e híbridos.

Protocolo de enrutamiento proactivo: En el modo proactivo, los nodos de sensores monitorean continuamente el entorno y envían periódicamente los datos monitoreados al usuario a una velocidad de ciclo constante. Las rutas se estiman antes de que se necesiten, los protocolos reactivos descubren rutas a pedido, es decir, cada vez que una fuente desea enviar datos a un receptor y no tiene una ruta establecida (Bhattacharyya, Kim, & Pal, 2010).

Un ejemplo de este tipo de protocolo es Optimized Link-State Routing Algorithm (OLSR) que incorpora la filosofía utilizada en protocolos tradicionales como OSPF de 'Estado de los Enlaces'. En este algoritmo todos los nodos se intercambian mensajes para formarse una visión consistente de toda la red y así poder decidir el encaminamiento de paquetes. Por tanto, su principal ventaja es que las rutas están disponibles siempre que sean necesarias y no se incurre en retrasos para determinarlas (Xu, Luo, Wang, & Zhao, 2017).

Esta categoría de protocolos también se describe a menudo como basada en tablas, porque las decisiones de reenvío local se basan en el contenido de una tabla de enrutamiento que contiene una lista de destinos, combinada con uno o

más vecinos de siguiente salto que conducen a estos destinos y costos asociados con cada opción de próximo salto. Estas tablas son:

- Tabla de distancias de los nodos vecinos
- Tabla de enrutamiento hacia nodos vecinos.
- Tabla de costos de enlace o de energía de transmisión.
- Tabla con número de secuencia de los mensajes de actualización.

El protocolo basado en vector de distancia de secuencia de destino (DSDV, Destination Sequence Distance Vector) eliminan los retrasos en el descubrimiento de rutas, pueden ser demasiado “agresivos” ya que se establecen rutas que tal vez nunca se necesiten. Además, el intervalo de tiempo entre el descubrimiento de la ruta y el uso real de la ruta puede ser muy grande, lo que puede conducir a rutas obsoletas (Dung, Hieu, Choi, & Kim, 2017). Definitivamente, el costo de establecer una tabla de enrutamiento puede ser significativo, por ejemplo, en algunos protocolos implica la propagación de la información local de un nodo (como su lista de vecinos) a todos los demás nodos de la red (Gunjan, Maheshwari, & Sharma, 2018).

Protocolo de enrutamiento reactivo: Se activan después de que ha ocurrido un evento que conduce a la conservación de energía, pero también a una respuesta más lenta. En el descubrimiento de ruta mediante protocolo de enrutamiento reactivo se descubren y se establecen bajo peticiones, con el consumo de energía que lleva asociado. Estos algoritmos optimizan los recursos evitando el envío de paquetes de forma innecesaria. (Palma, 2009). Como contrapartida, sufren una pérdida de tiempo cada vez que realizan el descubrimiento de la ruta, es decir provoca demoras antes de que se produzca la transmisión de datos real. Se califica a AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) como protocolo reactivo, considerado para ser utilizado en una red ad hoc con nodos móviles, que se caracteriza por cambios frecuentes de conectividad debido al posible movimiento de los nodos.

El protocolo de enrutamiento AODV es el más aceptable para redes Ad Hoc móviles generales, ya que consume muy poco ancho de banda y la sobrecarga también es baja en comparación con el protocolo de enrutamiento DSDV (proactivo). (Zamora, Philco, & Estupiñan, 2019).

Protocolo de enrutamiento híbrido: Los protocolos de enrutamiento híbrido mantienen una filosofía proactiva en un ámbito local y reactiva a nivel más global. Se crearon para soluciones que necesitan una respuesta rápida frente a cambios bruscos de los parámetros medidos. El protocolo ZRP (Zone Routing Protocol). Es un protocolo híbrido que agrupa nodos en zonas geográficas. Utiliza el enrutamiento proactivo DVA (Algoritmo de vector de distancia) entre nodos dentro de zonas individuales y el enrutamiento reactivo DSR (Enrutamiento de origen dinámico) entre zonas.

Otro protocolo de ruteo es TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols) en el que los sensores están sensado el medio continuamente,

transmitiendo a menor frecuencia únicamente cuando la medida sensado está dentro de un rango de interés, manteniendo un equilibrio entre eficiencia energética y precisión de la información, trabaja bajo el concepto de clústeres. Sin embargo, la formación de clústeres provoca cierta inviabilidad ya que no facilita la escalabilidad, o el crecimiento de la red.

El protocolo APTEEN, (AdaPtive TEEN) ahorra más energía que TEEN, Ya que cambia los rangos de interés de sus medidas de acuerdo con las necesidades y al tipo de aplicación, respondiendo mejor a eventos críticos. Su desventaja es que tiene más complejidad y demora que TEEN.

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) Crea grupos de nodos basados en la fuerza de la señal y usa cabezas de grupo para agregar, comprimir y transmitir paquetes a la BS. El número óptimo de cabezas de clúster se estima en alrededor del 5% del total de nodos, mientras que todos los procesos, como la fusión de datos y la agregación de datos, se realizan localmente en los clústeres. Durante la operación LEACH, los cabezales de los clústeres cambian aleatoriamente para equilibrar la energía restante y la vida útil de la red. Sin embargo, dado que utiliza enrutamiento de un solo salto, no se recomienda para redes de sensores implementadas en áreas extensas. También produce gastos generales de comunicación a la BS.

2.5.1.3 Protocolos de enrutamiento basados en su operación

La clasificación de protocolos de enrutamiento según su operación se diferencia en cinco tipos:

1. Basados en Negociación (Negotiation), donde empleando una serie de mensajes de negociación se pretende eliminar duplicados en la información y prevenir que datos redundantes se envíen al siguiente nodo o al sumidero (Capella, 2010).
2. Basados en Multiruta (Multi-Path), donde se emplean múltiples caminos en lugar de un único camino con el fin de mejorar el rendimiento.
3. Basados en Consultas (Query), donde los nodos destinatarios propagan la consulta de información (tarea de sensorización) desde un nodo hacia la red y cuando se encuentra un nodo que posee dicha información, éste responde a la consulta enviando los datos al que inició la consulta.
4. Basados en Calidad de Servicio (QoS), donde la red debe satisfacer ciertas métricas de QoS, como delay, energía, ancho de banda, cuando envía datos al sumidero, manteniendo de esta forma la red balanceada en cuanto a consumo de energía y calidad de la información. En estas redes, tanto la red como el host pueden tener situaciones que requieren de una buena coordinación. La falta de coordinación central y de un límite de recursos puede desencadenar un problema. El nivel de servicio y sus parámetros están asociados al tipo de aplicación. La comunicación en tiempo real sobre una red de sensores deberá de ser garantizada a pesar de tener un

máximo de retraso, un ancho de banda mínimo y otros parámetros involucrados en la QoS.

5. Basados en Coherencia (Coherent), donde la información es enviada después de un mínimo procesado a los nodos encargados de la agregación. El procesamiento en coherencia es una estrategia típica para elaborar algoritmos de enrutamiento eficientemente energéticos.

Aunque las redes informáticas tradicionales se basan en estándares establecidos, muchos protocolos y mecanismos usados en las WSN son soluciones exclusivas, mientras que las soluciones basadas en estándares surgen lentamente. Los estándares son importantes para la interoperabilidad y facilitan el diseño y la implementación de aplicaciones WSN; por lo tanto, un desafío clave en el diseño de estas redes sigue siendo la estandarización de soluciones prometedoras y la armonización de la competencia (fabricantes) entre estándares.

2.6 WSN y la Interoperabilidad

Se indica que dentro del ecosistema IoT las plataformas que permite el desarrollo del mercado de IoT son las WSN o redes de objetos conectados al internet (tendrían sensores, software, etc.) que capturan o recopilan datos que luego de su almacenamiento y análisis posterior pueden ser útiles para la toma de decisiones. Por aquello es vital contar con el aspecto de la interoperabilidad. El mercado se encuentra muy fraccionado, principalmente por las incompatibilidades entre marcas, y es preciso un esfuerzo conjunto para alcanzar estándares comunes que permitan la comunicación.

Por consiguiente, es importante explorar el panorama de los estándares. Al respecto el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI, European Telecommunications Standards Institute), responsable de proveer especificaciones a las aplicaciones concernientes con IoT y las Ciudades Inteligentes, proporcionó los requisitos reglamentarios, incluidos los mandatos en el área de M2M e Internet de las cosas. Así mismo la Alianza para la innovación del IoT (AloTI, Alliance for IoT Innovation) asociación impulsada por el mundo académico y la industria, tiene como objetivo promover las implementaciones de IoT en Europa y otras regiones. La AloTI generó un gran debate cuando publicó por primera vez un informe que examinaba el panorama de los estándares. Dicho informe dejó en evidencia que los estándares de IoT podrían ser un obstáculo importante para las empresas pequeñas y grandes que intentan abrirse camino en el mercado de IoT. Estas empresas se enfrentan a una importante pregunta: ¿qué estándares deberíamos utilizar? ¿Son los estándares nuestra mejor apuesta para el crecimiento futuro y el tiempo de comercialización de nuestros productos de IoT? (Elloumi, 2017). Las dos organizaciones se enfocan en cuatro aspectos relevantes, y proporcionan una clasificación más específica de IoT y definen los siguientes niveles de interoperabilidad a través de los cuales se puede resolver el problema de los dispositivos en IoT:

1. Interoperabilidad técnica: generalmente asociada con los protocolos de comunicación y la infraestructura necesaria para que esos protocolos funcionen.
2. Interoperabilidad sintáctica: generalmente asociada con formatos y codificaciones de datos, por ejemplo, el lenguaje de marcado extensible (XML, Extensible Markup Language), notación de objeto Java Script (JSON, JavaScript Object Notation) y formato de descripción de recursos (RDF, Resource Description Format).
3. Interoperabilidad semántica: asociada a la comprensión común del significado del contenido intercambiado (información). Lo que significa la relación de significantes como palabras, símbolos o signos y su denotación deben ser comprensibles y procesables por máquinas. La semántica en IoT se refiere a la capacidad de extraer conocimiento de los datos a través del uso de recursos e información de modelado para dar sentido al servicio solicitado. Este componente es compatible con las tecnologías de la Web semántica, como el Resource Description Framework (RDF), la ontología Web Ontology Language (OWL) y el formato Efficient XML Interchange (EXI). (AloTI, 2020).

El primer requisito de la conectividad a internet es que los sistemas “conectados” deben “hablar el mismo idioma” en cuanto a protocolos y codificaciones. Agregar semántica al IoT permite que los datos que se originan desde diferentes fuentes sean accesibles sin ambigüedades y procesables en diferentes dominios y por diferentes usuarios (Mercado, 2019). Los esfuerzos de interoperabilidad de estas soluciones se centran en la semántica y/o en las interfaces de programación de alto nivel sin considerar los problemas de compatibilidad en las capas inferiores. La principal expectativa de la interoperabilidad semántica es proporcionar un significado inequívoco de lo que son las “cosas” que dos o más plataformas pueden compartir y acordar, cerrando así la brecha semántica potencial que proviene de diferentes descripciones e implementaciones de las cosas. El desafío de la interoperabilidad semántica es en general un problema multi plataforma, aunque también se puede enfrentar con dos componentes en la misma plataforma.

Para enfrentar el problema de interoperabilidad semántica en IoT, se utilizan ontologías. Una ontología es una especificación explícita de una conceptualización compartida y está compuesta por un conjunto de objetos y relaciones entre ellos. Las ontologías promueven el intercambio de una comprensión unificada de información estructurada específica de dominio entre agentes de software lo que permite a los sistemas consumir datos basados en conceptos y relaciones predefinidos en la ontología. Por lo tanto, al establecer una notación semántica a los datos sensoriales de los dispositivos, las aplicaciones y los servicios de IoT podrán consumir estos datos,

independientemente de sus fuentes o formatos. Además, será posible integrarlos con otras fuentes de datos semánticos en la web.

En esta tesis doctoral está fuera de alcance profundizar sobre la interoperabilidad semántica o la web semántica de las cosas.

Si no se alcanza la interoperabilidad técnica y sintáctica, el intercambio de datos es imposible, a pesar de la posible interpretación de datos sin ambigüedad que se puede establecer a través de la interoperabilidad semántica. No obstante, la interoperabilidad entre dispositivos IoT puede ser un problema también en la representación semántica de los datos. (Yacchirema, 2019).

2.6.1 Interoperabilidad Técnica

Una plataforma de IoT es también software que conectan varios dispositivos, incluida una variedad de nodos sensores, puntos de acceso y redes de datos. Por lo tanto, es indispensable proporcionar servicios interoperables relevantes para un conjunto diverso de plataformas. Sin embargo, la mayoría de las plataformas actuales comparten limitaciones comunes. (Koo, Oh, & Kim, 2019). Para formar una red interoperable, el primer requisito es la conectividad de los dispositivos ya sea de manera inalámbrica o de manera cableada, es decir que los dispositivos tengan acceso a los medios compartidos, que pueden ser la misma frecuencia de radio o conectividad física a través de cable. En tal sentido, el uso de estándares en la capa física y la capa de control de acceso al medio (MAC, Medium Access Control) se plantea como una solución viable hacia la integración de los dispositivos en IoT. No obstante, usar los mismos estándares en diferentes implementaciones, no garantiza la comunicación de dispositivos (Yacchirema, 2019).

Por ejemplo, el estándar IEEE 802.15.4 puede ser utilizado por diferentes dispositivos. Sin embargo, este estándar puede ser implementado de varias maneras, posiblemente no interoperables, debido a que este estándar solo ofrece la comunicación en las capas de red inferiores: física y MAC. Véase la Figura 2.10.

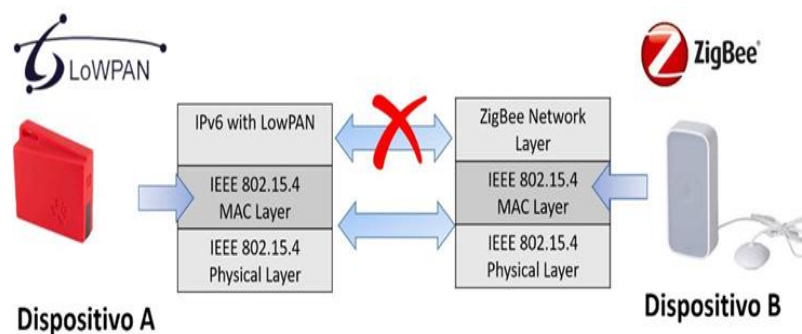


Figura 2. 10. Dispositivos no interoperables que utilizan el mismo estándar.

Fuente: (Yacchirema, 2019)

Mientras a nivel de capa de red varias tecnologías como las redes de área personal inalámbricas de baja potencia (LoWPAN, Low Power Wireless Personal Area Networks) de la competencia, como ZigBee o 6LoWPAN (Ipv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks) pueden ser utilizadas.

La interoperabilidad debe tenerse en cuenta para los desarrolladores de aplicaciones y los fabricantes de dispositivos. Ellos deben agregar nueva funcionalidad con impacto nulo o insignificante en la integridad del sistema existente es un criterio importante en el diseño de IoT. Para procesar los datos para formar un análisis productivo, los dispositivos de IoT no solo deben ser inteligentes, sino que también deben operar junto con los dispositivos vecinos. Deben comprender el formato de los datos y también deben trabajar en función del análisis de otro dispositivo (Bansal & Kumar, 2020). Se requiere de un controlador inteligente para monitorear varias entradas de los dispositivos. Es decir, crear un sistema operativo que satisfaga todos los requisitos de todos los dispositivos de gama baja y alta es casi imposible de lograr, pero existe una opción de sistema operativo de código abierto debido a la información detallada sobre la funcionalidad y el requisito que podría ayudar a fusionar el simulador para ampliar la funcionalidad.

La solución técnica hacia la interoperabilidad de los diversos dispositivos heterogéneos que utilizan diferentes medios de comunicación son los enrutadores y/o gateways quienes actúan como puentes proporcionando la funcionalidad interoperable deseada, pues admiten comunicación inalámbrica; 802.15.4, Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth, LoRa (Long Range), etc. Por ejemplo, un túnel puede desarrollarse para establecer la interoperabilidad entre dispositivos 6LoWPAN y ZigBee si los dispositivos son compatibles con la tecnología 802.15.4. El desarrollo de aplicaciones que sean independientes de la plataforma y la creación de un middleware en un sistema y la interoperabilidad cruzada es una de solución simple.

En resumen, la interoperabilidad técnica se ocupa de protocolos de interfaz heterogéneos para la comunicación entre dispositivos. Así como de las complejidades de diferentes protocolos.

2.7 Heterogeneidad en IoT

La heterogeneidad de los dispositivos y plataformas ocasiona una falta de interoperabilidad de sistemas IoT. Una red WSN heterogénea puede definirse en función de diferentes tipos de tareas y tipos de sensores, como detección, comunicación, nodos que funcionan con baterías y nodos con consumo de energía, etc. Esto dificulta la integración de datos de distintas plataformas. Yacchirema (2019) indica que los datos de IoT están aislados en 'silos' verticales de información con formatos e interfaces específicas. En algunos casos, los datos son almacenados en diferentes almacenes de datos aislados. La integración de todas estas fuentes diversas de (dispositivos, plataformas, datos abiertos, y almacenes de datos permite generar mejores y más precisos

análisis de datos para una correcta toma de decisiones (Saravia, 2020). Las redes inalámbricas heterogéneas tienen protocolos de comunicación específicos para los dispositivos conectados. Al agregar dispositivos que utilizan diferentes protocolos de comunicación también significa que se abren vectores de amenazas adicionales. Los siguientes aspectos de seguridad deben tenerse en cuenta para la red IoT heterogénea:

- Confidencialidad
- Integridad
- Autenticación
- Seguridad física de los dispositivos

A excepción de la seguridad física de los dispositivos implementados en la red de IoT, todos los demás aspectos se pueden abordar con una solución de software. Cuando los fabricantes envían actualizaciones de firmware o software que son esenciales para el rendimiento o la seguridad, los usuarios del dispositivo deben actualizar lo antes posible. Pero para una red que tiene muchos dispositivos heterogéneos, se necesitarán algunas herramientas adicionales para asegurarse de que todo funcione sin problemas.

El primer desafío al que se enfrenta el administrador de red es la gran variedad de dispositivos heterogéneos y las diferentes formas en que esos dispositivos recopilan, procesan, almacenan y comparten datos. Si bien existen algunos estándares de la industria (fabricantes) que facilitan la conexión en red de dispositivos IoT heterogéneos, puede presentarse problemas. Por ejemplo. Una red heterogénea podría incluir dispositivos que adopten el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), SMCP (Secure Multiparty Computation Protocol), STOMP (Simple/Streaming Text Oriented Messaging Protocol), XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol), AMQP (Advanced Message Queuing Protocol), o bien M3DA, entre otros más. Véase la figura 2.11.

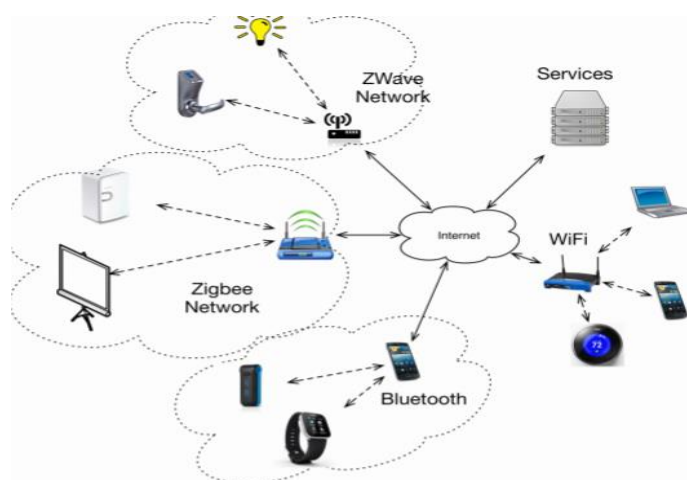


Figura 2. 11 La heterogeneidad en IoT

Fuente: (Desai, Sheth, & Anantharam, 2014)

La heterogeneidad crea dos problemas importantes; los dispositivos son difíciles de administrar y fáciles de piratear. Su integración perfecta solo puede ser posible si se construyen sobre estándares abiertos. Puede haber múltiples estándares para las mismas áreas, pero se debe establecer la interoperabilidad entre ellos (gateways entre diferentes redes físicas).

En los ecosistemas actuales de IoT, los distintos dispositivos y aplicaciones operan en sus propias plataformas sin la compatibilidad adecuada con dispositivos de diferentes proveedores. Por ejemplo, una pulsera inteligente no puede interactuar con una bombilla inteligente sin la aplicación privada relevante proporcionada por el mismo proveedor. Como resultado, se establecen 'islas de funcionalidad' IoT que conducen a una intranet de dispositivos en lugar de un internet de dispositivos. Estos problemas se presentan debido a la gran variedad y heterogeneidad de los dispositivos. Los dispositivos IoT son heterogéneos al estar basados en hardware muy variado de plataformas y redes que se traducen en distintas capacidades de memoria, procesamiento, comunicación y formato de datos (Yacchirema, 2019).

La heterogeneidad introduce complejidad, particularmente con respecto a los requisitos de nivel de servicio esperados, por ejemplo, movilidad de usuarios y dispositivos, confiabilidad³ del software, alta disponibilidad, dinamismo del escenario y escalabilidad. Al respecto los autores Xu, Qu, & Yang (2018) indican que algunas redes IoT son sistemas heredados que se basan en tecnología patentada, mientras que otros adoptan estándares de IoT más abiertos. En los últimos años, la integración de sistemas de red heterogéneas se ha convertido en una fuente principal de innovaciones de red y ha estimulado la propuesta de conceptos interdisciplinarios como: nube de las cosas (CoT, Cloud of Things), red de las cosas (WoT, Web of Things) e internet social de las cosas (SIoT, Social Internet of Things). Además, en el ecosistema IoT en sí mismo no puede almacenar, calcular o analizar datos masivos recopilados de billones de sensores. Esta debilidad es exactamente la fortaleza de la computación en la nube, cuya computación y almacenamiento pueden considerarse infinitos.

2.7.1 El papel de la estandarización IoT

Ante el aumento de aplicaciones de IoT en diversas esferas de la vida, el ETSI y otras organizaciones de normas y estándares se han juntado en la búsqueda de un estándar global para los dispositivos y aplicaciones de IoT.

³ En el desarrollo de software, la confiabilidad es un aspecto crucial a considerar, ya que los usuarios confían en que los programas que utilizan funcionarán de manera confiable y sin fallos que puedan comprometer la integridad de los datos o la seguridad del sistema.

La International Telecommunication Union ITU organismo de las Naciones Unidas para Tecnologías de la Información y la Comunicación, indica que estas redes de sensores están densamente desplegadas, ya sea dentro del ambiente donde ocurre un fenómeno o muy cerca de él, y se basan en el esfuerzo colaborativo de todos sus nodos para la obtención de los datos.

Los nodos sensores dentro de una red WSN pueden monitorizar e interactuar entre ellos al igual como lo hacen los objetos físicos y virtuales en IoT, pero, para que estos objetos puedan interactuar entre sí, se hace necesario que los objetos integren un nodo sensor que les dé la capacidad de monitorizar, procesar y comunicar los datos obtenidos. Una vez se cumpla con este requisito, una aplicación IoT podrá monitorizar o sensor las condiciones físicas o ambientales de la zona geográfica en que se encuentra al igual que una aplicación WSN (Rueda & Talabera, 2017).

Existen requisitos generales que toda aplicación debe cumplir, sin importar el escenario en que se implemente;

- Escalabilidad, donde la red debe ser lo suficientemente flexible como para permitir el crecimiento sin afectar su rendimiento.
- Topologías dinámicas para la red.
- Heterogeneidad.
- Organización en red.
- la agregación de datos.
- La calidad del servicio (QoS).
- La seguridad.
- La integración con el mundo real.

En plataformas de IoT la estandarización tendrán que abordar al menos los siguientes desafíos principales:

- El desafío de la "tecnología avanzada" que plantea, por ejemplo, la incorporación de big data o la virtualización.
- El desafío del "sector empresarial" con la cuestión del desarrollo de grandes sistemas de IoT para ciudades inteligentes, transporte inteligente o IoT industrial.
- El desafío de los "estándares" que plantea el papel de los enfoques emergentes como el código abierto.

2.8 Arquitectura IoT

Las arquitecturas de referencia en IoT es un marco que define los componentes físicos, la organización funcional y la configuración de la red, los procedimientos operativos y los formatos de datos que se utilizarán. De esta

manera tratan de Identificar y estructurar una arquitectura o modelo con negociación para abstraerse de requisitos como conectividad, administración de dispositivos, recolección, análisis de datos, tecnologías específicas etc. Tal referencia puede servir como una guía general y genérica; no todas las aplicaciones de dominio requerirán cada detalle para la implementación en la vida real.

En la literatura científica se encuentra la arquitectura IoT simple con sólo tres capas. Esta maneja esos requisitos y forma un conjunto de funcionalidades, estructuras de información y mecanismos (Weyrich & Ebert, 2016). El modelo de 3 capas es parte de una arquitectura cliente - servidor donde el protocolo HTTP permite las funcionalidades de conexión e intercambio de información de forma constante. También han aparecido arquitecturas de 4 capas y 5 capas, la cual hoy en día, es una referencia más común. Sin embargo, no existe una arquitectura de referencia estándar única para IoT, ya que abarca una variedad de tecnologías. Esto significa que no hay un plan sencillo que se pueda seguir para todas las implementaciones posibles. (Sethi & Sarang, 2016).

2.8.1 Arquitectura IoT de tres capas

Se describe la arquitectura de tres capas:

Capa de sensores: En esta capa se encuentran los sensores y actuadores integrados utilizados para recopilar información del entorno (Sethi & Sarang, 2016). En esta capa se desarrolla la detección o sensado. Aquí están las motas o nodos de WSN y dichos nodos de sensores están equipados de detectores de temperatura, presión, CO₂, sistema de posicionamiento global (GPS), etiquetas de identificación por radiofrecuencia RFID, cámaras, entre otros.

Capa de red: Es responsable de conectar objetos inteligentes a la red de infraestructura de IoT, se utiliza para transmitir y procesar la información recopilada de la capa de percepción. La capa de red transfiere los datos del sensor desde la capa de sensores/percepción a la capa de aplicación y viceversa a través de redes inalámbricas como; 3G, 4G, 5G, LAN, Bluetooth, RFID, etc.

Nivel de aplicación: Encargada de gestionar los datos recolectados para presentar la información a los usuarios finales. Aquí está la conexión con la nube, se la utiliza para controlar, configurar y desencadenar eventos en la puerta de enlace y, en última instancia, en los dispositivos de borde. Algunos de los protocolos que existen en la capa de aplicación incluyen: Protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP, Hypertext Transfer Protocol), HTTP seguro (HTTPS), Transporte de telemetría de cola de mensajes (MQTT, Message Queue Telemetry Transport), Protocolo de cola de mensajes avanzado (AMQP, Advanced Message Queuing Protocol), Protocolo de mensajería y presencia extensible (XMPP, Extensible Messaging and Presence Protocol) y Protocolo de aplicación restringida (CoAP, Constrained Application Protocol), entre muchos otros. Además, también existen una serie de protocolos específicos de

la industria de IoT como Modbus, Protocolo de red distribuida (DNP3), OLE (Object Linking and Embedding) para control de procesos, conocida como OPC, entre otros más.

La arquitectura de tres capas expresa la idea principal de IoT, pero no es suficiente para todos los aspectos y las necesidades futuras. Con la disposición de llegar a diferentes objetivos, como los orientados a los negocios, se propuso una arquitectura de más capas para definir aspectos más específicos. En la figura 2.12 se muestran arquitectura IoT de 3 y 5 capas.

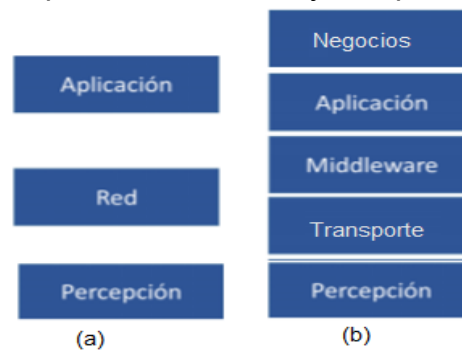


Figura 2. 12 Arquitecturas referenciales para IoT de 3 y 5 capas

Fuente: (Sethi & Sarang, 2016)

Descrito estas tres capas, otras organizaciones del área IoT adicionaron dos capas adicionales tanto a la de red como de aplicaciones (middleware y negocios).

2.8.2 Arquitectura IoT de cinco capas

Esta sigue siendo principalmente una arquitectura de IoT centrada en la nube, donde casi todo el procesamiento de datos de IoT se realiza en la nube o en un servidor remoto. Basado en la figura 2.12(b) que se compara una arquitectura de 3 capas y una de 5 capas, se describe características de las capas extras en la arquitectura de 5 capas. Se aprecia que la capa de middleware y transporte forman la capa red en modelo de 3 capas mientras que capas de aplicación y negocios forman la capa de aplicación en modelo 3 capas.

- La capa de transporte mantiene la confidencialidad de los datos recibidos desde la capa de percepción y los reenvía de forma segura a la capa superior hacia el sistema central de procesamiento de datos.
- La capa middleware se la conoce también como capa de procesamiento, esta almacena, analiza y procesa datos que provienen de la capa de transporte. Utiliza protocolos de aplicación de bajo consumo de energía como el protocolo de transporte y telemetría de cola de mensajes (MQTT) y el protocolo de aplicación restringida (CoAP) son utilizados por los dispositivos de la capa percepción. Puede administrar y proporcionar un conjunto diverso de servicios a las capas inferiores. Así también recuperar, procesar, computar

información y tomar una decisión basada en resultados calculados automáticamente.

- La capa de aplicación se encarga de la gestión de datos en toda la red. Dado que una gran cantidad de dispositivos conectados está aumentando rápidamente en la red, también se generarán datos masivos. El usuario no necesita preocuparse por la enorme carga del mantenimiento o la gestión/procesamiento de todos los recursos localmente. Esta capa adoptará las estrategias comerciales futuras hacia una sociedad centrada en el ser humano
- La capa de negocio gestiona todo el sistema de IoT, incluidas las aplicaciones, los modelos empresariales y de beneficios y la privacidad de los usuarios. Ayuda a los gerentes a tomar decisiones comerciales.

2.8.2.1 Capa Middleware en IoT

El middleware es un software que sirve como interfaz entre los componentes de la IoT, lo que hace posible la comunicación entre elementos que de otro modo no serían capaces. Conecta programas diferentes, a menudo complejos y ya existentes que no fueron diseñados originalmente para conectarse. La esencia de IoT es hacer posible que casi cualquier cosa esté conectada y comunique datos a través de una red. El middleware es parte de la arquitectura que permite la conectividad para una gran cantidad de cosas diversas al proporcionar una capa de conectividad para los sensores y también para las capas de aplicaciones que brindan servicios que garantizan comunicaciones efectivas entre el software.

La capa de middleware debe proporcionar los servicios necesarios a los desarrolladores de aplicaciones para que puedan centrarse más en los requisitos de las aplicaciones que en interactuar con el hardware básico. En resumen, el middleware abstrae el hardware y proporciona una interfaz de programación de aplicaciones (API) para la comunicación, la gestión de datos, la computación, la seguridad y la privacidad.

Se puntualiza que el middleware para WSN está orientada a la configuración de la capa de red y dispositivos. Mientras que para un entorno IoT está enfocada en soportar toda la infraestructura y ofrecer servicios a la capa de aplicación. A continuación, se detallan componentes de un middleware para un entorno IoT:

Capa de tecnología de borde: Esta es una capa de hardware que consta de sistemas integrados, etiquetas RFID, redes de sensores y todos los demás sensores en diferentes formas. Esta capa de hardware puede realizar varias funciones, como recopilar información de un sistema o un entorno, procesar información y respaldar la comunicación.

Capa de puerta de enlace de acceso: Esta capa se ocupa del manejo de datos y es responsable de publicar y suscribir los servicios que brindan las Cosas, el enrutamiento de mensajes y la comunicación entre plataformas.

Capa de middleware: Esta capa tiene algunas funcionalidades críticas, como agregar y filtrar los datos recibidos de los dispositivos de hardware, realizando el descubrimiento de información y proporcionando control de acceso a los dispositivos para aplicaciones.

Capa de aplicación: Esta capa brinda varios servicios de aplicaciones. Estos servicios se proporcionan a través de la capa de middleware a diferentes aplicaciones y usuarios en sistemas basados en IoT. Los servicios de la aplicación se pueden utilizar en diferentes industrias como logística, retail, salud, etc.

2.9 Computación en la nube en arquitectura IoT

Lo que hace que el IoT basado en la nube sea diferente del IoT convencional es básicamente la capacidad de desarrollar, implementar, ejecutar y administrar aplicaciones de cosas en línea a través de la nube. Así se crea un nuevo paradigma, como se denomina Cloud of Things (CoT). Estas arquitecturas agregaron una capa de computación en la nube para obtener flexibilidad y escalabilidad del almacenamiento de datos, análisis de datos, integridad y privacidad. La esencia del Cloud Computing no se encuentra tanto en las herramientas que usa (software, plataformas, tecnologías), si no en la forma en la que las usa, agrupa y ensambla, unificando algunos de los principios más importantes para la creación de dinámicas apropiadas o de capacidades de las aplicaciones comerciales (servicios y/o acuerdos de nivel de servicio negociados entre los proveedores y los consumidores) a los que se puede acceder a través de una red. En la figura 2.13 se aprecia el cloud o nube convencional.

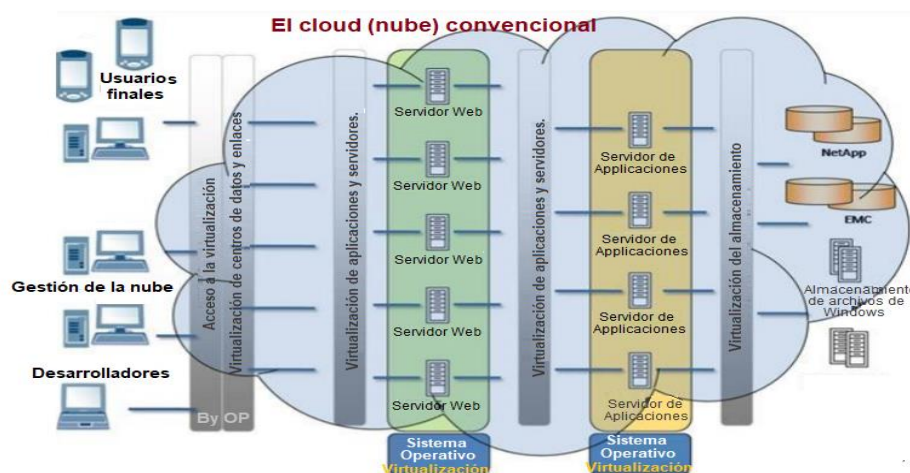


Figura 2. 13. El cloud convencional

Fuente: (Jimenez, 2013)

El modelo de computación en la nube móvil introdujo los recursos de computación en la nube basados en proximidad física proporcionados por los proveedores de puntos de acceso a Internet inalámbricos locales. Además, la viabilidad de la nube basada en la red ad hoc móvil (MANET) promueve que el cloud computing este desarrollándose hasta la actualidad. Entre los diversos enfoques, la arquitectura de computación en la niebla (fog) liderada por la industria, que fue introducida por primera vez por la investigación de Cisco, ha ganado la mayor atención. Así, varios enfoques han intentado extender la computación en la nube centralizada a una manera más geo distribuida en la que los recursos computacionales, de redes y de almacenamiento se pueden distribuir a las ubicaciones que están mucho más cerca de las fuentes de datos o las aplicaciones del usuario final.

En este enfoque cloud existen servicios que interactúan con las arquitecturas de IoT tres tipos de servicios: Infraestructura como Servicio (IaaS), Plataforma como Servicio (PaaS) y Software como Servicio (SaaS). Al ser la arquitectura de IoT basada en la computación en la nube de tipo centralizada, aunque la velocidad de procesamiento y cálculo de datos ha aumentado rápidamente, el ancho de banda de la red no ha aumentado de manera apreciable en consecuencia, lo que puede provocar una latencia prolongada. Las aplicaciones sensibles a la latencia de IoT que requieren un tiempo de respuesta corto no pueden permitirse el retraso causado por la transferencia de datos. La toma de decisiones en la nube requiere datos de alta calidad, no es necesario transmitir todos los datos recopilados a la nube debido a su procesamiento y almacenamiento ineficaces.

En la figura 2.14 se muestra un escenario IoT con cloud computing.

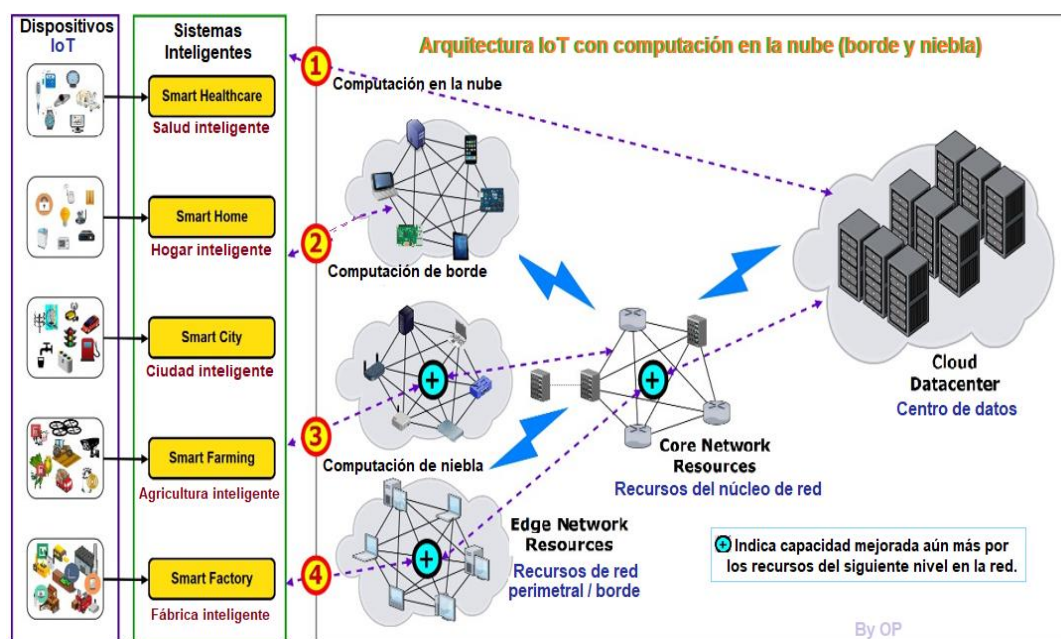


Figura 2. 14 Escenario IoT y cloud computing

Fuente: (Buyya, Chang, & Narayana, 2018)

2.9.1 Arquitectura IoT de la computación en niebla

Para superar estos problemas, la computación en la niebla extiende el servicio en la nube al borde de la red. Se agrega una nueva capa llamada capa de niebla entre los dispositivos finales y las nubes. La arquitectura de cálculo de niebla agrega la capa de niebla entre los dispositivos finales y la nube para abordar estos desafíos, como la baja latencia. También permite seguridad, alto rendimiento, movilidad e interoperabilidad para optimizar la arquitectura de IoT.

Una arquitectura de niebla presenta un enfoque en capas que inserta capas de supervisión, preprocesamiento, almacenamiento y seguridad entre las capas física y de transporte. La capa de monitoreo supervisa la energía, los recursos, las respuestas y los servicios. La capa de preprocesamiento realiza el filtrado, el procesamiento y el análisis de los datos del sensor. La capa de almacenamiento temporal proporciona funcionalidades de almacenamiento como la replicación, distribución y almacenamiento de datos. Finalmente, la capa de seguridad realiza el cifrado/descifrado y garantiza la integridad y privacidad de los datos. El monitoreo y el preprocesamiento se realizan en el borde de la red antes de enviar datos a la nube.

A menudo, los términos "computación en la niebla" y "computación de borde" se usan indistintamente. El último término es anterior al primero y se considera más genérico. La computación en la niebla se refiere a puertas de enlaces inteligentes y sensores inteligentes, mientras que la computación de borde ha evolucionado y se le han introducido varias arquitecturas. Así prevé agregar capacidades de preprocesamiento de datos inteligentes a dispositivos físicos como motores, luces, electrodomésticos, etc. El objetivo es hacer tanto preprocesamiento de datos como sea posible en estos dispositivos. La computación de borde puede superar los problemas resultantes de la red y su latencia enviando datos a los recursos informáticos en el borde de la red.

Ejemplos en las aplicaciones de IoT son: optimizar el proceso de descarga y/o migrar las cargas de trabajo de los usuarios a los servidores de borde en función de la densidad de los dispositivos de IoT, considerando la movilidad del usuario. Otro ejemplo frecuente es el análisis de los datos recopilados por los sensores de IoT para la predicción del comportamiento del usuario en el entorno de computación de borde móvil (MEC, Mobile Edge Computing) para almacenar en caché datos en el borde de la red, con el fin de reducir el tráfico de la red y el retraso del servicio de las aplicaciones y la introducción de mecanismos de colaboración o externalización de ciertas tareas de un proyecto (crowdsourcing) en el borde de la red utilizando dispositivos de IoT.

CAPÍTULO 3:

DESCRIPCIÓN DE LA

CALIDAD DE SENSADO

EN WSN

Una red WSN típica consta de dos componentes principales, el nodo sensor (mota) y la BS o nodo sink. Una mota en WSN es un dispositivo que normalmente está equipado con capacidades de detección, procesamiento y comunicación, y además comprueba los parámetros asociados con una aplicación en particular. Una BS proporciona acceso a todos los datos de medición de los nodos y, a veces, puede proporcionar servicios de puerta de enlace para permitir que los datos se gestionen de forma remota. Los datos sensados se envían a una base de datos o al cloud para su almacenamiento y posterior procesamiento de manera que permitan tomar acciones específicas basadas en los servicios requeridos.

Cuando se busca mejorar la QoSensing esta puede verse restringida inclusive por la consideración de métricas limitadas (Palacios & et al, 2019). Una métrica se emplea para monitorear y valorar el rendimiento, en este caso de una WSN en un área o región a lo largo del tiempo. Para efectuar la labor de sensado se necesita de hardware o módulo (nodo sensor) que opere de forma eficiente

En la figura 3.1 se muestra la representación de un nodo sensor, conocido también como mota por la característica de poseer una unidad de preprocesamiento, más un módulo de comunicaciones inalámbricas compatible con protocolo IP versión 6, Zigbee, Lora, etc.

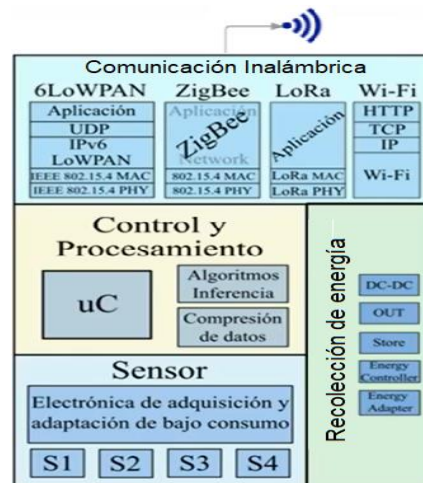


Figura 3. 1. Nodo sensor

La unidad de memoria se utiliza para el almacenamiento de datos relacionados con la aplicación y también contiene información de identificación del dispositivo, la unidad de detección contiene sensores para capturar datos de su entorno y el transceptor (módulo de radio) es responsable de la transmisión y recepción de datos. El módulo de radio es el componente que consume más energía, y el consumo de energía de la radio cuando está inactiva es aproximadamente diez veces menor que cuando la radio está recibiendo datos. De acuerdo con estas apreciaciones, Se evaluó que un TelosB puede durar 95 horas con un ciclo de trabajo del 100% (sin dormir, la radio siempre encendida, sin comunicación) y 200 horas con un ciclo de trabajo del 25%. (Nguyen, Förster, Puccinelli, & Giordano, 2011).

3.1 Consumo de energía en nodos de una WSN

Las principales fuentes de consumo de energía en los nodos sensores son las tareas de comunicación, seguidas de las operaciones de cómputo y detección. Aunque las diferentes plataformas de detección tendrán diferentes perfiles de consumo de energía, las siguientes consideraciones son aplicables de forma general (Rault, 2015):

- 1- El subsistema de comunicación tiene un consumo de energía mucho más alto que el subsistema de computación.
- 2- El consumo de energía en la parte de radio comunicaciones es del mismo orden de magnitud en los estados de recepción, transmisión e inactividad, mientras que el consumo de energía disminuye al menos en un orden de magnitud en el estado de sueño. Por lo tanto, la radio debe apagarse siempre que sea posible. (Suciu, 2020).
- 3- Dependiendo de la aplicación específica, el subsistema de detección podría ser otra fuente importante de consumo de energía, por lo que su consumo de energía debe reducirse también en la medida de lo posible. (Khan, Qureshi, & Iqbal, 2016).

En la tabla 3.1 se muestra el perfil de consumo de energía de una plataforma típica de sensores, como es TelosB.

Tabla 3. 1. Perfil de consumo energético de sensores TelosB.

Módulo	Modo	Corriente medida
Radio	Recepción	22.8 mA
Radio	Transmisión (0 dB)	21.7 mA
Radio	Transmisión (- 25 dB)	12.1 mA
Radio	Inactivo (- 25 dB)	2.4 mA
Microcontrolador	CPU activa	2.33 mA
Microcontrolador	CPU inactiva	2.25 mA
Memoria flash interna	Borrado	1.35 mA
Memoria flash interna	Escritura	0.9 – 1.34 mA
Memoria flash interna	Lectura	0.68 mA
Microcontrolador	CPU inhabilitada	1.80 μ A

En la Figura 3.2 se muestra la plataforma de código abierto TelosB desarrollada por la Universidad de California en Berkeley Estados Unidos con el objetivo de facilitar la experimentación de la comunidad científica. El modelo mostrado en la figura mencionada es del modelo CM5000, que incluye sensores que miden la temperatura, la humedad relativa y la luminosidad. Posee interfaz USB compatible con el estándar IEEE 802.15.4, tiene una antena empotrada, usa 2 baterías AA y alcanza velocidades de transmisión de datos de 250 Kbps. (Advanticsys, 2013).



Figura 3. 2. Mota TelosB modelo CM5000

Fuente: (Advanticsys, 2013)

La integración de sistemas de detección, procesamiento de señales y funciones de comunicación de datos convierte a la WSN en una plataforma importante para procesar los datos recopilados del entorno. Los algoritmos y protocolos para estas redes deben permitir el funcionamiento de la red durante la inicialización, el proceso normal y las situaciones de emergencia (Sendra, Parra, Lloret, & Khan, 2015).

3.1.1 Requisitos para desempeño conveniente en WSN

En el despliegue de una red WSN con desempeño conveniente existen varios requisitos, entre los que se destacan los siguientes.

- La fiabilidad en la red, asegurando un nivel suficiente de tolerancia a fallos para recuperarse cuando hay un fallo de nodo.
- La energía se convierte en un punto crucial porque los dispositivos sensores funcionan con baterías (Liu & Chao, 2012)
- El consumo de recursos hardware es otro de los problemas asociados sobre todo cuando se trata de dispositivos destinados a ser desplegados en grandes espacios de monitorización, control y detección en entornos no accesibles, etc.
- El tipo de protocolo de enrutamiento utilizado es un aspecto importante a tener en cuenta porque en la mayoría de los casos está a cargo de redes inalámbricas multisalto en las que cada nodo debe realizar las funciones de enrutamiento de esos datos de un nodo a otro (Riva & Finochietto, 2012).
- Arquitecturas y topologías eficientes para resolver cualquier requisito de WSN.
- Aspectos de seguridad cubiertos por los requisitos de WSN, integridad, autenticación y confidencialidad.

3.2 La cobertura de detección en WSN

Muchos trabajos de investigación han sido desarrollados con el objetivo de implementar nuevos mecanismos de sensado y conectividad en WSN con optimización del uso de la energía de sus nodos sensores con arquitectura de código abierto. Y en especial en mejorar las tareas de detección con nodos de sensores distribuidos que es un tipo de despliegue de red WSN ajustado a la realidad.

El problema de QoSensing ha despertado mucho interés a lo largo de los años y, como resultado, se propusieron muchos protocolos de cobertura de detección. La cobertura de detección es una medida de QoS de la función inicial de detección y está sujeto a una amplia variedad de interpretaciones debido a la gran diversidad de sensores y aplicaciones. Para evaluar la QoS, la mayoría de los parámetros medidos son el retraso típico, la variación del retraso, el ancho de banda disponible y la pérdida de paquetes, medidos de extremo a extremo (Chen & Varshney, 2004) En este contexto, un sistema que proporciona una mayor precisión de detección de eventos para la misma cantidad de consumo de energía puede considerarse energéticamente eficiente. La alta cobertura y conectividad requiere energía y produce retardos (Wang B. , 2011).

Así, se introducen nuevos requisitos relacionados con la eficiencia de detección que se denomina QoSensing. Este aspecto, tiene métricas como: cobertura, conectividad, retardo, eficiencia energética y tasa de transferencia (throughput) de la WSN con derivación en la eficiencia energética. El QoSensing ha sido estudiado por (Liang, Luy, & Kui, 2014), (Mihajlov & Bogdanoski, 2014), (Gifty & Sumathi, 2016) entre otros más.

3.3 Modelos de detección

El fenómeno detectado por una WSN puede ser discreto o distribuido. Un fenómeno es discreto si está ubicado en un lugar específico y, por lo general, puede ser detectado por completo por un solo nodo de sensor. Es posible que se requieran múltiples sensores si el fenómeno es móvil, por ejemplo, para facilitar el seguimiento, o pueden permitir una mayor fidelidad de los datos recopilados. Los fenómenos distribuidos afectan un área o volumen y solo pueden ser capturados por completo por un mayor número de sensores. Las WSN se pueden usar para monitorear un solo fenómeno o múltiples fenómenos independientes.

Los modelos de detección son modelos de abstracción que se utilizan para reflejar la capacidad y la calidad de detección de los sensores. Los modelos de detección se clasifican ampliamente, según la capacidad de detección, en dos tipos: modelos de detección deterministas y modelos de detección probabilísticos o aleatorio. Además, se pueden clasificar según la dirección del

rango de detección; en modelos de detección direccional o modelos de detección omnidireccional.

3.3.1 Despliegue Aleatorio vs. Determinístico

Según la posibilidad de la ubicación de los nodos sensores, estos pueden estar en dos formas: despliegue aleatorio y despliegue determinista. El método de implementación determinista, también conocido como implementación de red estructurada, ubica los nodos sensores en ubicaciones pre estimadas en el campo de interés dividiéndolo en un patrón regular (es decir, cuadrado, triángulo y hexágono) y patrón irregular. Los nodos sensores se colocan en los vértices de un patrón dado (Alnawafa & Marghescu, 2018). Sin embargo, algunos escenarios de WSN, como la inaccesibilidad (terreno difícil) o el costo de implementación, no pueden tener una implementación determinista.

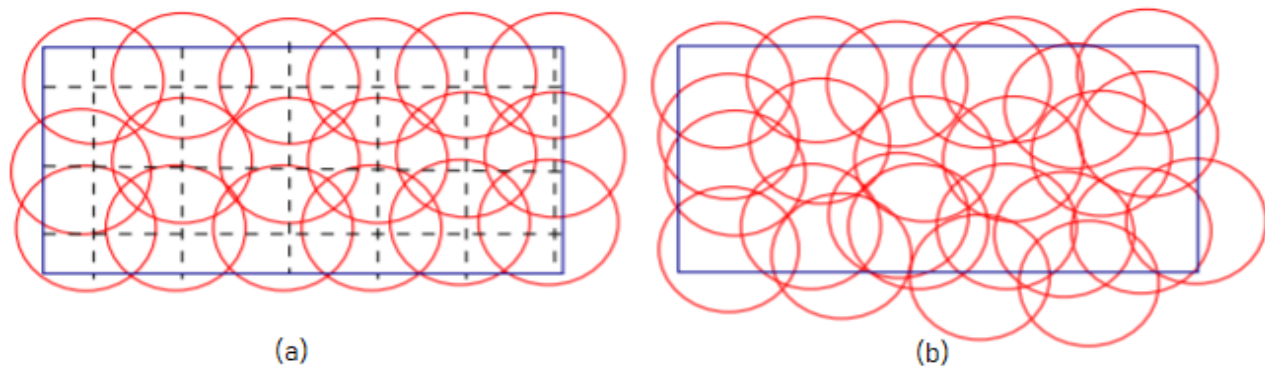


Figura 3. 3 Despliegue determinista (a) y despliegue aleatorio (b) en WSN.

En la figura 3.3 (b) se muestra el despliegue aleatorio (también llamado despliegue probabilístico), Por consiguiente, es una red no estructurada los nodos están dispuestos de forma densa y aleatoria. Se adopta normalmente en aplicaciones a gran escala, donde los nodos sensores se encuentran dispersos aleatoriamente en el campo de interés. Los problemas de red y las fallas de conectividad es lo más frecuente principalmente debido a implementaciones aleatorias. Por lo tanto, garantizar la conectividad de la red, la detección de fallas y la administración de la red no son tareas sencillas. Esto es diferente a las WSN estructuradas. Para lograr un alto nivel de cobertura y conectividad, los nodos móviles se pueden utilizar en una red no estructurada.

3.3.2 Homogéneas vs. Heterogéneas

Una WSN homogénea consta de nodos sensores de igual capacidad en términos de radios de detección y comunicación, energía, almacenamiento y software, etc. Sin embargo, no es factible ni prácticamente posible mantener la homogeneidad en toda la vida de la red. Los siguientes problemas muestran que mantener la homogeneidad en las WSN no es factible o impráctico. En la figura 3.4 se muestra una red con nodos que detectan diversas variables del ambiente en una industria minera (temperatura, nivel de agua, conductividad

eléctrica, pH, etc.), esto es un caso real de red con nodos heterogéneos en la red WSN.

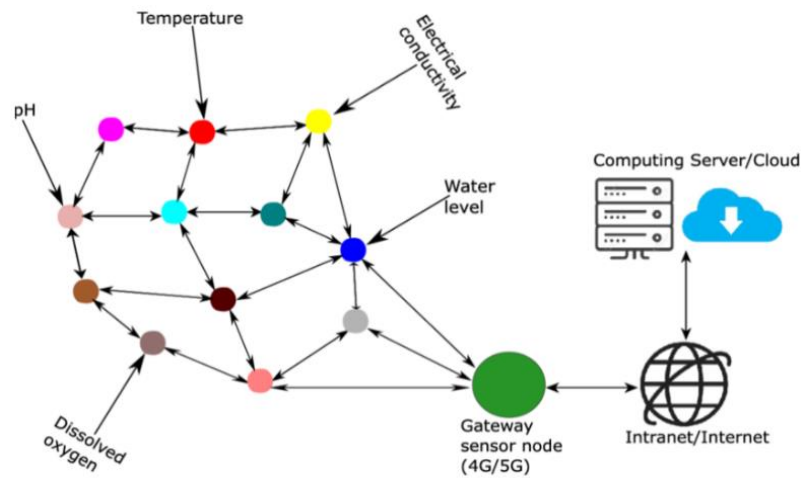


Figura 3. 4. Red WSN con nodos heterogéneos

Fuente: (More, Wolkersdorfer, & Kang, 2020)

La eficiencia energética en las WSN también crea la heterogeneidad en las WSN. Algunos nodos sensores ajustan sus rangos de comunicación y detección según los requisitos de las WSN. Este ajuste en los rangos ayuda a reducir el consumo de energía, pero crea la heterogeneidad en las WSN. Véase la figura 3.5 con nodos con condiciones ajustadas a su fase de sensado y/o cobertura (Rs_1 y Rs_2) son ejemplos de nodos heterogéneos.

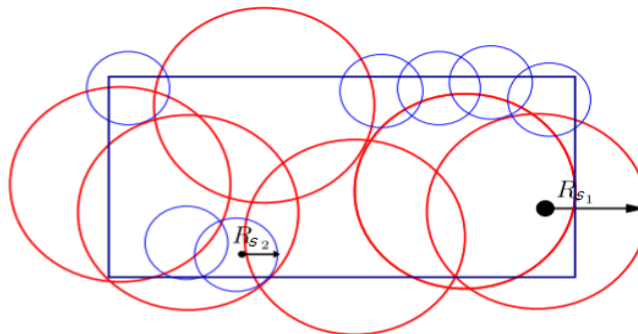


Figura 3. 5 Nodos con diferente rango de sensado

3.3.3 Direccional Vs. Omni-direccionales

Se dice que un objetivo en campo de interés es rastreado por un nodo sensor si se encuentra en la región de detección del nodo sensor. Las WSN se pueden clasificar en las siguientes dos categorías según la forma de la región de detección de los nodos sensores: WSN direccionales y omnidireccionales. Dentro de las WSN direccionales sus nodos sensores mantiene una región de detección delimitada en una dirección fija. (Tripathi, Prabhat, Dutta, Mishra, & Shukl, 2018) El nodo sensor direccional no puede detectar los objetivos en otras direcciones, incluso la distancia entre el objetivo y el nodo sensor en no más del rango de detección del nodo sensor.

A diferencia de las WSN direccionales, un nodo sensor en una WSN omnidireccional monitorea por igual en todas las direcciones. Las principales ventajas de las WSN direccionales son la eficiencia energética y el problema de baja interferencia. Debido al monitoreo solo en una dirección determinada, consume menos energía. La dirección de un nodo de detección es fija, por lo que la superposición de las regiones de detección de otros nodos de detección vecinos es menor y, por lo tanto, reduce el problema de interferencia (Gupta, Rao, & Venkatesh, 2016). Ejemplos de tales nodos de sensores direccionales son sensores de cámara, sensores multimedia, sensores infrarrojos, sensores ultrasónicos y sensores de radar. Véase la figura 3.6.

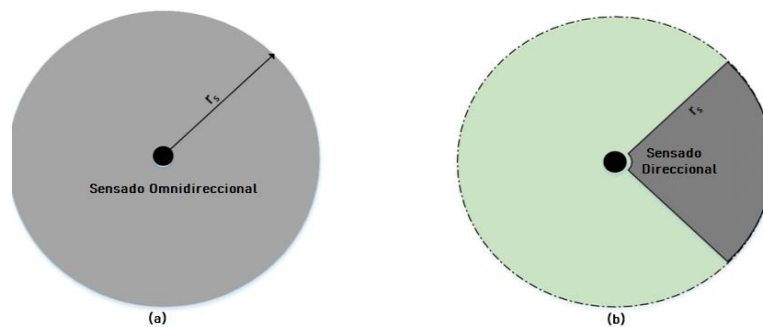


Figura 3. 6. Nodos Omnidireccional y Direccional en WSN

Fuente: (Priyadarshi, Gupta, & Anurag, 2020)

En la figura 3.6 (a) se muestra un nodo sensor basado en una región de comunicación omnidireccional puede comunicarse con otros nodos sensores solo si las ubicaciones de los nodos sensores se encuentran dentro de las regiones de comunicación de los nodos sensores. En figura 3.6 (b) se muestra un nodo de WSN direccional, el cual enfoca un haz de detección limitado.

Según el escenario de la aplicación, las WSN siguen diferentes enfoques para el sensado y el procesamiento de datos. En el caso de detección periódica, los nodos leen regularmente sus sensores, procesan los datos resultantes y posiblemente reaccionan en consecuencia. Las WSN activadas por eventos permanecen inactivas durante la mayor parte de su vida y esperan algún evento determinado. Cada nodo monitorea sus sensores hasta que se detecta un evento relevante.

3.4 Criterios de cobertura en WSN con despliegue aleatorio

La cobertura de detección es un problema fundamental en las WSN y ha sido muy estudiado en los últimos años. El despliegue aleatorio de nodos puede causar una seria superposición de cobertura entre los nodos y la red original puede sufrir graves problemas de cobertura debido a la muerte de los nodos después del despliegue. Además, el mantenimiento de la cobertura y la conectividad de la red es muy esencial, ya que una pequeña área no supervisada puede arruinar todo el propósito de la red si no se detecta. Por lo

tanto, es difícil o imposible garantizar una cobertura completa de la región monitoreada, incluso si la densidad de nodos es muy alta.

La mayoría de los trabajos de investigación recientes se centran en modelos de sensado deterministas que generalmente asumen la capacidad de detección uniforme de un sensor en todas las direcciones. Pero estos modelos no son adecuados para entornos realistas. Muchas de las redes de sensores se concentran en detectar señales específicas como energía térmica, señal acústica, señal sísmica, ondas de radio, ondas de luz o campo magnético, en el área de detección preferida. Estas señales se ven afectadas por factores como ruido, interferencia, reflejo de señales, obstrucciones en la ruta de propagación y movimiento de otros objetos.

La desviación en la intensidad de la señal recibida debido a obstrucciones en la ruta de propagación se conoce como sombreado (agujeros de cobertura), mientras que la desviación debida a reflexiones se conoce como desvanecimiento por trayectos múltiples. Este escenario realista puede enfocarse con objetivos móviles. Ya que un despliegue aleatorio es un problema importante en las WSN pues se ocupa de encontrar el patrón de colocación de sensores que cumpla con los requisitos de cobertura y conectividad.

3.4.1 Agujeros de cobertura

En su forma más simple, la cobertura significa que cada punto en una región de interés es monitoreado por (dentro del rango de detección) al menos un sensor. Una forma más general es observarlo como el problema de k -cobertura, donde cada punto en un (Roi) debe ser monitoreado por k (k es igual a una región cubierta por un sensor) o más sensores. La probabilidad de cobertura juega un papel fundamental en la detección de huecos o agujeros de cobertura debido a los errores existentes en el rango de detección y comunicación. Los agujeros difícilmente se evitan en las WSN debido a los diversos entornos geográficos de la región de monitoreo, como la presencia de estanques, obstáculos o incluso debido a la muerte de los nodos. Ignorar la detección de agujeros afecta la eficiencia del enrutamiento geográfico, la pérdida de información o congestión de datos y el consumo excesivo de energía de los nodos del límite del agujero. (Baltaci & Dinc, 2021). Además, para el flujo de información, el agujero también podría afectar la capacidad general de la red. Por lo tanto, la identificación de los agujeros en las WSN es de interés primordial, porque su presencia a menudo tiene una correspondencia física y también puede corresponder a uno de los eventos especiales que están siendo monitoreados por las redes de sensores.

Los agujeros de cobertura también pueden convertirse en barreras para la comunicación de la red pues tienen un gran impacto en el rendimiento. En la figura 3.7 se muestra una representación de un área supervisada con muchos nodos sensores con un despliegue realista o no planificado y en los que se

muestra con círculos color amarillo el rango de detección de cada nodo pero que en el despliegue aleatorio se forman dos “agujeros” en dicha área supervisada.

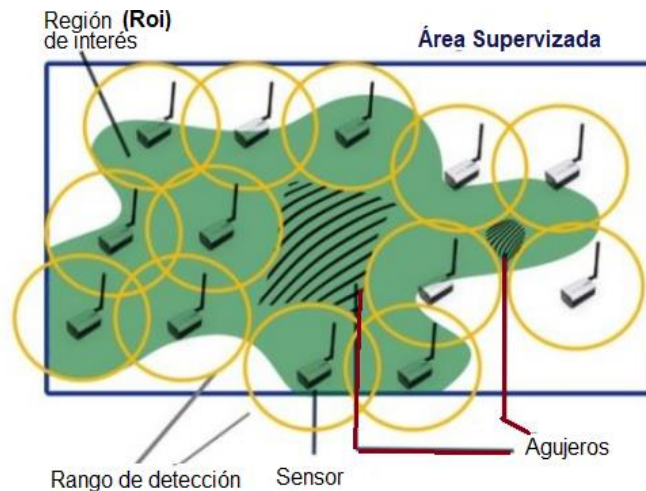


Figura 3. 7 Agujero de cobertura en área supervisada

Fuente: (Khamlichi, Mesmoudi, Tahiri, & Abtoy, 2018)

Si hay un agujero en la red, los datos se enrutarán a lo largo de los nodos límite del agujero una y otra vez, lo que conducirá al agotamiento prematuro de la energía presente en estos nodos. En última instancia, esto aumentará el tamaño del agujero en la red. Cuando muere energéticamente un nodo también se forman agujeros.

Véase en la figura 3.8 los resultados de la muerte de un nodo sensor en una región supervisada (a) Pérdida de conectividad debido a la muerte del nodo D; (b) Agujero de cobertura debido a la muerte del nodo D; (c) Tanto el agujero cobertura como la ausencia de conectividad se produce debido a la muerte del nodo D.

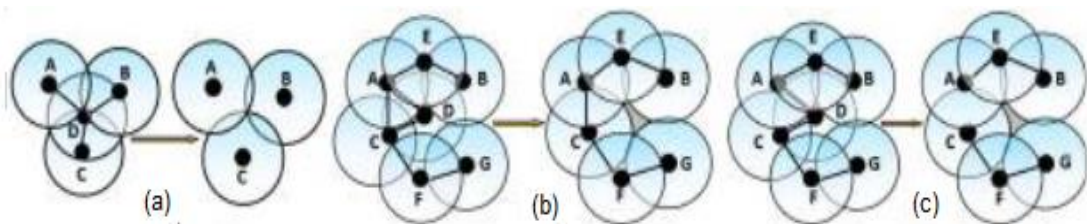


Figura 3. 8 Escenarios con agujeros de cobertura y conectividad por muerte del nodo D.

Fuente: (Sahoo, Chiang, & Wu, 2016)

Hay que indicar que el problema de conectividad tiene que ver con localizar enlaces de comunicación directos o indirectos de alta calidad y eficiencia energética entre los sensores con la BS. Y es un aspecto distinto un área desatendida cuando la batería de un nodo se agotó, se dañó de forma prematura. Cuando esto sucede no podría retransmitir los datos a los nodos siguientes. Por lo tanto, las soluciones de cobertura no pueden garantizar la conectividad de la red. Así que la cobertura como los problemas de

conectividad deben investigarse conjuntamente para garantizar un despliegue adecuado.

Los trabajos publicados en revistas científicas no proponen cómo maximizar la recuperación de los agujeros de cobertura minimizando el grado de superposición de cobertura para WSN realistas o de despliegue no planificado. Al respecto una WSN con nodos sensores móviles pueden moverse después del despliegue inicial para cumplir la tarea de maximizar la cobertura. Sin embargo, la topología de la red de sensores se ve afectada por los nodos móviles, ya que forman nuevas conexiones y rompen las antiguas. Si el área de cobertura de un nodo puede ser cubierta por su nodo vecino, entonces solo un nodo puede moverse a otra área.

3.4.2 Diseño de estrategia contra agujeros de cobertura

En la literatura científica se han encontrado diseños de algoritmos para detección y recuperación de agujeros de cobertura. Véase la en la figura 3.9 superposición de coberturas (círculos en color verde) por parte de nodos sensores redundantes (color violeta).

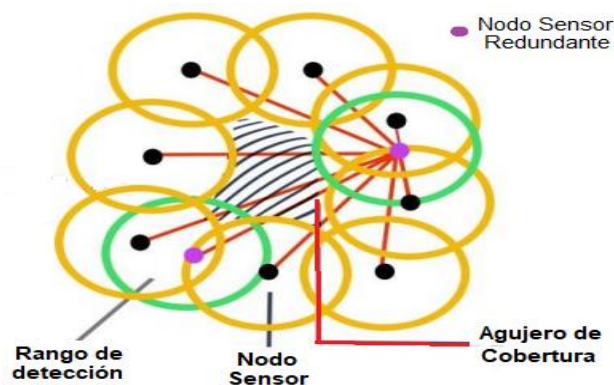


Figura 3. 9 Escenario de nodos redundante en WSN

Fuente: (Khamlichi, Mesmoudi, Tahiri, & Abtoy, 2018)

En la figura 3.10 se muestra la dirección de movimiento del nodo sensor seleccionado para cubrir una región descubierta.

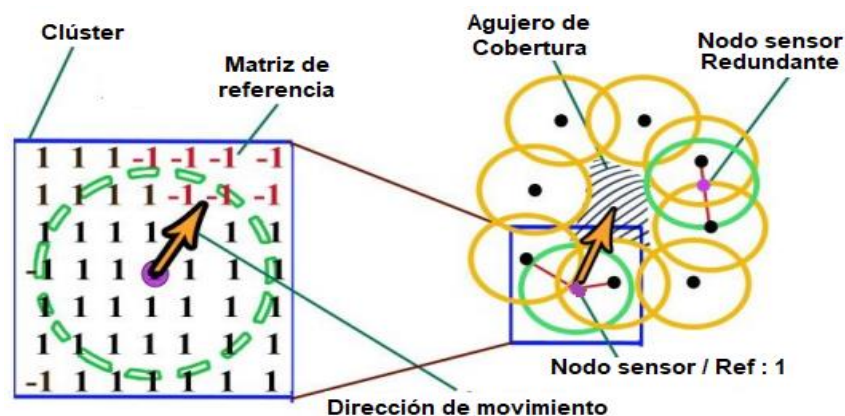


Figura 3. 10 Escenario con dirección de movimiento de un nodo sensor

Fuente: (Khamlichi, Mesmoudi, Tahiri, & Abtoy, 2018)

Como se ha indicado, la etapa de sensado podría llegar a ser una etapa con consumo crítico de energía, por lo tanto, en su diseño debe planificarse eficientemente sus ciclos de activación, es decir los periodos de muestreo de las señales de interés de esta manera optimizar el consumo energético a través de la cantidad y calidad de los datos que se transmitan entre los nodos de una WSN con despliegue realista o aleatorio.

3.5 Criterios de consumo energético WSN

Se indican consideraciones de operación relacionado con la eficiencia energética en una WSN:

- Minimizar la energía total de la ruta: Con el enfoque de energía total mínima o MTE (Minimum Total Energy), se busca minimizar la energía de transmisión y recepción total consumida por un paquete para alcanzar el destino. Sucede que, si todo el tráfico se encamina a través de las rutas más económicas, los nodos en esa ruta se agotan rápidamente, particionando la red, por lo que no se recomienda utilizar esta métrica en forma aislada (Garbarino, 2011)
- Maximizar el tiempo hasta que la red se particiona: Se determinan los nodos que al ser extraídos causan particiones, y se trata de balancear la carga sobre los mismos.
- Uniformizar el consumo de energía: Este objetivo se puede alcanzar mediante el uso de rutas compuestas por los nodos de mayor energía residual, evitando los nodos de menor capacidad restante. Se sacrifica el uso de rutas más cortas por el beneficio de posponer al máximo posible la muerte del primer nodo.
- Minimizar el costo por paquete: Se seleccionan las rutas de menor costo total, que equivale a la suma de los costos de cada enlace que se utiliza. Si se define adecuadamente el costo del enlace, puede utilizarse la métrica con diferentes objetivos. Por ejemplo, si el costo depende de la energía residual, se puede lograr aumentar el tiempo hasta el particionamiento de la red.

Los problemas que se presentan en el desempeño de WSN, son los siguientes:

- 1) Los nodos de sensores funcionan con baterías de baja autonomía, por lo que tienen recursos de energía limitados que necesitan una utilización cuidadosa.
- 2) Algoritmos de ruteo que mantengan bajo consumo de energía sin degradar los datos en redes con flujo de tráfico continuo.
- 3) Diseño y despliegue de nodos de manera aleatoria que generen alto tráfico en la red.
- 4) Degradación de la conectividad mediante el empleo de técnicas desbalanceadas de gestión energética.

CAPÍTULO 4:

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE CALIDAD DE SENSADO PARA WSN EN TOPOLOGÍAS ESTRELLA Y MALLA

Los nodos sensores se pueden implementar de forma aleatoria y en alta densidad para garantizar una mayor cobertura. Sin embargo, el despliegue aleatorio de ellos puede dar como resultado que varios nodos cercanos (redundantes) cubran la misma área y, por lo tanto, provoquen un consumo de energía innecesario.

La aparición de agujeros no solo destruye el enlace de comunicación y reduce la precisión de los datos, sino que también agrava la carga de transmisión de los nodos límite cerca de los agujeros, lo que resulta en la expansión del rango de agujeros (Chase, Wu, & Wang, 2017).

4.1. Trabajos relacionados

Se revisan obras científicas relacionadas en cobertura de sensado y ruteo para red WSN con eficiencia energética. Se expone un breve análisis de los mecanismos y técnicas empleadas

En muchas aplicaciones de WSN se requieren de cobertura k del área monitoreada. Esto es el área que puede ser cubierta por al menos k de n sensores colocados aleatoriamente en una región delimitada. Esto se conoce como el problema k -cobertura y evaluar k -cobertura es una forma del llamado problema de cobertura en WSN. Donde k es un número entero mayor que 1, según el número mínimo de nodos sensores que deben detectar simultáneamente el área de interés. Sin embargo, hay varios factores que afectan la cobertura del área. Por ejemplo, el despliegue de nodos sensores puede ser aleatorio o determinista. Esta dificultad de cobertura fue mejorada por el Algoritmo de mejora de la cobertura k (KCEA, K -Coverage Enhancement Algorithm) en el que se mejoró la etapa de cobertura inicial. Sin embargo, este método aumenta la complejidad y la latencia debido a la implicación de varias inicializaciones de parámetros en el algoritmo basado en la búsqueda de armonía en términos de tiempo de ejecución (Shaimaa, Haitham, & Imane, 2015). Otros autores lograron la mejora de la cobertura del área con una tasa de convergencia más rápida en una red distribuida. Se formuló un algoritmo de localización basado en bordes centroides (EBC, Edge Based Centroid) en el que obtuvieron resultados de cobertura del área junto con la eficiencia energética (Muhammad, Abdul, Hassan, & Thabit, 2016). Pero este método no es capaz de proporcionar una transmisión fiable que resulta en un bajo rendimiento en dicha red.

Un método basado en la relación de detección superpuesta de cobertura (ECOSR, Enhanced Coverage Overlapping Sensing Ratio). Mejora del índice de cobertura basado en la cuadrícula de agregación de datos utilizando el índice de detección de superposición con el canal AWGN (Additive White Gaussian Noise) en WSN heterogéneas (Akansha, Rajeev, & Jaiswal, 2015). Aquí el comportamiento del nodo sensor fue aproximado por el modelo de sensor de punto de onda aleatorio). Este método requiere nodos de sensores

con la máxima energía para lograr la cobertura requerida. Por lo tanto, el consumo de energía es alto en este método.

Otros autores presentaron un algoritmo de cobertura de superficie para hacer frente a un problema de cobertura en la red de sensores para terrenos complejos tridimensionales. En este algoritmo basado en un modelo de nodos de detección direccional 3-D, emplea división de cuadrícula y recocido simulado para soluciones aproximadas a problemas de optimización combinatorias. (Xiao, Yang, Yang, Sun, & Wang, 2016). El recocido simulado (analogía con el comportamiento de un sistema físico) mejora la relación de cobertura de área mediante la optimización de las coordenadas de posición y los ángulos de desviación de los nodos, lo que da como resultado una mejora de la cobertura para terrenos complejos en 3-D. Aunque la inmersión de tres algoritmos diferentes para un solo propósito aumenta la complejidad y el consumo de tiempo.

Así también se experimentó la restauración de conectividad consciente en nodos de WSN basado en ZigBee con particiones, a través de una estrategia de reposición de transmisión de datos y la partición en WSN (Liu X. , 2016). En este mecanismo de equilibrio de carga se conectaron segmentos particionados, mientras que los puntos de parada para nodos móviles se seleccionaron en función de la probabilidad de error de conectividad. En esta estrategia de transmisión la trayectoria de los paquetes no es óptima pues aumenta la latencia de transmisión y la pérdida de paquetes. Se utilizó el indicador de potencia de señal recibida (RSSI, Received Signal Strength Indicator). La mejora de precisión se logró mediante el filtrado gaussiano con un método de promediación, mientras que la sobrecarga computacional se minimizó mediante el método de mediana basado en muestras RSSI. Sin embargo, este método no es capaz de lograr una alta precisión de entrega de paquetes y además aumenta el consumo de energía.

Se diseñó también un enfoque de control de topología adaptable dual basado en clústeres donde cada nodo sensor fue equipado con la tecnología de múltiple entrada y múltiple salida (MIMO) para mejorar el rendimiento (Gui, Zhou, & Xiong, 2016). A través de la división racional de la función de la cabeza del clúster y la optimización de los criterios de selección de la cabeza del clúster y el proceso de intercambio de información. Pero el uso de MIMO en WSN en cada nodo aumenta el consumo energético (procesamiento de la señal de banda base y consumo de energía correspondiente en la codificación y la modulación) en los nodos sensores.

Otros autores evaluaron un algoritmo de optimización del enjambre de partículas (PSO, Particle Swarm Optimization). El algoritmo se empleó tanto para la agrupación como para el enrutamiento en WSN (Kuila, Prasanta, & Jana, 2014). En proceso de enrutamiento parte sobre la base de un esquema de codificación de partículas eficiente y una función de aptitud multiobjetivo. La función de aptitud involucra algunos parámetros en WSN. De manera que

podiese asignar una valoración a cada objetivo en la red. Así estimar el esquema de enrutamiento que ayuda, en mayor medida, a longevidad de la red. Con el algoritmo PSO, el consumo de tiempo aumenta con respecto al número de iteraciones. Por lo tanto, la selección de rutas en este método implicaba un gran consumo de tiempo.

Otros autores presentaron una métrica, llamada, "resolución urbana" para medir la calidad de detección de los sensores en un despliegue de monitoreo con cámaras en una ciudad. Mediante el uso de teléfonos inteligentes y los vehículos equipados con sensores a bordo propicia un sistema de detección a escala de ciudad para la vigilancia urbana (Liu, Wei, Zhao, & Ma, 2015). Este enfoque proporciona la relación entre la resolución y el número de nodos de detección. Debido a muchos cálculos para encontrar la imagen de detección y la señal de espacio discreto 2D, la complejidad computacional aumenta en este método. Por lo tanto, es necesario diseñar un enfoque eficaz para mejorar la calidad de detección en WSN con la contribución de algoritmos nuevos sin sobrecarga computacional ni de comunicación en la red.

También se propuso la técnica de cobertura y conectividad basada en gráficos (GCCT, Graph-Based Coverage and Connectivity Technique) para proporcionar una mejor conectividad y cobertura en WSN a gran escala. (Deepak, Sakkari, & Basavaraju, 2015) Este método también consideró el agotamiento de la energía y el consumo de tiempo como métricas de rendimiento. En este método, están involucrados dos nodos líderes diferentes, es decir, los nodos tienen capacidades desiguales, en los que se reduce la vida útil de la red.

Azharuddin, Pratyay y Prasanta presentaron el algoritmo de agrupamiento y enrutamiento de tolerancia a fallas distribuidas (DFCR, Distributed Fault tolerance Clustering and Routing) para mejorar la eficiencia energética. Aquí, el CH se seleccionó de manera óptima en función de la energía residual y el descubrimiento del CH en caso de falla se realizó con su tiempo de ejecución (Azharuddin, Pratyay, & Prasanta, 2016). Pero este método no puede agrupar todos los nodos sensores en la red, es decir algunos nodos que están lejos de CH no pueden comunicarse con otros nodos, lo que disminuye la conectividad. Otros autores emplearon un esquema de enrutamiento basado en centroides eficientes para la gestión de energía para WSN (CESS, Coverage and Energy Strategy for wireless Sensor networks) (Le & Jang, 2015). En este método CESS, la agrupación se realizó mediante la autoorganización de los nodos locales, mientras que el centroide se seleccionó en función de la energía residual del nodo. Basándose en la posición del centroide, se realizaron la rotación de CH y la selección de CH. Dado que la ubicación de BS juega un papel vital en CESS, este método no es adecuado para redes en las que BS se encuentra fuera de la red.

Huynh, Dinh-Duc, & Tran en 2016 diseñaron un mecanismo de agrupamiento y enrutamiento multisalto con restricciones de retardo con el objetivo de minimizar el consumo de energía y el retardo de extremo a extremo en WSN.

En este enfoque, la selección de CH, el enrutamiento entre grupos y el enrutamiento entre grupos se realizaron en función de una función de costo que combina los requisitos de energía y retardo. En el enrutamiento de varios saltos, no se considera la distancia, lo que aumenta el consumo de energía en el enrutamiento. Amjad, Afzal, Umer, y Kim, en 2017 con el fin de mejorar la eficiencia energética y la eficiencia de retardo en la red, desarrollaron el protocolo de enrutamiento en clústeres heterogeneos (QHCR, QoS-aware and Heterogeneously Clustered Routing) con QoS. Aquí, la comunicación entre el CH y el nodo de larga distancia se habilitó mediante una comunicación de múltiples saltos basada en la métrica de la ruta. La energía inicial de los nodos de sensores, los recuentos de transmisión esperados y la pérdida mínima estaban involucrados en la métrica de la ruta. Dado que el enrutamiento se realiza en varios saltos, el consumo de energía de los nodos intermedios es alto.

Un grupo de investigadores presentaron el esquema Away Cluster Head con Adaptive Clustering Habit ACH 2. Este esquema de ruteo con cabeza de clúster (CH) y práctica de agrupamiento adaptativo mejora el tiempo de vida de la red y el rendimiento en la red (Ahmad, Javaid, Khan, Qasim, & Alghamdi, 2014). Aquí la operación se dividió en múltiples rondas y cada ronda estaba compuesta por cinco fases. La intervención de múltiples fases en una sola ronda aumenta el retraso de transmisión de paquetes en la red. Otro mecanismo para mejorar la cobertura y la conectividad en la red introdujo el algoritmo de auto-implementación (ESA) de bajo consumo. (Khelil & Beghdad, 2016). Aquí los nodos de sensores en la red se movieron hacia el nodo central para mejorar la conectividad. En cada tabla de nodo vecino el nodo se mantuvo en ubicaciones en que todos los nodos de la red se actualicen. Dado que los nodos de sensores se mueven hacia el nodo central en lugar del objetivo, este método no es eficaz para cubrir el objetivo y mejorar la eficiencia de sensado. Aquí la complejidad del espacio también es alta debido al mantenimiento de la tabla de nodos vecinos.

Una propuesta basada en un algoritmo de autodespliegue eficiente para la cobertura uniforme de nodos aleatorios en WSN, en la que se empleó un algoritmo genético de clasificación no dominado-II (NSGA-II, Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II) para optimizar vida útil, la cobertura y la conectividad (Jameii, Faez, & Dehghan, 2015). Se empleó el algoritmo NSGA-II para seleccionar nodos de sensores óptimos con el fin de mejorar la calidad de la cobertura. Sin embargo, la implementación aleatoria introduce desbalances de la energía en batería de nodos o agujeros de energía (termino consecuente al agujero de cobertura) en la red y este método solo es adecuado para red con nodos estáticos.

Zhang y Fok en 2017 emplearon un proceso de evolución diferencial para detectar la posición objetivo en la mejora de la calidad de la cobertura, en despliegue aleatorio, Aquí los nodos se movían hacia objetivos según la

distancia con el objetivo. Por lo tanto, un objetivo que tiene una distancia mínima con los nodos de sensores está cubierto con muchos nodos de sensores, mientras que un objetivo que se coloca lejos de la red soportará cobertura insuficiente. Por lo tanto, este método no es capaz de cubrir todos los destinos en la red. Sharmin, Nur, También Razzaque, Rahman, & Almogren en el mismo año introdujeron una compensación entre la QoSensing y la vida útil de la red para una cobertura de objetivos heterogéneos mediante el uso de nodos de sensores direccionales. Es un método de maximización de la calidad de cobertura o detección con un número mínimo de sensores (MQMS, Maximizing coverage Quality with Minimum number of Sensors) para permitir el equilibrio entre la QoSensing y la vida útil de la red. En el esquema MQMS, la misma área está cubierta con varios sensores debido a la estrategia de despliegue y los nodos de sensores son estáticos. Por lo tanto, la QoSensing se reduce en la red.

4.2 Propuesta

En la literatura científica el problema de cobertura en despliegue no deterministas se ha formulado de diversas formas. Una formulación relacionada es preguntar cómo cubrir efectivamente una región determinada. Por consiguiente, un objetivo vital es encontrar las ubicaciones óptimas para colocar los nodos sensores, de modo que la cantidad de nodos (o el costo de la red) pueda minimizarse y los requisitos de cobertura pueden ser satisfechos, así como también la eficiencia energética en la red. Este último aspecto se logra mejorando problemas de cobertura e incluso con ruteo eficiente entre sus nodos (tanto estáticos como móviles). Cuando se habla de detección, no solo se refiere a objetivos estáticos. Es posible que para algunas aplicaciones se necesite monitorear el patrón de movimiento de algunos animales salvajes o algunos intrusos en una red. Y estos ejemplos son escenarios realistas, los cuales tienen uno o más objetivos móviles por sensor.

En este trabajo se planteó un escenario WSN con un objetivo que se mueva por un escenario realista (aleatorio o probabilístico), área de al menos 1000 m x 1000 m, se necesitaría de una BS y de una cantidad considerable de nodos que pueden ser tanto estáticos como móviles. Si no se toman en cuenta el problema de cobertura e incluso el ruteo entre sus nodos sensores provocaría al final un gasto energético no deseable en la WSN.

Para resolver el problema de cobertura se propone descubrir, localizar y evitar agujeros de cobertura en la red. Se plantea un método que tiene cuatro fases:

1. Fase de agrupación en clústeres.
2. Fase de programación de suspensión.
3. Fase de mejora de la cobertura.
4. Fase de enrutamiento.

En la figura 4.1 se muestra la arquitectura de un escenario realista con nodos estáticos (SN, Static Node), nodos móviles (MN, Mobile Node), una estación base (sink) y un objetivo (target) móvil.

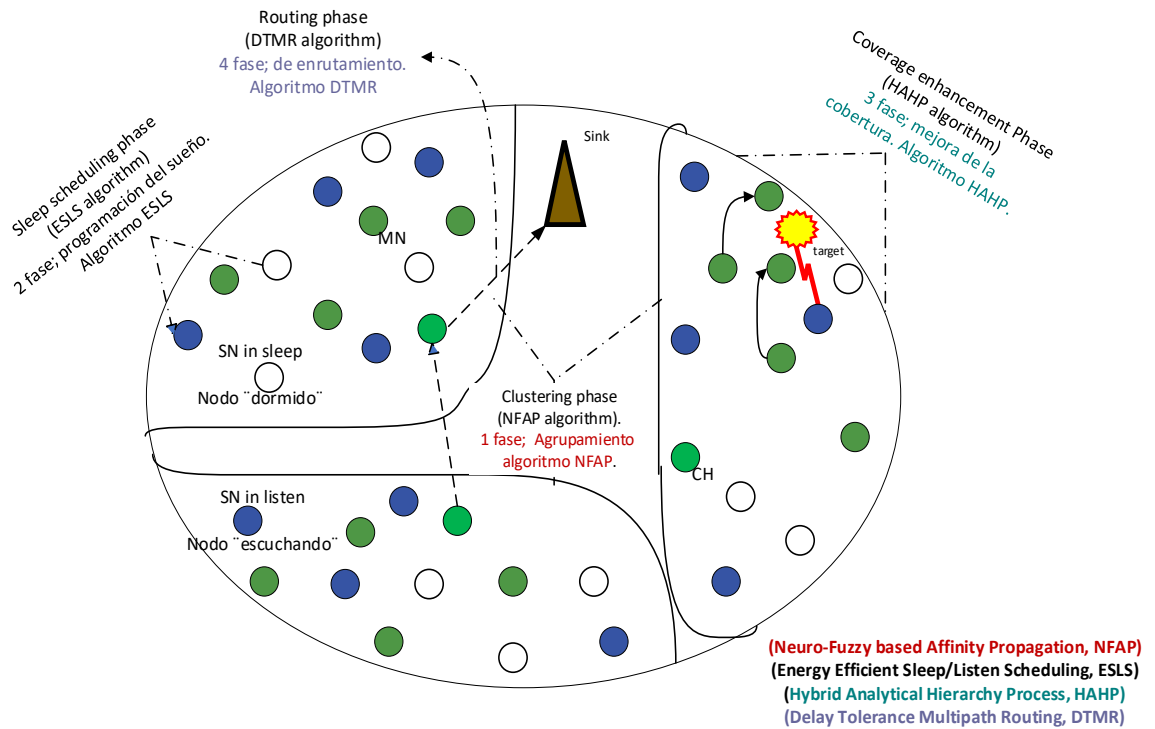


Figura 4. 1 Arquitectura WSN con nodos estáticos y móviles

En el método propuesto inicialmente todos los nodos sensores están agrupados mediante instrucciones secuenciales de propagación de afinidad basado en lógica neuro difusa (NFAP, Neuro-Fuzzy based Affinity Propagation). En cada clúster, está la asistencia de instrucciones secuenciales para la programación de suspensión energéticamente eficiente ESLS, Energy Efficient Sleep/Listen Scheduling). Se emplean también otras instrucciones secuenciales de proceso analítico de jerarquía híbrida (HAHP, Hybrid Analytical Hierarchy Process), de esta manera mejora la cobertura mientras que la conectividad entre los nodos es mejorada por el algoritmo de enrutamiento multitrayecto con tolerancia de retardo (DTMR, Delay Tolerance Multipath Routing).

La arquitectura propuesta contiene N número de SNs a $SN = \{SN_1, SN_2, \dots, SN_N\}$ y M número de MNs como $MN = \{MN_1, MN_2, \dots, MN_M\}$ y el nodo sink (S).

4.2.1 Fase de agrupación en clústeres

En una WSN con nodos estáticos y móviles es ideal emplear la técnica de agrupación de nodos dentro de la red para facilitar o mejorar la comunicación. Así en la clusterización, los nodos sensores se dividen en grupos conocidos como clústeres de división. Cada clúster tiene un CH que agrega datos de los nodos del clúster y reenvía los datos al receptor directamente o ruta de muchos

saltos utilizando los CHs de otros clústeres. Por lo tanto, los nodos pueden reducir su ruta de comunicación en comparación con la situación en la que los datos se envían directamente al nodo sink.

Dentro de la propuesta en la primera fase, el NFAP agrupa los nodos sensores en la red. En este algoritmo, todos los nodos sensores se introducen en el sistema neuro-difuso para seleccionar el nodo ejemplar y, en función del nodo ejemplar, otros nodos están agrupados por algoritmo de propagación de afinidad. La idea clave del método de propagación de afinidad se basa en el paso de mensajes entre puntos de datos, es decir, similitud entre puntos de datos. En la propagación de afinidad, se mide la similitud entre dos puntos de datos para comprobar si el punto de datos dado es capaz de ser ejemplar para otro. Si la similitud es alta, los puntos de datos se asignan al mismo clúster. En el método propuesto, la propagación de afinidad se modifica ligeramente para mejorar el rendimiento. Así también, en el algoritmo NFAP, los nodos ejemplares se seleccionan mediante un método neuro-difuso basado en métricas significativas como; energía, distancia con el nodo sink, centralidad y grado de nodo. Véase la figura 4.2

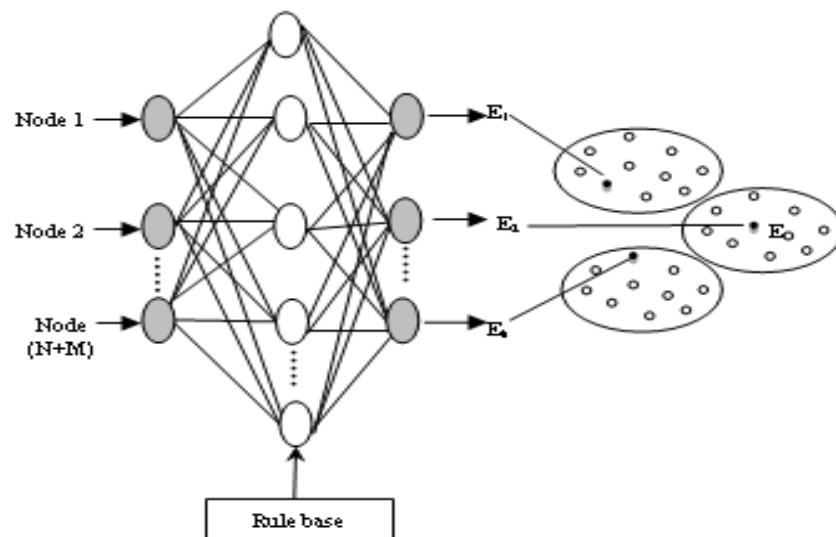


Figura 4. 2. Proceso neuro difuso en NFPA

El sistema neuro-difuso se emplea para la selección de ejemplares con el fin de admitir múltiples nodos al mismo tiempo. Un nodo que tiene alta energía, distancia mínima con el nodo sink, sobre todo con alta centralidad y alto grado (concepto se utiliza para explicar como los nodos interactúan unos con otros). se selecciona como nodo ejemplar. Si se seleccionan k números de nodos como ejemplares, entonces k número de grupos se forman en la red. Pues todos los nodos sensores, incluidos los SN y MN, se alimentan a la red neuronal con función de pertenencia. Luego, los nodos ejemplares se seleccionan en función de la base de reglas en el sistema difuso. Según k nodos ejemplares, todos los nodos de sensores se agrupan como en la figura 4.2.

En este algoritmo están involucradas dos matrices< la matriz de responsabilidad y la matriz de disponibilidad para actualizar la similitud entre el nodo i y el ejemplar E_k , se calcula en términos de distancia euclidiana de la siguiente manera;

$$Sim(E_k, i) = |E_k - Node_i|^2 \quad (4.1)$$

Luego, la matriz de responsabilidad y la matriz de disponibilidad se actualizan de acuerdo con la similitud. La actualización de responsabilidad (R) se envía como;

$$R(E_k, i) \leftarrow Sim(E_k, i) - \max_{i' \neq i} \{a(k, i') + s(k, i')\} \quad (4.2)$$

A continuación, la disponibilidad se actualiza como,

$$a(k, i) \leftarrow \min(0, R(i, i) + \sum_{k' \neq \{k, i\}} \max(0, R(k', i))) \quad (4.3)$$

Utilizando las ecuaciones anteriores, la responsabilidad y la disponibilidad se calculan entre cada nodo y nodo ejemplar. Si el ejemplar k tiene valores positivos de responsabilidad y disponibilidad para el nodo i , entonces el nodo i se asigna al k -ésimo clúster. Este proceso se realiza de forma iterativa hasta que se forman todos los grupos posibles.

En la figura 4.3 se muestra el código del algoritmo 1.

```

Input:  $N_s = \{SNs, MNs\}$ 
Output:  $k$  clusters as  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ 
Begin
Initialize  $N_s$ 
Fed  $N_s$  into NFIS
  For each  $SN, MN \in N_s$ 
    Find fuzzy output upon rule base
    If (output=High)
      Select as exemplar  $E$ 
    Else
      Goto next node
    End if
  End for
Find  $k$  exemplar as  $E_k$ 
For each  $SN, MN \in N_s$ 
  For each  $E \in E_k$ 
    Find  $Sim(E, N_s)$ 
    Update  $R, A$ 
    If  $R \& A == High$ 
      Assign  $N_s$  to  $c_k$ 
    Else
      Goto another cluster
    End if
  End for
End for
Until
  Required clusters formed
End for
End

```

Figura 4. 3 Algoritmo 1, NFAP basado en agrupamiento.

En esta etapa los nodos ejemplares se asignan como cabezas de clúster (CH) que son responsables de la recopilación y el enrutamiento de datos. Por lo tanto, todos los nodos sensores de la red, incluidos los SNs y MNs, se agrupan mediante el algoritmo NFAP de manera eficiente. La principal ventaja de la agrupación en clústeres es la eficiencia energética y el retraso minimizado. Dado que el algoritmo NFAP selecciona CH en función de la energía residual, la distancia con el nodo sumidero, la centralidad y el grado de nodo, la fase de agrupación ayuda en la mejora de QoSensing. Aquí, el CH tiene una alta energía residual que aumenta la vida útil de la red. De manera similar, la distancia con el nodo sumidero mínimo para CH, lo que da como resultado un consumo de energía y un retardo de transmisión minimizados. En cada clúster, la centralidad y el grado del nodo son altos, lo que ayuda a mejorar la cobertura y la conectividad. Por lo tanto, un proceso de agrupación eficaz basado en NFAP da como resultado métricas mejoradas de QoSensing.

4.3 Fase de programación de suspensión

En una red WSN se supone que todos los nodos sensores, incluidos SNs y MNs, tienen el mismo nivel de energía inicial. Pero la disipación de energía en todos los nodos no es igual. Pues un nodo móvil aparte del gasto de energía por el sensado también gastará energía por la misma operación de movilidad. Por consiguiente, los nodos móviles consumen más energía que los nodos estáticos. La idea principal de involucrar a los nodos móviles es para mejorar la cobertura en la red durante la detección de eventos. El método ESLS permite a los MNs hibernar durante el período de detección y permite escuchar solo después de la detección de eventos para así equilibrar la disipación de energía entre los SNs y los MNs. Se ahorra energía al programar los nodos sensores en el estado apropiado y también al reducir el rango de comunicación y los mensajes de control. Aquí, ESLS programa los SNs según el nivel de energía (EI) y la cobertura (Cov). Este algoritmo lo realiza periódicamente CH. En ESLS, los SNs con poca energía y un área de cobertura baja reciben un tiempo de reposo alto, mientras que los SN con un nivel de energía alto y cobertura alta tienen un tiempo de reposo bajo. Esto se debe a que los SNs con bajo nivel de energía se ven afectados por la ‘muerte’ temprana del nodo y los SNs con baja cobertura disipan más energía para detectar una cobertura más baja. Véase en la figura 4.4 el ciclo de trabajo del algoritmo ESLS.

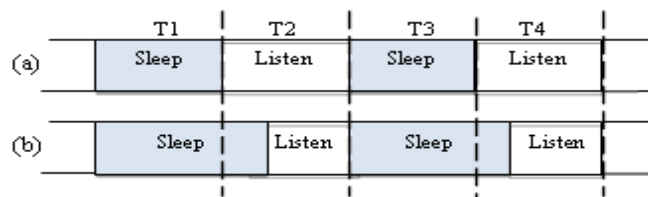


Figura 4. 4 (a) Programación de sueño para SNs de baja prioridad (b) Programación de sueño para SNs de alta prioridad

Inicialmente, los SNs se clasifican en orden ascendente según el nivel de energía y la cobertura. Entonces, el nodo en la primera posición recibe alta

prioridad para hibernar, mientras que el nodo en la última posición recibe baja prioridad para hibernar. Considérese el conjunto de nodos de SNs con alto nivel de energía y alta cobertura como; $SN_h = \{SN_{h1}, SN_{h2}, \dots, SN_h\}$ y SNs con bajo nivel de energía y baja cobertura como; $SN_l = \{SN_{l1}, SN_{l2}, \dots, SN_l\}$ donde $h+l=N$. La figura 4.4 (a) muestra el proceso de SN_l , mientras que la figura 4.4 (b) el proceso de SN_h . En la figura 4.5 se muestra las instrucciones en ESLS.

<i>Steps involved in ESLS</i>	
Step 1:	Initialize N_s
Step 2:	For all $MN \in N_s$
Step 3:	Assign (Sleep)
Step 4:	For all $SN \in N_s$
Step 5:	Find $El \& Cov$
Step 6:	If ($El \& Cov == High$)
Step 7:	Assign High priority
Step 8:	Schedule sleep time
Step 9:	Else
Step 10:	Assign low priority
Step 11:	Schedule sleep time
Step 12:	End if
Step 13:	End for
Step 14:	End

Figura 4. 5. Pasos en ESLS

Dado que los nodos móviles están asignados a suspensión y los SNs se estructuran con una estrategia de programación óptima, el algoritmo ESLS ayuda a mejorar la eficiencia energética sin pérdida de cobertura.

4.4 Fase de mejora de la cobertura

Los nodos sensores pueden tener fallas en el proceso de operación, lo que resulta en la imposibilidad de recopilar y transmitir datos. Este tipo de nodos se puede considerar como nodos muertos. Un nodo inactivo puede resultar en la pérdida de cobertura o tiene poco impacto debido a la redundancia. Por lo tanto, cuando un nodo muere, la información de WSN debe recopilarse primero para juzgar si es necesario volver a optimizar la ubicación del nodo. Si hay nodos redundantes alrededor de la posición del nodo muerto, la cobertura de la WSN completa permanece sin cambios o solo cambia poco. La ubicación del nodo no necesita optimización en este caso. En cambio, si hay pocos nodos alrededor de la posición del nodo muerto, la muerte del nodo puede provocar un agujero de cobertura. En este caso, es necesario volver a optimizar la ubicación del nodo.

Los MNs están programados para dormir todo el tiempo mediante el algoritmo ESLS y los SNs están programados dinámicamente para escuchar y dormir poco. Los SNs que están en período de escucha descubren el entorno para la detección de eventos. Si se detecta el objetivo, el nodo informa la detección del evento al CH. Dado que el propósito principal de esta fase es mejorar la cobertura para detección del objetivo, el CH calcula la intensidad de cobertura en la región objetivo, este aspecto es vital, ya que los MNs están dormidos y

algunos SNs también están dormidos. Por lo tanto, no es justo cubrir la región de destino con una pequeña cantidad de nodos activos. Así, si la intensidad de la cobertura es suficiente, entonces CH no tomará una decisión sobre el reposicionamiento del nodo móvil. De lo contrario, CH toma una decisión sobre la reubicación del nodo móvil y selecciona el nodo móvil óptimo para reposicionarlo mediante el algoritmo HAHP. El MN seleccionado está programado en modo de escucha hasta que se complete el evento. Como se indicó anteriormente, considérese N igual a número de SNs y M igual a número de MNs. Si un nodo SN_i en el clúster C_k detecta un objetivo T en el tiempo t . Inmediatamente SN_i informa a CH_k sobre la detección de eventos. Entonces CH_k calcula la intensidad de cobertura (CI) para la región T de la siguiente manera:

$$CI = 1 - (1 - q)^x \quad (4.4)$$

El CI se calcula en términos de probabilidad de cobertura (q) y número de nodos activos (x). La probabilidad de cobertura (q) se calcula en términos de rango de detección (R), tamaño de la región de despliegue (D), como:

$$q = \frac{\pi R^2}{D} \quad (4.5)$$

Si el CI es alto, no es necesario reposicionar el nodo móvil. De lo contrario, CH_k selecciona el MN óptimo en C_k para reposicionarlo. El MN óptimo se selecciona mediante el algoritmo HAHP. En el algoritmo HAHP, el MN óptimo se selecciona en función de varios criterios, como el nivel de energía (EI), la distancia de movimiento (MD) y la distancia con CH (CD). La selección óptima de nodos móviles a través de HAHP se detalla en los siguientes pasos;

Paso 1: Inicialmente, el problema se descompone en una jerarquía de objetivos, criterios y alternativas. En el método 4Tier, el objetivo es seleccionar el nodo móvil óptimo para el reposicionamiento en función de criterios como EI , MD y CD . Las alternativas son v nodos móviles presentes en C_k .

Paso 2: En el siguiente paso, las prioridades para cada criterio se derivan del modelo de optimización bayesiano. Este paso ilustra la importancia de cada criterio en la toma de decisiones. En la optimización bayesiana, el nivel de mejora juega un papel vital en la provisión de prioridad. La probabilidad de mejora (improvement) se expresa como:

$$Improvement = \phi(\gamma(x)) \quad (4.6)$$

Aquí $\gamma(x)$ se obtiene de la siguiente manera:

$$\gamma(x) = \frac{f(x_{best}) - \mu_x}{\sigma(x)} \quad (4.7)$$

Por lo tanto, la función media predictiva (μ_x) del problema $f(x)$, la función marginal predictiva ($\sigma(x)$) están involucradas en la predicción de la mejora. Según la probabilidad de mejora, a cada criterio se le asigna un valor de prioridad. Si la probabilidad de mejora de un criterio es alta, entonces ese

criterio se proporciona con un valor de peso alto o un valor de prioridad. Este valor de prioridad indica el nivel de importancia de ese criterio en la toma de decisiones.

Después de la provisión del valor de peso, la matriz de comparación por pares (PM) se genera de la siguiente manera;

$$PM = \begin{pmatrix} 1 & w_1 & w_2 \\ \frac{1}{w_1} & 1 & w_3 \\ \frac{1}{w_2} & \frac{1}{w_3} & 1 \\ Sum1 & Sum2 & Sum3 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Según los valores de la suma, la matriz por pares se normaliza. En una matriz normalizada, cada valor promedio por fila se calcula para predecir el valor de prioridad para cada criterio.

Paso 3: En este paso se calcula el índice de consistencia (CIx). A partir de la matriz por pares (PM) y la matriz normalizada, se genera la matriz ponderada. En este paso se genera una matriz aleatoria. El valor propio máximo λ_{max} se determina tanto a partir de una matriz aleatoria como de una matriz ponderada. Entonces el CIx se calcula como;

$$CIx = \frac{(\lambda_{max} - S)}{(S - 1)} \quad (4.9)$$

Donde, S es el tamaño de la matriz ponderada.

Paso 4: Finalmente, el valor de calificación para cada alternativa se determina en base a CI y las calificaciones se multiplican por el valor de ponderación del criterio para obtener calificaciones globales. De esta manera, HAHP selecciona el nodo móvil óptimo para (MN_{OP}) para su reposicionamiento. El MN_{OP} seleccionado se reposiciona en la región de destino para mejorar la cobertura.

La figura 4.6 muestra el algoritmo 2 para mejora de la cobertura.

```

Input: T, MNs, SNs, CHk
Output: Coverage enhancement
1: Begin
2:   For SN ∈ Ck
3:     Sense the target
4:     If (T detected)
5:       Report → CHk
6:     Else
7:       Follows sleep scheduling
8:     End If
9:   End for
10:  In CHk
11:  Compute CI
12:  If (CI == high)
13:    Don't move MN
14:  Else
15:    Select MN from HAHP
16:    Initialize MNs ∈ Ck
17:    For all MNs
18:      Find CIx

```

```

19:      Find rating
20:      Select MNop
21:      Move MNop→T
22:    End for
23:  End If
24:  End

```

Figura 4. 6. Algoritmo 2, HAHP de mejora de la cobertura

El algoritmo 2 muestra el proceso general involucrado en la fase de mejora de la cobertura. Dado que un MN para su reposicionamiento se selecciona en base a criterios como el consumo de energía y retrasos pequeños. Por consiguiente, el algoritmo 2 no solo mejora la cobertura, sino que también da como resultado una mejor eficiencia energética y retraso. En el siguiente proceso se mejora la transmisión de datos en la red.

4.5 Fase de enrutamiento

En esta fase se presenta un algoritmo de selección de ruta óptima con el objetivo de minimizar el retraso y mejorar la conectividad. Dado que la transmisión de datos se lleva a cabo entre el CH y el nodo sumidero, la conectividad entre los CH y el nodo sumidero es un factor importante en WSN. La selección de CH en la fase de agrupamiento también considera la distancia como una limitación importante. Por lo tanto, la conectividad entre el CH seleccionado y el sumidero ya está asegurada. Para mejorar la conectividad, el método presenta el algoritmo DTMR eficiente para el enrutamiento. En el algoritmo DTMR inicialmente se detectan todas las rutas posibles. Y la función de costo para cada ruta se calcula en función de la latencia de la ruta y el recuento de saltos. La ruta que proporciona la función de costo mínimo se selecciona para el enrutamiento. A través de este camino se lleva a cabo la transmisión de datos entre el nodo sumidero y el CH.

Considérese que CH_k quiere transmitir datos al sumidero (S). Inicialmente, todas las rutas posibles se detectan como; $P = \{P_1, P_2, \dots, P_p\}$. Entonces la función de costo para la ruta p^{th} se calcula como,

$$CF_p = \sum Delay_p, HC_p \quad (4.10)$$

Donde el retraso o $Delay_p$ se calcula como,

$$Delay_p = \sum_{q=1}^N D_q \quad (4.11)$$

Aquí D_q se refiere al retraso del SN q^{th} presente en C_k. La condición de selección de ruta se formula como,

$$Path_{optimal} = \min (CF_p) \quad (4.12)$$

En todas las rutas posibles que proporcionan un costo mínimo, la función se selecciona como ruta óptima y se selecciona para el enrutamiento. Dado que $Path_{optimal}$ se selecciona teniendo en cuenta el retardo y el recuento de saltos (HC) de la ruta, la transmisión de datos es eficiente en la red. La ruta seleccionada por DTMR solo tiene SNs activos, lo que garantiza una

conectividad confiable entre el sumidero y los CH. Por lo tanto, el método logra mejores métricas de QoSensing como cobertura, conectividad, retraso, eficiencia energética y rendimiento.

En la figura 4.7 se muestran los pasos del protocolo DTMR.

```

Step 1:      Initialize DTMR
Step 2:      Find all possible paths  $P \in P_p$ 
Step 3:      For each  $P \in P_p$ 
Step 4:          Find  $Delay_p$ 
Step 5:          Fid  $HC$ 
Step 6:          Compute  $CF_p$ 
Step 7:          If ( $CF_p == Small$ )
Step 8:              Select as optimal path
Step 9:          Else
Step 10:             Goto step3
Step 11:          End if
Step 12:      End for
Step 13:      End

```

Figura 4. 7. Pasos involucrados en el algoritmo DTMR

4.6 Evaluación Experimental

Se evalúan las métricas de QoSensing en dos topologías diferentes (estrella y malla).

4.6.1 Entorno de simulación

El método fue simulado en NS-3.26. en plataforma GNU/Linux, Se utilizó el sistema operativo Ubuntu 14.04. En el apéndice C se muestran capturas del proceso de simulación. En la tabla 4.1 se muestran los parámetros de simulación significativos considerados en esta evaluación.

Tabla 4. 1 Parámetros de simulación en NS-3

Parameter		Value
Number of nodes	Static nodes	50
	Mobile nodes	10
Number of sink node		1
Number of Target		1
Mobility model of SNs		Constant mobility model
Mobility model of MNs		Random way point model
Speed of MNs	In Star	20 mbps
	In Mesh	100 mbps
Topology		Star and Mesh
Initial energy		300 Joules
Simulation area		1000*1000 m
Packet interval		0.5 sec
Simulation time		15 seconds

Las especificaciones proporcionadas en la tabla 4.1 son aplicables tanto para topologías en estrella como en malla.

En el despliegue de los nodos en topología en estrella, los nodos se organizan alrededor de un eje central. La comunicación se lleva a cabo de manera centralizada. El entorno de simulación en topología en estrella se muestra en la figura 4.8. Mientras que la topología de malla es una topología de red distribuida, adaptativa y autoorganizada. El entorno de simulación del método en topología de malla se ilustra en la figura 4.9.

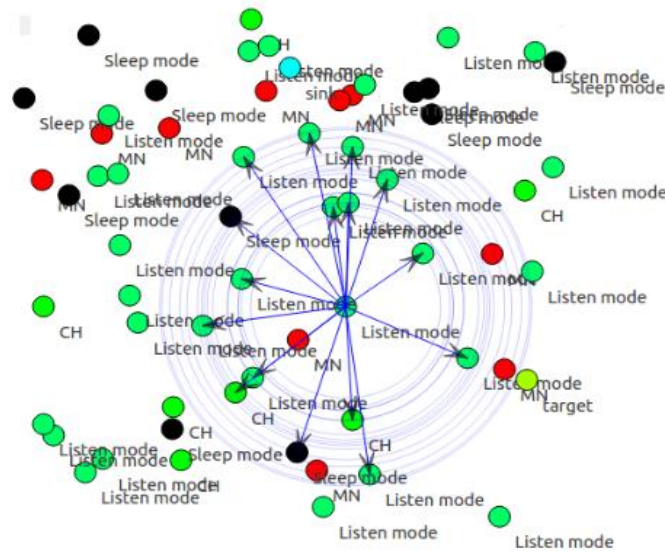


Figura 4. 8. WSN con topología estrella visto en NS.3

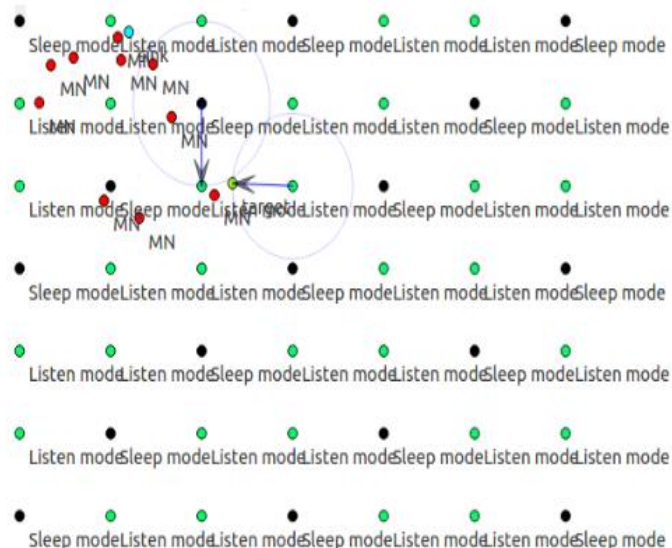


Figura 4. 9. WSN con topología malla visto en NS.3

Al considerar los parámetros significativos resaltados en la tabla 4.1, se analiza en el subcapítulo 4.7 el método tanto en topologías de estrella como malla.

4.6.2 Métricas de Cobertura

En base a criterios de otras investigaciones para topologías estrella y malla con nodos estáticos y móviles la tasa de cobertura es la métrica más importante.

4.6.2.1 Tasa de cobertura (*Coverage Rate: C Rate*)

La tasa de cobertura se define como la relación entre el área de la red cubierta por los nodos sensores y el área total de la red. Esta métrica depende directamente de la intensidad de la cobertura. Puede expresarse como,

$$\text{coverage rate} = \frac{\text{area covered by sensor nodes}}{\text{Total area}} \quad (4.13)$$

Esta métrica se considera la métrica principal de QoSensing (es decir, si la tasa de cobertura es alta en la red indica la mejora en la calidad de detección en la red). Por lo tanto, consideramos la tasa de cobertura como una métrica importante para nuestro análisis.

4.6.3 Métrica de evaluación de desempeño

Se declaran algunas métricas para el desempeño entre los nodos de la red.

4.6.3.1 Relación de conectividad (*Connectivity ratio: C ratio*)

La relación de conectividad se define como la relación entre el número de nodos conectados con el sumidero y el número total de nodos en la red. Se da como,

$$\text{Connectivity ratio} = \frac{\text{No of nodes connected to sink}}{\text{Total number of nodes}} \quad (4.14)$$

La conectividad en la red asegura que haya al menos una ruta disponible entre el nodo receptor y los nodos sensores. La alta conectividad en la red aumenta la tasa de cobertura, lo que se traduce en una mejor calidad de detección.

4.6.3.2 Retardo de extremo a extremo (*E2E Delay*)

El retraso de un extremo a otro se define como el tiempo medio que tarda un paquete de datos en llegar al destino desde las fuentes. Esta métrica incluye todos los posibles retrasos durante la transmisión, como el retraso en la cola, el retraso en el procesamiento, el retraso en la propagación y el retraso en la transmisión

$$\text{Delay} = \frac{\text{Sum of time spent to deliver data}}{\text{Amount of data received by sink node}} \quad (4.15)$$

El retardo E2E representa la conectividad en la red indirectamente es decir si la conectividad en la red es alta, entonces el retardo E2E es pequeño. Por lo tanto, el retardo E2E afecta la calidad de detección de la red.

4.6.3.3 Rendimiento (*Throughput: Thr*)

El Throughput es un parámetro importante de rendimiento de la red porque permite distinguir el comportamiento de la red a medida que incrementa la carga de datos por los nodos

El rendimiento se define como el número total de paquetes transmitidos al destino especificado en un tiempo determinado. Esta métrica es alta cuando la conectividad y la cobertura son altas en la red. Además, esta métrica evalúa el rendimiento del algoritmo de enrutamiento.

4.6.4 Métrica de consumo energético

Se emplea una sola métrica para evaluar el costo energético de la red WSN

4.6.4.1 Consumo de energía (*Energy Consumption: EC*)

El consumo de energía en la red se define como la cantidad de energía consumida para realizar procesos como la detección, transmisión y recepción. Se calcula como;

$$Energy\ consumption = \sum_{i \in N} E_{Tx}^i, E_{Rx}^i E_{sensing}^i \quad (4.14)$$

Aquí la energía consumida por un nodo sensor i durante la transmisión, recepción y detección está denotado como, $E_{Tx}^i, E_{Rx}^i E_{sensing}^i$ respectivamente. Si la calidad de detección de en la red es alta, y luego el consumo de energía en la red es bajo, se puede decir que el método aplicado de QoSensing es eficiente, ya que logra una alta calidad de detección incluso con una pequeña cantidad de nodos de sensor.

4.7 Análisis de QoSensing

Para lograr una cobertura completa o k-cobertura, la QoSensing involucra rangos de detección para monitorear un campo de interés y la comunicación involucra a todos los nodos para comunicarse entre sí. La relación entre estos depende del modelo de cobertura utilizado. Se analiza la calidad de la detección en WSN a través del método 4Tier en términos de métricas de cobertura y de comunicación en topologías estrella y malla con nodos estáticos y móviles.

4.7.1 Análisis de la tasa de cobertura (*Coverage rate*)

A continuación, se analiza y evalúa la efectividad de la fase de mejora de la cobertura en las topologías definidas. Véase la figura 4.10

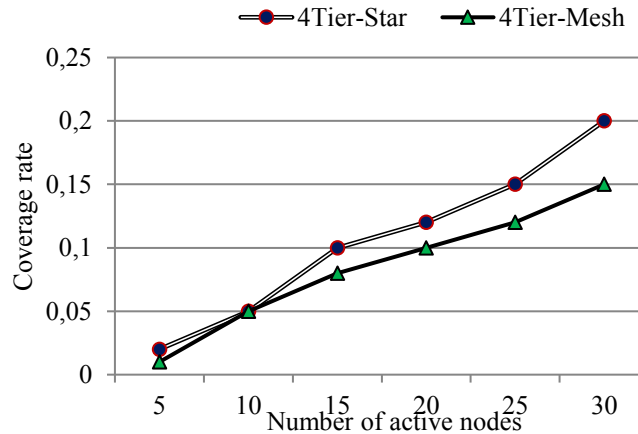


Figura 4. 10 Coverage rate o tasa de cobertura

La figura 4.10 proporciona una gráfica de la tasa de cobertura versus número de nodos en ambas topologías. Se evidencia una tasa de cobertura razonable en ambas topologías. La contribución del reposicionamiento por parte del algoritmo HAMP en el nodo móvil (energía que más rápido se agota) ayuda a lograr la tasa de cobertura más alta. El método propuesto proporciona una tasa de cobertura de aproximadamente 0,157 en promedio en topología en estrella y 0,138 en topología de malla. Hay que señalar que el método 4Tier proporciona casi 0.15 como tasa de cobertura en ambas topologías, incluso con una pequeña cantidad de nodos sensores presentes en la red. El resultado se obtiene para una red con 30 nodos sensores. Pero la tasa de cobertura es directamente proporcional al número de nodos de sensores.

4.7.2 Análisis de la relación de conectividad (*Connectivity ratio*)

Esta métrica evalúa el rendimiento del algoritmo de agrupación en clúster y el algoritmo de enrutamiento en ambas topologías. Además, esta métrica es directamente proporcional al número de nodos de sensores en la red. En la figura 4.11 se analiza la relación de conectividad en topologías de estrella y malla.

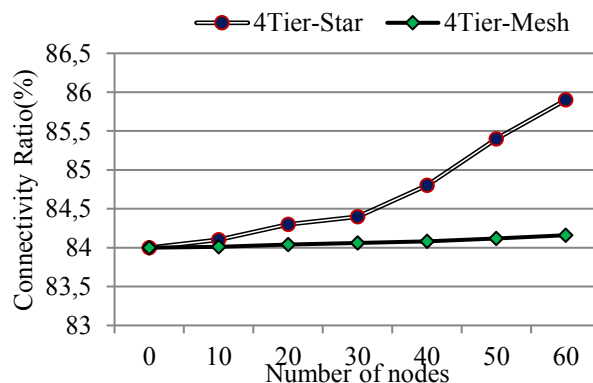


Figura 4. 11. Connectivity ratio o relación de conectividad

A partir del gráfico, la conectividad en la topología en estrella es mejor que la topología en malla. Esto se debe a que, en la topología inicial, cada nodo está

conectado con el nodo BS (un nodo CH o sumidero). En el método propuesto, la red se agrupa mediante el uso del algoritmo NFAP en el que cada CH se selecciona de manera óptima. En la comunicación de varios saltos, los datos detectados se transmiten a la BS a través de otros nodos de sensores intermedios. Consecuentemente, cada nodo del grupo está conectado con CH para transmitir información de detección. De modo que la conectividad entre cada nodo y CH está asegurada.

De manera similar, el algoritmo de enrutamiento DTMR, es responsable de mantener la conectividad entre el CH y el nodo receptor. Entonces, la conectividad en la topología en estrella es ligeramente mejor que la topología en malla. Pero en la topología de malla, el algoritmo DTMR conserva la conectividad con el receptor, pero es ligeramente menor que la topología en estrella. El índice de conectividad promedio en la topología en estrella es del 84,7%, mientras que la conectividad promedio en la topología de malla es del 84,06%.

4.7.3 Análisis de retardo extremo a extremo (E2E Delay)

Se analiza el retardo de un extremo a extremo en dos topologías tanto estrella como malla. Esta métrica evalúa el retardo de un extremo a otro y según gráfica de la figura 4.12, es baja en las topologías mencionadas (en estrella el retardo es mucho menor que en malla) en una red WSN con alta conectividad. La conectividad es alta en la topología en estrella por dar un único salto. Sin embargo, proporciona un retardo E2E pequeño con la ayuda del algoritmo de enrutamiento de tolerancia de retardo.

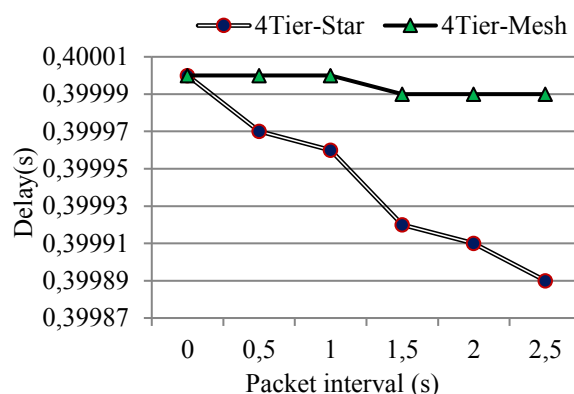


Figura 4. 12. *E2E Delay* o retardo extremo a extremo

Aquí se prefiere la ruta de transmisión como ruta óptima, si proporciona un retardo mínimo. A través de este camino óptimo, se lleva a cabo la transmisión de datos. Por lo tanto, el retraso introducido durante la transmisión de datos es pequeño en la red. La diferencia entre estas topologías se produce debido a la relación de conectividad. Dado que la relación de conectividad en la topología en estrella es alta, el retraso se minimiza ligeramente en comparación con la topología de malla. El método propuesto introduce un retraso promedio de

0.3994 segundos en la topología en estrella, mientras que esta medición es de aproximadamente 0.39995 segundos en la topología de malla.

4.7.4 Análisis del rendimiento o Throughput

Esta métrica evalúa el algoritmo de enrutamiento involucrado en la red en términos de números de bits transmitidos por segundo en la red. El análisis del rendimiento en las dos topologías se muestra en la figura 4.13.

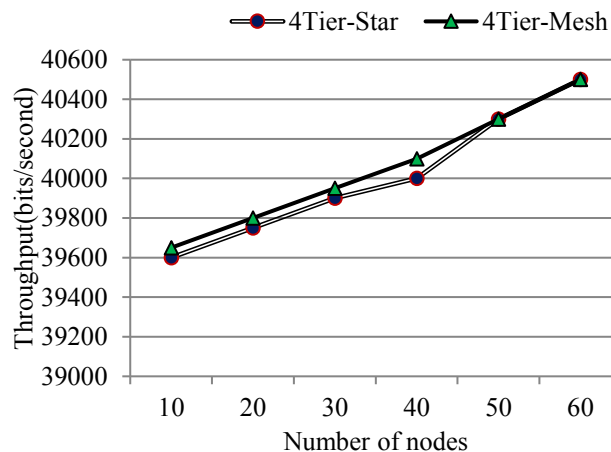


Figura 4. 13. Throughput o rendimiento en dos topologías de WSN

Aquí, la eficiencia del rendimiento es marginalmente alta en la topología de malla. Este resultado muestra la eficiencia del algoritmo DTMR ya que selecciona la ruta óptima para la transmisión, logrando así una alta eficiencia de rendimiento. Incluso en presencia de 10 nodos en la red, el algoritmo DTMR ayuda a transmitir 39600 bits por segundo en la red. El método propuesto de este modo proporciona resultados razonables en la eficiencia del rendimiento en ambas topologías. El rendimiento medio en la topología en estrella es de 40008,3 bits por segundo, mientras que en la topología de malla es de 40050 bits por segundo.

4.7.5 Análisis del consumo de energía (Energy consumption)

Se analiza el consumo de energía con respecto a la calidad de detección. Bajo el número promedio de paquetes totales recibidos con éxito por intervalo de tiempo observado. En esta etapa el algoritmo de agrupación en clúster y el algoritmo eficiente de enrutamiento minimizan el consumo de energía. En la figura 4.14, se muestra resultados cuando cada nodo transmitía 5 paquetes de 10 bytes hacia el sumidero, en tiempo fijo de 0.5 segundos. Cada experimentación es repetida 30 veces para obtener los valores promedios que existen alrededor de esta métrica.

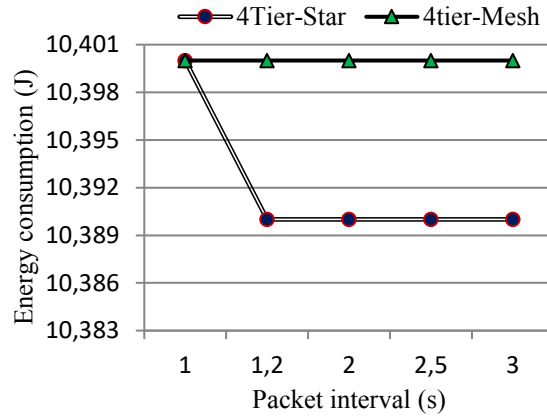


Figura 4. 14. *Energy consumption* o energía consumida

La topología en estrella logra un consumo de energía significativo que la topología en malla. Dado que la ruta de transmisión se selecciona de la función de costo, la transmisión es rápida y requiere un mínimo de energía. Al inicio de las simulaciones, en topología en estrella, el consumo de energía es de 10,39 julios, mientras que en la topología de malla el consumo medio de energía es de 10,4 julios. En ambas topologías, el consumo de energía se mantuvo constante. Luego en topología estrella el consumo de energía significativamente se minimiza más. Se puntualiza que las principales fuentes de consumo de energía son la detección, transmisión y recepción y se agrega el consumo por mecanismo de movilidad del nodo móvil participante en ambas topologías.

4.8 Evaluación sobre otros métodos

En la tabla 4. 2, se muestra el análisis comparativo de la mejora de QoSensing con otros trabajos anteriores. Así se comparan los datos obtenidos con ensayos que incluyeron parámetros similares como: red con nodos móviles, área de cobertura, número de nodos, topología y energía inicial en nodos, etc.

Tabla 4. 2 Comparativa de 4Tier con otros métodos

Work/metric	Dual adaptive approach	Multi-hop routing based on particle swarm optimization (PSO).	ACH2: Maximize Lifetime and Throughput	NSGA-II	4TQS	
					Star	Mesh
C.Rate	-	0.07	0.05	0.06	0.157	0.138
C.ratio	90.2	75.7	-	-	84.7	84.06
EC	16.45	18.33	14.38	13.76	10.39	10.4
Delay	-	0.7	-	0.7	0.3994	0.3999
Thr	32100	-	25040	-	40008	40050

Nota: Se comparan resultados de investigaciones anteriores, como Enfoque adaptativo dual de *Gui et al*, Enrutamiento multisalto con optimización de enjambre de partículas de Kuila y Jana, Método ACH2 de *Ahmad et al*, y el método NSGA-II, Optimización multiobjetivo para topología y control de QoSensing en WSN.

En la tabla 4.2, cada métrica de QoSensing se mejora en el método 4Tier en ambas topologías. Aquí, la relación de conectividad del método 4Tier es más baja que el método NSGA-II. Vale la pena señalar que en el método NSGA-II,

la relación de conectividad se obtiene con un mínimo de 800 nodos, lo que es relativamente más alto que el trabajo propuesto por este autor.

4.9 Discusión

La red tiene un objetivo móvil, un nodo sink o BS, e inicialmente un escenario con 30 nodos estáticos y 10 nodos móviles. Se justifica una métrica, como es tasa de cobertura (presencia de agujeros de cobertura) por ser una red con despliegue aleatorio. Esta métrica de cobertura está relacionada con 3 métricas de desempeño de red. Así al mejorar la tasa de cobertura (calidad de detección), la tasa de conectividad y la programación de hibernación de nodos móviles más un proceso como el reposicionamiento dinámico de los nodos después del despliegue o durante el funcionamiento normal de la red puede ser un medio viable para aumentar el rendimiento.

Se comparó el método propuesto con resultados experimentales que utilizaron parámetros similares; Topología en estrella y malla, red con proporción de nodos estáticos y móviles hasta 300 nodos. Energía inicial en nodos hasta 500 julios, intervalos de detección hasta 10 segundos, área de cobertura máximo a 1000 x 1000 metros.

El método tiene necesidades para detectar y evitar los agujeros de cobertura en red de alta densidad y en áreas mayores a 1000 x 1000, pues tener centenas o miles de nodos generan datos redundantes que darán lugar a una transmisión de datos redundante y provocarán colisiones y un agotamiento de energía no deseado que afectará la vida útil de la red.

Los mecanismos de mejora en QoSensing y comunicación proveen a los nodos la capacidad de auto-restauración, es decir, si se avería un nodo, la red encontrará nuevas vías para encaminar los paquetes de datos. De esta forma, la red sobrevivirá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan. Las capacidades de autodiagnóstico, auto-configuración, auto-organización, auto-restauración y reparación, son propiedades que se han desarrollado para este tipo de redes.

Se encomienda como trabajo a futuro mejorar QoSensing en redes de alta densidad. Asimismo, encontrar soluciones en topología tipo árbol o jerárquica.

Este capítulo contribuyó en la publicación del artículo científico denominado: 4TQS; Four Tiers Over Quality of Sensing with Energy Improvement in Wireless Sensor Network, divulgado en la revista International Journal of Communications, Network and System Sciences.

CAPÍTULO 5: DISEÑO Y EVALUACIÓN DE ALGORITMOS EN QoS SENSING PARA TOPOLOGÍA BASADA EN CLÚSTERES

5.1 Motivación y objetivos

El método de 4 fases visto en el capítulo anterior resuelve el problema de detectar y evitar agujeros en WSN tanto en topologías estrella y malla. Sin embargo, en las topologías de clúster el método no obtiene mejoras en cobertura y conectividad. Pues el algoritmo de enrutamiento puede enviar el mismo paquete a través de múltiples rutas. Involucrar más enlaces y nodos de sensores en la ruta puede disminuir la fiabilidad, y aumentar significativamente el consumo de energía de la WSN. Así como en topologías estrella y malla en redes basadas en clústeres desiguales pueden ocurrir eventos dañinos, agotamiento de la batería de los sensores, fallas de hardware etc. Estos aspectos son la motivación para proponer mecanismos basados en multiagentes en este tipo de redes jerarquizadas.

El método propuesto mejora la QoSensing en WSN con una técnica de aprendizaje de refuerzo habilitado por un sistema multi-agentes para detección y recuperación precisas de agujeros de cobertura que sean capaces de tener un comportamiento autónomo. Un sistema multi-agente consiste en un conjunto de agentes que interactúan entre ellos. Para conseguir interactuar con éxito deben cooperar, coordinarse y negociar. Al mejorar la tasa de cobertura mediante la compensación de agujeros de cobertura y la mejora de la comunicación eficiente se logra la eficiencia energética en este tipo de red jerárquica.

Esta propuesta es factible para los siguientes casos de aplicación:

- Seguimiento de objetivos en fronteras
- Monitoreo de la contaminación del agua
- Monitoreo de vida silvestre
- Aplicaciones marinas

5.1.1 Contribuciones de la propuesta

A continuación, se detallan las contribuciones de este trabajo.

- Topología de red robusta mediante la implementación de topología de árbol de clúster desiguales con el procedimiento de triángulos de Sierpinski, para mejorar la cobertura de detección en la red.
- Técnica de selección óptima de la cabeza del clúster se realiza mediante la optimización Black Widow multiobjetivo (MoBW), para aumentar la eficiencia de la transmisión de datos.
- Programación dinámica de hibernación en nodos para reducir aún más el consumo de energía, mediante el algoritmo de probabilidad bayesiana habilitada por entropía de Tallies (TE2BP).

- Un nuevo algoritmo MiA-CODER que combina múltiples agentes inteligentes y el algoritmo de aprendizaje SARSA (aprendizaje sobre políticas. y calcula el valor esperado de una política teniendo en cuenta la posibilidad de un comportamiento exploratorio) para aprender del entorno y reparar los agujeros de cobertura y así alcanzar una mejor QoSensing.

5.2 Trabajos relacionados en WSN con topología de clústeres

Se exponen investigaciones científicas en la detección de agujeros de cobertura y su relación con la eficiencia energética en la transmisión eficaz de los datos en WSN con despliegue aleatorio.

Khalifa, Khedr, & Aghbari, (2020) evaluaron la detección de agujeros de cobertura a través de técnica de nodos con auto curación (self-healing), en este trabajo presentaron el algoritmo H3; Heuristic Hole Healing que ejecuta el proceso de curación de agujeros y/o recuperación de agujeros de cobertura (curación de dichos agujeros), maximizando el rango de detección de esos nodos. El algoritmo H3 primero realiza la detección de agujeros en función del radio de los nodos que participan en la red. Luego, selecciona el nodo óptimo para reparar el agujero. El nodo óptimo se selecciona según el grado de superposición y el nivel de energía residual. El algoritmo H3 utiliza un sistema de inferencia difusa (FIS) para seleccionar un nodo óptimo. La distancia y el radio de detección se determinan para curar el agujero de cobertura. Sin embargo, la maximización del rango de detección es un enfoque tradicional para solucionar el problema de cobertura. Sin embargo, este método aumenta el consumo de energía y la complejidad del nodo óptimo que se selecciona para reparar el agujero. La red general se considera móvil, pero la detección óptima de nodos no considera ninguna métrica de movilidad. Por lo tanto, habrá frecuentes agujeros de cobertura siempre que el nodo de curación se mueva a otra posición.

Khelil, Beghdad, & Khelloufi, (2020) se centraron en la detección y mejora de agujeros de cobertura en WSN. presentaron el algoritmo híbrido de curación de agujeros (3HA, Hybrid Hole Healing Algorithm). Este trabajo determina la posición óptima para mejorar la tasa de cobertura. Luego, se despliegan nuevos nodos adicionales en la posición determinada para mejorar la tasa de cobertura. El algoritmo 3HA se realiza de forma distribuida. Al principio, el agujero de cobertura se detecta construyendo el diagrama de Voronoi para la red. Luego, la lista de Voronoi se reduce para formular programación lineal y modelo de detección probabilística. Sin embargo, agregar nodos adicionales aumenta el costo de implementación y los agujeros no se recuperan por completo y la construcción del diagrama de Voronoi es un proceso complejo y consume mucho tiempo.

Feng, Zhang, Zhang, & Muhdhar (2019) analizaron la WSN con despliegue heterogéneo y diseñaron un algoritmo de detección y reparación de agujeros

de cobertura (CHDR, Cover Hole Detection and Repair). Aquí analizan la topología de la red basándose en una subred simple. Sobre la subred, se determinan los nodos de límite y se calcula el área del polígono. Se consideraron tres categorías de subredes como: (i) con subred simple, (ii) sin nodos aislados y (iii) con múltiples subredes para un mejor análisis. Como mecanismo de recuperación, se activan los nodos inactivos. Para eso, la red se inicializa con nodos activos e inactivos. Cuando ocurre el agujero de cobertura, entonces el nodo inactivo se activa para reparar el agujero. Sin embargo, el proceso de recuperación de agujeros de cobertura no es eficiente ya que simplemente activa los nodos aleatorios sin considerar el entorno de la red y existe una alta posibilidad de formar nuevos agujeros debido al alto consumo de energía.

Bhardwaj & Kumar (2019) propusieron un enfoque de enrutamiento en clústeres, para lograr una mejor eficiencia energética basado en algoritmo de agrupación de león fraccionales multiobjetivo (MOFPL, Multi-Objective Fractional Particle Lion). El algoritmo MOFPL combina la optimización del enjambre de partículas (PSO) y el algoritmo de agrupación de clústeres de león fraccional. Inicialmente, la red está agrupada y la cabeza del grupo (CH) se asigna en cada grupo. Luego, se selecciona el CH óptimo para permitir el enrutamiento basado en múltiples objetivos como energía, distancia, retraso, densidad y tasa de tráfico. A través del CH óptimo, los datos se transmiten a la BS. Sin embargo, la optimización de PSO y la teoría fraccional se combinan para mejorar la tasa de convergencia. Pero resulta en un gran consumo de tiempo. Inicialmente, los CH se seleccionan al azar, lo que aumenta el consumo de energía.

Mahesh & Vijayachitra (2019) propusieron el algoritmo híbrido basado ecolocalización de delfín y búsqueda de cuervos (DECSA, Dolphin Echolocation-based Crow Search Algorithm) para enrutamiento basado en clústeres con eficiencia de energía en WSN. Para permitir una selección óptima de CH, se presenta un algoritmo de optimización híbrido. El algoritmo híbrido está construido con el algoritmo de búsqueda de cuervos y el algoritmo de ecolocalización de delfines. El objetivo está formulado para mejorar la transmisión de datos y también para mejorar la eficiencia energética. El algoritmo híbrido planteado considera múltiples funciones objetivas, como la vida útil del enlace, la distancia entre grupos, la movilidad, el retardo, la energía y la distancia entre grupos. Pero la consideración de la distancia entre grupos en la selección de CH es ineficaz, ya que solo se puede calcular después de que se seleccionan todos los CHs y la formación de grupos de igual tamaño conduce a un problema de *hotspot* o agujero de energía.

Yuxin Liu et al (2019), propusieron el método de ciclo de trabajo para mejorar el retraso y la eficiencia energética en WSN. Para lograr este objetivo, presentaron un esquema de ciclo de trabajo dinámico (DDC, Dynamic Duty Cycle) en WSN. Aquí, la interrelación entre el ciclo de trabajo y el retraso se

analiza en profundidad para enmarcar el ciclo de trabajo adaptativo óptimo. Asigna un período de actividad de ciclo de trabajo grande, es decir a los nodos que están posicionados lejos del nodo sumidero. Estos nodos se conocen como los nodos en áreas que no son agujeros de energía. El *slot* (intervalo, fracción) de suspensión se asigna a los nodos en el área de dicho agujero en función del nivel de energía residual. Sin embargo, el problema del *hotspot* no se ha mitigado por completo.

Movva & Rao (2019) proponen la eficiencia energética mediante múltiples procedimientos. Principalmente, con un protocolo de programación del sueño por particiones de anillos basado en control de acceso al medio (RP MAC, Ring Partitioned-MAC). Inicialmente, la red se divide en varios grupos mediante un diagrama de Voronoi ponderado. Luego, se habilita un esquema de agregación de datos doble para minimizar aún más el consumo de energía. El enrutamiento intra-clúster se habilita mediante un algoritmo para la optimización de enjambres de pollos (CSO, Chicken Swarm Optimization), mientras que el algoritmo de enrutamiento entre clústeres se presenta con la construcción de un árbol de enrutamiento basado en la posición. No obstante, el proceso de agrupación basado en el diagrama de Voronoi ponderado aumenta la complejidad y el protocolo RP-MAC asigna *slots* (intervalos) de suspensión para los nodos de forma aleatoria, lo que degrada el rendimiento de la red.

Zeng, Zhang, Gu, Yu, & Fu (2018) evaluaron la mejora de QoSensing en la red WSN para aplicaciones de monitoreo de agua. La QoSensing se mejora al optimizar el índice de cobertura de la red. El objetivo de este trabajo fue detectar la contaminación del agua mediante nodos sensores. Para eso, se determina la posición óptima de los nodos sensores con restricciones en función del costo de red (restricciones de hardware, energía, transmisión de datos). El costo se minimiza colocando los nodos del sensor en una posición óptima. Para encontrar la posición óptima, este trabajo utiliza un algoritmo genético (GA) que selecciona la posición óptima para los nodos. Luego, los nodos se despliegan en las posiciones óptimas para detectar la contaminación del agua. En general, los agujeros de cobertura se forman con el aumento de la transmisión de datos. Este trabajo solo considera los agujeros de cobertura solo en la fase inicial, es decir, la QoSensing es mejor y se degrada durante el período de tiempo. Por lo tanto, este trabajo no puede mantener una mejor QoSensing en la red. Aunque los nodos se colocan en una posición óptima, cuando el nivel de energía de los nodos disminuye, el nodo debe ser reemplazado. Esto conduce a agujeros de cobertura que degradan la QoSensing.

Lata, Mehruz, Urooj, Ali, & Nasse (2020) estudiaron el desempeño de una WSN evaluando la conectividad entre los nodos de la red y la fiabilidad en el contexto de una aplicación. Implementaron una topología de red en el que los nodos de la red se construyen como un árbol de expansión disjunto que redujo en gran

medida el problema de fallas de enlace en la red. La transmisión de datos fue facilitada por los nodos que están dispuestos en una topología de árbol de expansión específica (IST, Initial Spanning Tree). Sin embargo, no se aborda el consumo de energía en la red, lo que generará el problema de los agujeros de cobertura en la red, lo que afectará a la QoS de la red. Los investigadores Zhang & Liu (2020) proponen el protocolo dinámico de optimización regional (MRDA, Mixed Regional Dynamic Algorithm) para la ubicación de los nodos en la red de manera óptima. La optimización de la ubicación de los nodos se realizó de manera regional en función de la cobertura, el consumo de energía. Por lo tanto, se reducen los nodos necesarios para mover, lo que reduce aún más la sobrecarga en la red. Los resultados mostraron que tenía un mejor desempeño al considerar tanto la cobertura como el consumo de energía en la red. Sin embargo, no se consideró la detección y reducción de agujeros de cobertura en la red, lo que también afecta la transmisión efectiva de datos en la red.

Shakeri, *et al* (2020) se centraron también en el despliegue de WSN utilizando técnicas de optimización. Inicialmente, implementaron la optimización basada en el sistema de información geoespacial con el fin de implementar los sensores de IoT de manera óptima. Se experimentaron dos algoritmos; la optimización del enjambre de partículas (PSO) y el algoritmo de abejas (BA, Bees Algorithm), y los resultados mostraron que el primero tenía una mejor convergencia y el último tenía un mejor cálculo del valor de aptitud (por ejemplo, valoración alta de energía residual). Sin embargo, a pesar del despliegue de nodos sensores, surgen problemas de agujeros de cobertura y no se abordó un método adecuado para mejorar la cobertura en la red.

Alablani & Alenazi (2020) implementaron una estrategia de despliegue de sensores para facilitar la transmisión efectiva de datos basada en triangulación de Delaunay evaluada para ciudades inteligentes (EDTD-SC, Evaluated Delaunay Triangulation-based Deployment for Smart Cities). El despliegue de sensores se realizó de manera metódica con el fin de brindar una mejor cobertura y un bajo presupuesto económico. Inicialmente, se construyó el diagrama de Voronoi y se construyó el triángulo de *Delaunay* entre los sensores de IoT desplegados al azar. El punto central de los triángulos se calculó para desplegar los sensores restantes en puntos de alta cobertura. La agrupación de nodos se ejecutó en base a la agrupación de *k-means* y los nodos receptores se desplegaron en el centro de la agrupación para una mejor cobertura.

5.3 El problema principal en WSN con topología de clústeres

Las obras existentes no proporcionan una solución global para lograr una mejor eficiencia energética, se ha declarado que integrar la QoSensing más la mejora en la comunicación (enrutamiento como aspecto principal) no solo mejora la

mejora la cobertura sino también el consumo de energía en la WSN con topología tipo jerárquica.

En general, la QoSensing se mide en términos de índice de cobertura. Para mejorar el índice de cobertura, los trabajos existentes se han centrado en dos métodos: (i) despliegue óptimo del sensor (etapa inicial) y (ii) mejora de la cobertura (detección y recuperación de agujeros (después del despliegue). El primer método requiere un alto costo para encontrar la posición óptima para todos los nodos y no es adecuado para redes a gran escala. Por lo tanto, el procedimiento de mejora de la cobertura ha sido estudiado por muchos trabajos. Sin embargo, estos métodos no detectan el agujero con precisión y no recuperan el agujero utilizando un número mínimo de nodos debido a un diseño de algoritmo deficiente, una consideración limitada de métricas, entre otros. Además, la formación de *hotspots* debido al consumo de energía de los nodos son los factores principales para los agujeros de cobertura. Así mejorar la QoSensing previniendo los agujeros de cobertura también ayuda a optimizar el aspecto de la eficiencia energética.

Wang, Ju, Kim, Sherratt, & Lee (2019) propusieron mejorar la tasa de cobertura en la WSN mediante un esquema de parcheo de agujeros de cobertura (CHPS, Coverage Hole Patching Scheme) basado en algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO, Particle Swarm Optimization). En la WSN se considera cuadrículas de igual tamaño, entonces, las cuadrículas con la tasa de cobertura mínima se las denominan; las cuadrículas candidatas. Luego, las cuadrículas que tienen un índice de cobertura menor que el valor umbral se consideran para el proceso de mejora de la cobertura. En esas redes, los nodos móviles están posicionados de manera óptima para garantizar una cobertura adecuada. Para encontrar la posición óptima para los nodos móviles, dicho trabajo utiliza el algoritmo PSO considera la distancia de movimiento como la métrica para minimizar el consumo de energía. Los principales problemas encontrados en este enfoque son:

- El algoritmo PSO encuentra la posición óptima para los nodos móviles, pero no puede encontrar qué nodos mover. La consideración de nodos móviles aleatorios en el algoritmo PSO aumenta aún más el consumo de energía (es decir) si el nodo móvil seleccionado está lejos del agujero, entonces el nodo debe viajar una gran distancia.
- La construcción de la red equitativa conduce a agujeros de cobertura debido al alto consumo de energía en determinados nodos.
- El algoritmo PSO tiene problemas de convergencia que conducen a un movimiento móvil no óptimo.

Zhang, Chu & Feng (2020) proponen un algoritmo de detección de agujeros de cobertura eficiente basado en el complejo Rips simplificado para resolver el problema de detección de agujeros de cobertura. Los autores utilizan diferentes

técnicas y teoremas. Primero combinan el teorema de Turan con el coeficiente de agrupamiento en una red compleja para clasificar los nodos. Este proceso elimina los nodos redundantes poniéndolos en modo de suspensión. Al eliminar los nodos redundantes, la red se simplifica. A continuación, se utiliza el concepto de gráfico completo (reglas de determinación) eliminan los bordes redundantes. Por último, el complejo Rips (Rips complex) se aplica en la red simplificada para detectar la detección de agujeros. Los problemas que enfrenta este trabajo son los siguientes:

- Para simplificar la red, este trabajo puso a los nodos con un coeficiente de agrupamiento grande en modo de suspensión. Aunque simplifica la red, afecta la conectividad entre otros nodos. También da como resultado grandes agujeros de cobertura. Además, apagar el nodo con un coeficiente de agrupamiento más alto también conduce a un mayor número de agujeros en la red.
- En general, el concepto complejo de Rips, no es adecuado para las redes de sensores con recursos limitados.
- Este trabajo solo identifica el agujero y no puede curar o recuperar el agujero que juega un papel vital en la mejora de la cobertura. Además, la eficacia de la detección de agujeros de cobertura se puede medir solo después del proceso de recuperación. Por tanto, este trabajo es ineficaz para mejorar la cobertura de la red.

Shagari, Idris, Salleh, & Ahmedy (2020) propusieron el algoritmo de agrupación en clúster con distribución eficiente de energía (SEED, Sleep-awake Energy Efficient Distributed) con el objetivo, de lograr eficiencia energética en la red a través de la formación de grupos óptimos y la programación del sueño. En primer lugar, la red se segrega en múltiples grupos por BS. Para la selección óptima de la cabecera del grupo (CH), se formula un valor de probabilidad que se compone de métricas de energía y tasa de tráfico. En cada grupo, los nodos que se encuentran cerca están emparejados. Los nodos que no tienen nodos vecinos están aislados y los nodos se comunican directamente con el CH. La técnica de programación de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, Time Division Multiple Access) se revisa para admitir la recopilación de datos. La programación del sueño se realiza entre los nodos emparejados. Los problemas encontrados en este trabajo de investigación son:

- La programación del sueño se origina solo entre los nodos emparejados (es decir, los nodos aislados no tienen la oportunidad de dormir). Esta programación aumenta el consumo de energía de los nodos aislados, lo que además provoca la muerte prematura de los nodos.
- Entre los nodos emparejados, la decisión de suspensión se toma de manera distribuida, lo que aumenta la sobrecarga del paquete de control y el consumo de energía en la red.

- El CH se selecciona con las métricas limitadas (nivel de energía y tasa de tráfico) y se utilizan los mismos CHs para enrutar los paquetes. Esta forma de enrutamiento aumenta la pérdida de paquetes.

Vinodhini & Gomathy (2020) formularon un algoritmo de enrutamiento para mejorar la eficiencia energética de la red de sensores. En este trabajo se presenta un protocolo de enrutamiento dinámico de múltiples saltos (MOMHR, Multi-Objective Multi-Hop Routing). Inicialmente, la red se divide en múltiples grupos mediante el uso del algoritmo *k-means* (algoritmo de clasificación no supervisada en clusterización que agrupa objetos en *k* grupos basándose en sus características). En cada grupo, el CH óptimo se selecciona mediante el uso del algoritmo de colonia de abejas artificiales (ABC, Artificial Bee Colony). El algoritmo ABC considera múltiples objetivos como el nivel de energía, la tasa de tráfico, etc. para una selección óptima de CH. Luego, el enrutamiento entre clústeres se habilita mediante un enfoque de enrutamiento de varios saltos. El enfoque de enrutamiento construye el objetivo de minimizar el recuento de saltos y selecciona una ruta con un recuento mínimo de saltos. Los problemas que enfrenta este trabajo de investigación son los siguientes:

- En el algoritmo de *k-means*, la inicialización de *k* es relativamente difícil y también la inicialización de los nodos centroides también afecta el proceso general de agrupamiento.
- El algoritmo ABC tiene una tasa de convergencia lenta y una alta complejidad computacional. Selecciona CH no óptimos incluso con un gran consumo de tiempo.

Véase un resumen de trabajo relacionados en la tabla 5.1.

Tabla 5. 1. Síntesis de investigación en trabajos anteriores

Método/técnica	Concepto	Desventaja
CHPS (Wang, Ju, Kim, Sherratt, & Lee 2019)	Esquema de parcheo de agujeros de cobertura Posicionamiento de nodos móviles mediante PSO.	- Alto consumo de energía. - Problemas de convergencia.
SRC (Zhang, Chu, & Feng, 2020)	Elimina los nodos redundantes y usa <i>rips</i> complex para detectar agujeros de cobertura.	- Afecta la conectividad. -Altamente complejo para dispositivos con limitaciones de recursos.
SEED (Shagari, Idris, Salleh, & Ahmedy 2020)	Enrutamiento heterogéneo basado en clústeres <i>Sleep-Awake</i> con reconocimiento de tráfico y energía. Implementa TDMA para programar los nodos en modo inactivo y activo.	- Control de sobrecarga de paquetes. - Mayor pérdida de paquetes.
MOMHR (Vinodhini & Gomathy 2020)	Formación de clústeres y enrutamiento para minimizar el número de saltos.	- Alta complejidad. - Gran consumo de tiempo.

La tabla 5.1 muestra las brechas de investigación encontradas en trabajos previos, en donde se presenta soluciones simples a la mejora de la cobertura y por consiguiente a la eficiencia energética de la red

5.4 Trabajo propuesto

Ante los problemas de investigación anteriores para lograr una mejor QoSensing en topología de clústeres, se presenta un nuevo algoritmo por refuerzo de aprendizaje basado en un sistema multi-agente para un mecanismo preciso de detección y recuperación de agujeros de cobertura. El método propuesto se denomina MIA-CODER (en inglés Multi-Intelligent Agent-based Reinforcement Learning for accurate COverage Hole DEtection and Recovery).

La propuesta logra una mejor QoSensing en topología árbol de clúster desigual a través de la partición de los triángulos de Sierpinski. La red propuesta está construida con nodos de sensores estáticos, nodos de sensores móviles y una BS ubicada en el centro de la red.

En la figura 5.1 se muestra la arquitectura general de la propuesta.

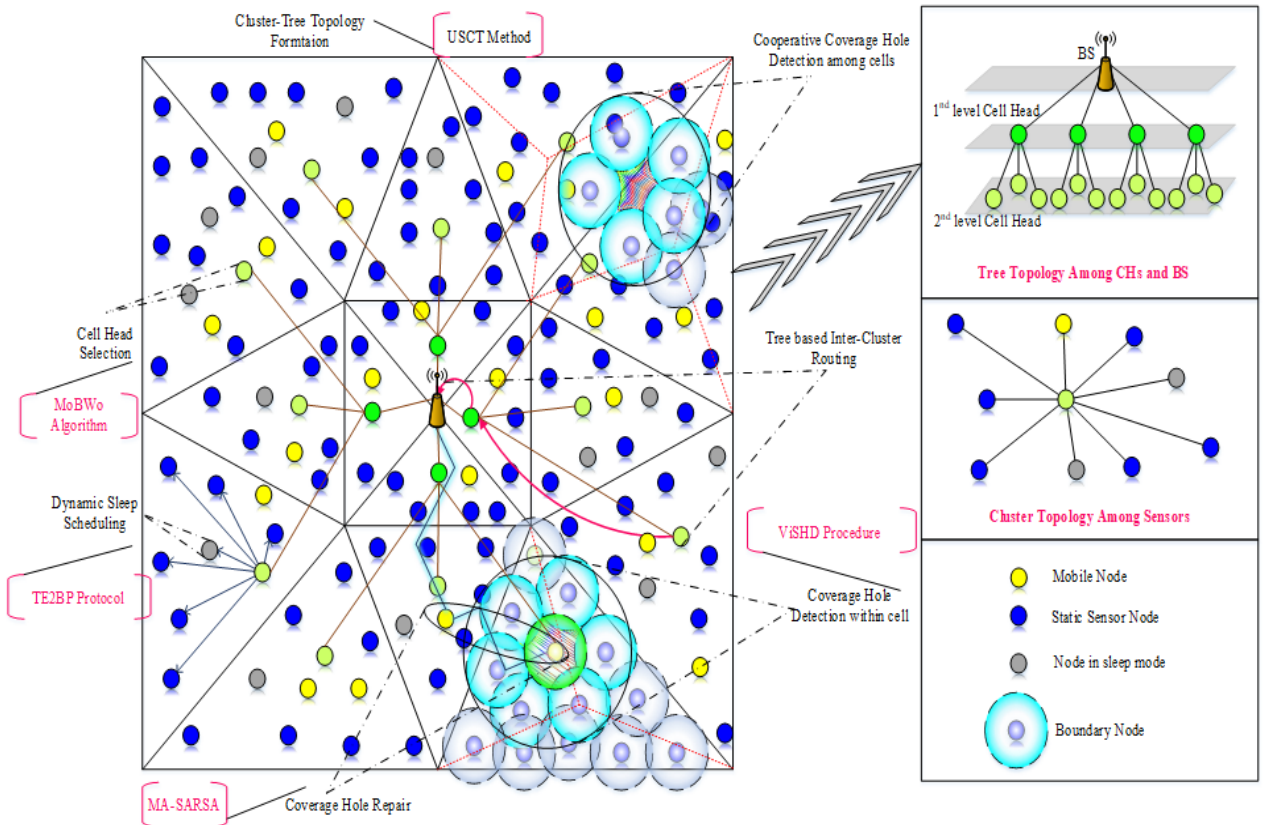


Figura 5. 1. Arquitectura general de la propuesta para WSN

5.5 Construcción de topología de árbol de clústeres desiguales

En esta fase, el objetivo es construir una nueva topología que resguarde la cobertura de detección con una transmisión de datos eficaz mediante un nuevo método de construcción de topología de árbol de clústeres de Sierpinski desigual (USCT, Uneven Sierpinski Cluster Tree), como se muestra en la figura 5.1. El método propuesto construye células desiguales siguiendo el procedimiento del triángulo de Sierpinski. Inicialmente, la red se construye como un grafo $N = \langle V, E \rangle$ en el que V denota los sensores desplegados y E

$=\{(p, q) \in V / \text{dist}(p, q) \leq TR\}$ representa la conectividad de los nodos. En el que p, q son dos nodos sensores cualesquiera en la red, TR denota rango de transmisión. $c = \{p \in V\}$ es un cluster que comprende un número p de nodos cuyo centro de cluster se denota como ct .

No obstante, se utiliza la topología del árbol del clúster en la que todos los nodos están vinculados entre sí, lo que reduce el problema de pérdida de datos en la red. La red se divide en cuatro triángulos y se elimina el triángulo central; los triángulos restantes se forman repitiendo el proceso anterior y al hacerlo, se forman los grupos desiguales en los que el tamaño de los triángulos más cercanos a la BS es mayor que el tamaño de los triángulos que están situados lejos de la BS.

En la figura 5.2 se describen los pasos involucrados en la formación de clústeres en la red.

```

Pseudo code: Cluster Formation
i ← number of iterations;
Rectangular zone diagonals are
drawn;
Partition formation P =
{P1, P2, P3, P4};
For each partition do
    The clusters are formed i.e. P(Cn);
    Where n = 1, 2, 3... , m;
While i ≥ 1 do
    For each cluster do
        The nearest cluster to BS is
        considered;
        Midpoints of the sides are
        connected;
        i = i-1;
    End
End
End

```

Figura 5. 2 Pseudocódigo de formación de clústeres

A continuación, en la figura 5.3 se muestra la topología árbol del clúster de Sierpinski desigual. En colores rojo, verde negro se muestran líneas de la partición de los triángulos según la topología mencionada.

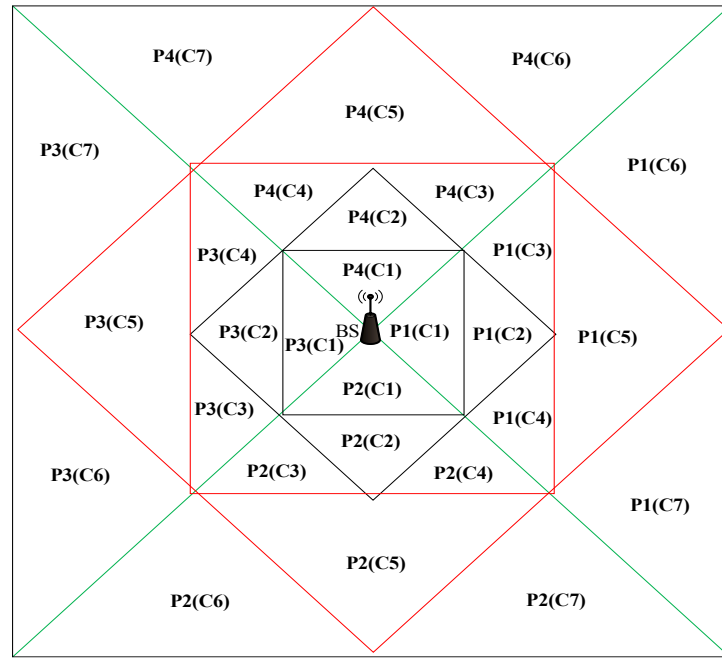


Figura 5. 3 Topología árbol de clústeres de Sierpinski desigual

Una vez que se forman los grupos, la selección de CH se lleva a cabo mediante la implementación de la optimización *Black Widow* (araña viuda negra) multiobjetivo (MoBWo). Se justifica este algoritmo por cuanto facilita la convergencia temprana y obtiene los valores de aptitud optimizados en comparación con otros algoritmos como PSO, GA y otros algoritmos tradicionales. Para elegir el CH adecuado para la recopilación y agregación de datos, se optimizan biológicamente en MoBWO, varios conjuntos de parámetros, los cuales se muestran a continuación:

- Cantidad de arañas = 40
- Número total de generaciones = 100
- Tasa de reproducción = 0,6
- Tasa de canibalismo = 0.44
- Tasa de mutación = 0.4

Este algoritmo, establece la clasificación de mutaciones en función del recuento de supervivientes. Utilizan el valor de aptitud para evaluar crías de araña, ya sean fuertes o débiles.

El MoBWo se procesa mediante la inicialización aleatoria de la población de arañas viudas negras. En la elección CH se heredan dos tipos de comportamiento de las arañas, que son: Viuda Negra Macho y Viuda Negra Hembra. La inicialización de las arañas viuda negra se da a continuación:

$$X_{N,i} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,i} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,i} \\ x_{N,1} & x_{N,1} & x_{N,i} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Donde $X_{N,i}$ son los valores iniciales de población. En este trabajo doctoral, $X_{N,i}$ se representa como el número total de nodos en la red para la elección de CH.

El CH se selecciona en base a múltiples objetivos, tales como: el objetivo de energía, el objetivo de distancia y el objetivo de capacidad, los cuales se detallan a continuación.

- *Objetivo energético:* la energía residual debe ser mayor para elegir ese nodo para CH. Por tanto, la energía mínima causa problemas de retransmisión de paquetes o pérdidas de paquetes.
- *Objetivo de distancia:* la distancia debe ser menor desde BS para elegirlo como CH. Pues, una distancia más larga causa un gran retraso de extremo a extremo.
- *Objetivo de capacidad:* un nodo debe constituirse de menor cantidad de fallas de paquetes porque así puede transportar una gran cantidad de paquetes de los miembros del clúster (CM, Cluster Members).

En base a los objetivos mencionados, dentro del número de triángulos y conjuntos de nodos, se selecciona el mejor nodo o CH. Cada métrica de objetivo se puede calcular de la siguiente manera.

La energía restante del nodo sensor se expresa como sigue:

$$RE = \sum \{T_x(en) + R_x(en) + idle(en) + sleep(en)\} - IE \quad (5.2)$$

$$T_x(en) = T_x(en_{elec}) T_x(en_{amp})$$

$$= \begin{cases} ken_{elec} + k\varepsilon_{sp}dist^2, (CM \text{ to } CH) \\ ken_{elec} + k\varepsilon_{ap}dist^4, (CH \text{ to } BS) \end{cases} \quad (5.3)$$

En el cual, $T_x(en)$ denota la energía requerida para la transmisión, ε_{sp} y ε_{ap} denota el consumo de energía del amplificador en el espacio libre y los modelos de canales de desvanecimiento de trayectos múltiples, y en_{elec} denota la energía de procesamiento de la señal, IE representa la energía inicial, y k representa la longitud de los bits del mensaje.

$$R_x(en) = R_x(en_{elec}) \quad (5.4)$$

Para calcular el consumo de energía del CH (ecuación 5.5) debe calcularse, tanto el consumo de energía durante el enrutamiento entre grupos como dentro de ellos (DF, Decode-and-Forward), que se expresan como las siguientes ecuaciones. En la ecuación (5.6). y denota la relación de compresión y $CS(en)$ denota el costo de detección. El consumo de energía total de la red de sensores inalámbricos se encuentra a partir de la energía restante, que se puede calcular a partir de las ecuaciones 5.8 al 5.10

$$\begin{aligned} CH - intra(en) &= CH - R_x - intra(en) + CH - DF - intra(en) \\ &= ken_{elec} + (n + 1)kdf(en) \\ &= k(nen_{elec} + (n + 1)df(en) \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$CH - inter(en) = CH - T_x - intra(en) + CH - CS - inter(en)$$

$$\begin{aligned}
&= (n+1)\gamma(ken_{elec} + k\varepsilon_{ap}dist^4) + (n+1)kCS(en) \\
&= (n+1)k(\gamma(en_{elec} + \varepsilon_{ap}dist^4) + CS(en))
\end{aligned} \tag{5.6}$$

$$CH(en) = CH - intra(en) + CH - inter(en)$$

$$= k((nen_{elec} + (n+1)df(en) + (n+1)(\gamma(en_{elec} + \varepsilon_{ap}dist^4) + CS(en)) \tag{5.7}$$

$$CM - CH(en) = \sum_{j=1}^n CM - CH(en) = \sum_{j=1}^n k(en_{elec} + \varepsilon_{sp}dist^2) \tag{5.8}$$

$$total(en) = \sum_{j=1}^n CH(en) + CM - CH(en) \tag{5.9}$$

$$\begin{aligned}
&= k \sum_{j=1}^n ((nen_{elec} + (n+1)df(en) + (n+1)(\gamma(en_{elec} + \varepsilon_{ap}dist^4) + CS(en)) + \\
&\sum_{j=1}^n k(en_{elec} + \varepsilon_{sp}dist^2))
\end{aligned} \tag{5.10}$$

$R_x(en)$ indica la energía necesaria para la recepción; $idle(en)$ indica la energía necesaria en el estado inactivo y $sleep(en)$ indica, la energía necesaria en el estado de reposo. La energía restante para todos los nodos se calcula para elegir la CH óptima. La distancia entre dos nodos a y b en el clúster se formula como sigue:

$$Dist(a, b) = \sqrt{(a_y + b_y)^2 + (a_z + b_z)^2} \tag{5.11}$$

Donde y y z denotan las coordenadas de ubicación de los sensores respectivamente. La capacidad del nodo se refiere en términos de tamaño de búfer, el cual se puede representar como:

$$C = \frac{Initial_{BS}}{initial_{BS} - current_{BS}} \tag{5.12}$$

MoBWo calcula el valor de aptitud para cada nodo en función del objetivo y selecciona la CH óptima. En el modo de procreación, se seleccionan dos nodos como padres y dos nodos se seleccionan como hijos en los que los nodos hijos se expresan como:

$$\begin{cases} q_1 = \gamma \times p_1 + (1 - \gamma) \times p_2 \\ q_2 = \gamma \times p_2 + (1 - \gamma) \times p_1 \end{cases} \tag{5.13}$$

Una vez que el modo de procreación selecciona los nodos, se lleva a cabo el modo de canibalismo en el que solo se seleccionan los nodos más aptos. En base a la población del modo de procreación, se realiza la mutación y finalmente se selecciona el CH óptimo. Los nodos de cada célula forman un grupo con el CH, mientras que los CH forman un árbol con el BS. La transmisión de datos se lleva a cabo a través de los CH seleccionados de manera óptima por el algoritmo MoBWo. Esta fase minimiza el consumo de energía y aumenta la eficiencia de transmisión de datos.

En la figura 5.4 se describe la selección del nodo óptimo como cabeza del grupo.

Pseudo code: *CH selection*

Input: No.of. iterations, PP, CR, PM

Output: Optimal cluster head

Population initialization of nodes;

Calculate reproduction number "*rn*";

From *P1* select best *rn* results

For k=1 to *rn* do

 From *P1* arbitrarily select two nodes as parents;

 Using eqn (5.4) generate children;

 Father is destroyed;

 Destroy some children based on CR;

 Save no. of. Nodes into *P2*;

End for

Calculate the no. of mutation nodes *mn* based on PM;

For k=1 to *mn* do

 Select a node from *P1*;

 Generate new node by random mutation

 Save the new nodes into *P3*;

End for

Update *P* = *P2* + *P3*;

Get the best node from *P*;

Figura 5. 4 Pseudocódigo para la selección de la cabeza del grupo

5.6 Programación dinámica del sueño

Para reducir el consumo de energía, se habilita la programación dinámica del sueño en esta fase. Por tanto, se propone un nuevo algoritmo de *Tsallis Entropy Enabled Bayesian Probability* (TE2BP), es decir, la Probabilidad Bayesiana Habilitada por Entropía de Tsallis para programar los nodos del sensor en modo inactivo y activo. El algoritmo opera según las métricas Nivel de energía residual, Factor de amortiguación y Tasa esperada de cobertura. Los intervalos o *slots* de programación del sueño se asignan a los nodos de sensor mediante los encabezados de celda correspondientes.

La participación de la programación del sueño es mejorar la eficiencia energética en la red. La probabilidad de que el nodo esté en modo activo sin considerar los parámetros se define como $P(A)$ y la probabilidad de que el nodo esté en modo inactivo sin considerar los parámetros se expresa como $P(S)$. Sea R la suma de las pruebas de los valores de energía residual, factor de amortiguación y tasa de cobertura esperada. La probabilidad de que un nodo esté en modo activo con respecto a la evidencia del parámetro se representa como:

$$P(A|R) = \frac{P(R|A)P(A)}{P(R|A)P(A) + P(R|S)P(S)} \quad (5.14)$$

De manera similar, la probabilidad de que el nodo esté en modo inactivo con respecto a la evidencia del parámetro se expresa como:

$$P(S|R) = \frac{P(R|S)P(S)}{P(R|S)P(S)+P(R|A)P(A)} \quad (5.15)$$

No obstante, el valor de umbral para cada métrica lo establece la entropía de Tsallis y los nodos que tienen los valores por encima del valor de umbral se establecen en modo activo, mientras que otros nodos se establecen en modo de suspensión, que cambiará periódicamente. La condición de entropía se expresa como:

$$Ty(x_i) = \frac{h}{y-1}(1 - \sum_i x_i^y) \quad (5.16)$$

En donde y es el índice de entropía y T_y es el valor umbral. A través de este método, los nodos se programan en modo inactivo y activo para mejorar la eficiencia energética de la red, evitando así los agujeros de cobertura. Véase la tabla 5.2.

Tabla 5. 2 Consumo de energía en la programación del sueño

Mode	Consumption of energy
Active ($T_x(en)$)	48nJ/bit
Active ($R_x(en)$)	48nJ/bit
Transmit amplifying	120pJ/bit/ m^2
Active (<i>idle</i> (en))	35nJ/bit
Sleep	0J

La tabla 5.2 muestra el consumo de energía de cada nodo en cada modo, el cual muestra que el consumo de energía de cada nodo en el modo de suspensión es cero. Por tanto, la vida útil de los nodos de la red aumenta aún más.

5.7 Detección y reparación de agujeros de cobertura

Los procesos antes mencionados mejoran la eficiencia energética, lo cual evita el agujero de cobertura, mientras esta fase detecta y repara el agujero de cobertura que se produce. Los agujeros de cobertura se producen principalmente por el despliegue de sensores de forma aleatoria. La reparación de los agujeros de cobertura mejora drásticamente el *QoSensing*. Aquí, los CHs son responsables de la detección de agujeros y la BS, de la reparación de agujeros. El CH detecta el agujero mediante el protocolo de Detección de Agujero basado en Sector Virtual (ViSHD, *Virtual Sector based Hole Detection*). Este protocolo segmenta cada ángulo del triángulo en 60 grados.

El agujero de cobertura se forma entre los sensores desplegados en una estructura similar a un anillo. De la misma manera, el agujero de cobertura se forma porque no hay sensor para cubrir el área o hay más de un sensor que cubre un área respectiva y desatiende otra área. Luego, la detección del

agujero se realiza localizando los nodos de límite. Un nodo de límite es el primer (o último) nodo que un paquete puede encontrar al ingresar (o salir) de un dominio o sector distribuido. Se deja que los nodos de límite sean $\{bn_0, bn_1 \dots bn_m\}$, la distancia máxima entre dos nodos cualesquiera se calcula para ubicar el centro del agujero. La distancia máxima se expresa como:

$$dist(bn_a, bn_b) = Max \{dist(b_x, b_y) | b_x b_y \in \{bn_0, bn_1, \dots, bn_m\}\} \quad (5.17)$$

El punto central de la distancia se define como el centro del agujero, el cual se puede expresar como:

$$\begin{cases} x_v = (x_{bn_a} + x_{bn_b})/2 \\ y_v = (y_{bn_a} + y_{bn_b})/2 \end{cases} \quad (5.18)$$

No obstante, el procedimiento de cálculo del área del agujero se aplica en dos casos, tales como:

- **Caso 1** (dentro de una celda): En este caso, los agujeros se detectan dentro de una celda, en donde el CH es responsable. Pues, el CH inicia los nodos de límite para encontrar el área del agujero.
- **Caso 2** (entre celdas): En este caso, los agujeros se forman entre dos celdas. En decir, dos CH son responsables de calcular el área del agujero. Aquí, ambos CH trabajan de manera cooperativa para determinar el área del área del agujero.

Una vez que se detecta el agujero de cobertura, la BS toma las medidas adecuadas para reparar los agujeros de cobertura. El proceso de reparación consiste en aislar el nodo redundante y reemplazar el nodo redundante con otro nodo sensor óptimo. Asimismo, MA-SARSA (parte de MiA-CODER) aprende o conoce el entorno y selecciona el móvil óptimo para reparar el agujero. Aquí se enmarca varios parámetros como la distancia, la vida útil del nodo y el nivel de cobertura. La distancia del nodo se obtiene del cálculo de la distancia entre dos nodos que se formula en la ecuación 5.2.

La selección del nodo únicamente en función de la distancia puede no ser apropiada, ya que los nodos móviles pueden viajar en dirección opuesta a la ubicación del agujero, por lo que la dirección del nodo móvil también debe considerarse para la selección precisa del nodo. La dirección del nodo móvil se calcula a partir de la fórmula que se proporciona a continuación.

$$v_{direction} = \frac{\begin{bmatrix} x_{center} - x_{mob.node} \\ y_{center} - y_{mob.node} \end{bmatrix}}{\| \begin{bmatrix} x_{center} - x_{mob.node} \\ y_{center} - y_{mob.node} \end{bmatrix} \|} \quad (5.19)$$

En el cual (x_{centro}, y_{centro}) se denota como el centro del segmento de línea entre dos nodos y la vida útil del nodo se calcula en función del nivel futuro de energía del nodo que se denota como $E_{bn}(t + 1)$ y se calcula del historial energético anterior $E_{bn}(t)$, el cual se puede formular como:

$$E_{bn}(t + 1) = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m E_{bn}(t) \quad (5.20)$$

En el que m denota el número de muestras históricas tomadas para el cálculo del nivel de energía futuro. Por lo tanto, la vida útil del nodo se calcula como:

$$\text{Vida útil del nodo } (bn_m) = \frac{E_0}{e_m} \quad (5.21)$$

La cobertura del nodo se define como el área, en la cual el sensor puede detectar los paquetes de datos. La misma, se puede calcular como:

$$\text{Cobertura } (C) = \sum_{i=1}^n \text{Área}(bn_m) \quad (5.22)$$

En la figura 5.5 se muestra el pseudocódigo para la selección óptima del nodo móvil.

Pseudo code: optimal node selection

Input: coverage hole location, mobile nodes around coverage hole

Output: optimal node for replacement

For nodes near coverage hole do

Calculate the distance using eqn (11);

Select the more nearest nodes having less distance;

Calculate the direction for those nodes and save in list L1;

End for

For nodes moving towards hole in L1do;

Calculate the lifetime of the node using $E_{bn}(t + 1)$;

Select the node with longer lifetime;

Calculate the coverage of those nodes and save in list L2;

End for

Return optimal node

Figura 5. 5 Pseudocódigo para la selección óptima del nodo móvil

En la selección óptima del nodo móvil se emplea el cálculo de los factores necesarios que afectan la selección del nodo móvil.

La figura 5.6 muestra el proceso de detección y reparación de agujeros de cobertura.

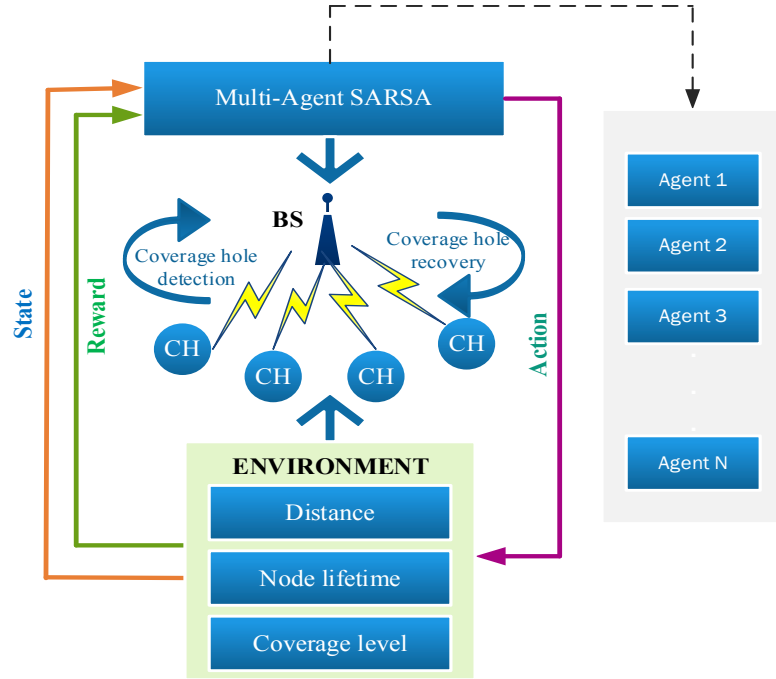


Figura 5. 6 Detección y reparación de agujeros de cobertura

Sea ζ el estado en la marca de tiempo t y α representa el conjunto de acciones que toma cada agente SARSA en el estado respectivo. Durante la reparación del agujero de cobertura, se cambia la ubicación y la detección del nodo móvil óptimo, lo que se considera como el cambio en acción. Entonces la posible acción se representa como:

$$\alpha_i = (l_i, r_i) \quad (5.23)$$

En el que $l_i = (l_{x_i}, l_{y_i})$ es la posición actual del nodo móvil y su posición futura se representa como $l'_i = (l'_{x_i}, l'_{y_i})$. r_i y r'_i denotan el rango de detección actual y futuro de los nodos móviles respectivamente. $\mathcal{R}$ es el conjunto de recompensas que comprende las recompensas y obtenidas por la acción realizada por el agente. Por lo tanto, el objetivo del agente es obtener alta recompensa que se puede expresar como:

$$\mathcal{R}_t = \sum_{j=0}^{\infty} \delta^j \gamma_{t+1+j} \quad (5.24)$$

La función Q se representa como:

$$Q^\pi(\zeta, \alpha) = E\{\mathcal{R}_t | \zeta_t = \zeta, \alpha_t = \alpha, \pi\} \quad (5.25)$$

Y la función Q óptima, se puede formular como:

$$Q^*(\zeta, \alpha) = \max_{\pi} v^\pi(\zeta, \alpha) \quad (5.26)$$

A partir de la función Q^* óptima, la política óptima se puede determinar mediante:

$$\pi^* = \arg \max Q^*(\zeta, \alpha) \quad (5.27)$$

La regla para actualizar la función Q para el siguiente estado ζ' basados en la recompensa obtenida por la acción realizada en el estado anterior ζ se expresa como:

$$Q(\zeta, \alpha) \leftarrow (1 - \theta_{\zeta\alpha})Q(\zeta, \alpha) + \theta_{\zeta\alpha}(\gamma + \max_{\alpha'} Q(\zeta', \alpha')) \quad (5.28)$$

El nodo móvil seleccionado se coloca en la posición óptima para reparar el agujero. Así, se repara el agujero de cobertura con el mínimo de nodos móviles sin aumento de complejidad.

En la figura 5.7 se presenta el pseudocódigo para el MA-SARSA, en el que se inicia arbitrariamente la función Q para iniciar el estado y la acción. Por tanto, en cada paso de prueba se obtiene la recompensa; dicho proceso se repite hasta que se repara el agujero de cobertura.

Pseudo code: Coverage hole repair

Initialization of $Q(\zeta, \alpha)$ in a randomly;

For each trial repeat:

Initialization of ζ, α ;

For each trial step repeat:

Perform α , obtain γ, ζ' ;

Choose α' from ζ' using policy;

$Q(\zeta, \alpha) \leftarrow (1 - \theta_{\zeta\alpha})Q(\zeta, \alpha) + \theta_{\zeta\alpha}(\gamma + \max_{\alpha'} Q(\zeta', \alpha'))$;

$\zeta \leftarrow \zeta'; \alpha \leftarrow \alpha'$;

Until ζ *terminates*

Until coverage hole is recovered

Figura 5. 7 Pseudocódigo: Reparación de agujeros de cobertura

En la figura 5.8 se muestra el diagrama de flujo general del algoritmo propuesto

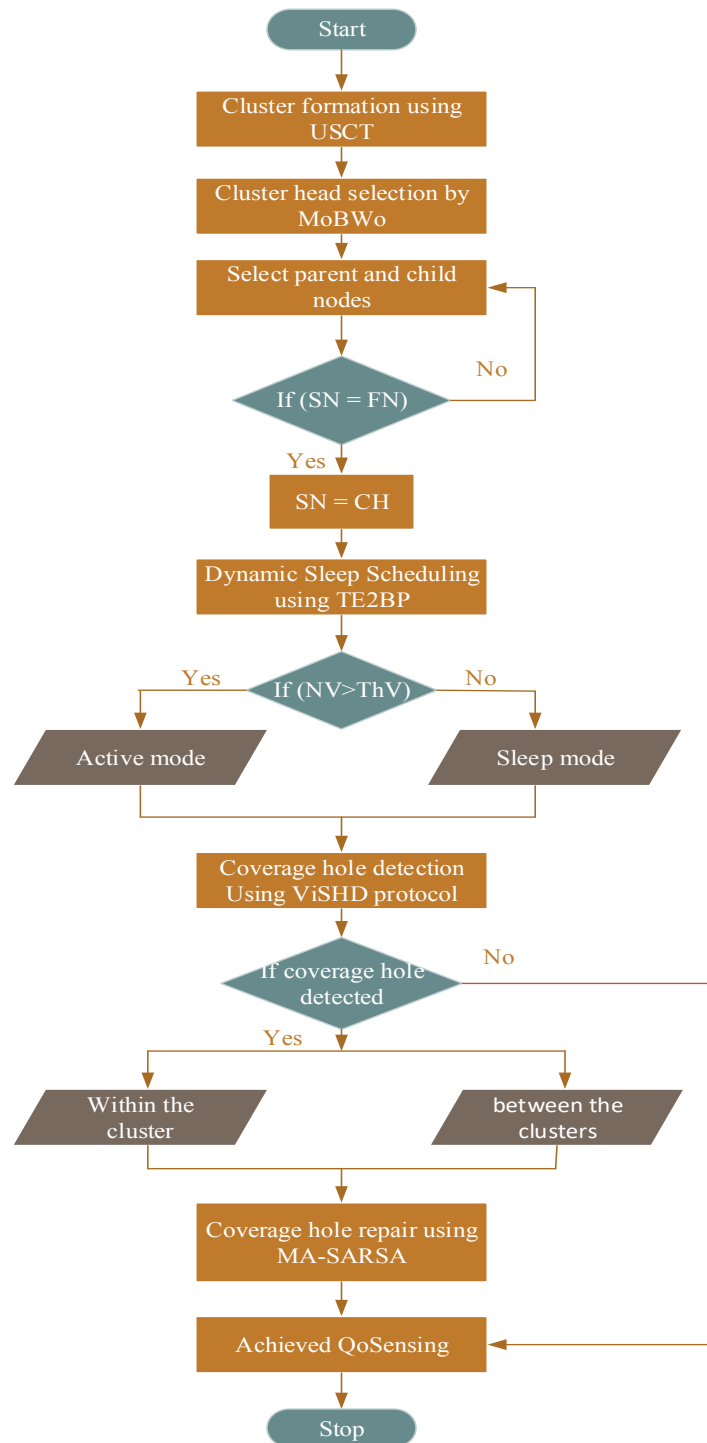


Figura 5. 8 Diagrama de flujo de MiA-CODER

5.8 Evaluaciones

La validación del modelo se ejecuta en la herramienta de simulación de Network Simulator versión 3.26.

5.8.1 Configuración de simulación

Los requisitos de hardware y software para fines de simulación se pueden apreciar en la tabla 5.3.

Tabla 5. 3. Configuración del sistema

Especificaciones de hardware	Procesador	NS3.26
	RAM	8GB
	Disco duro	60GB
Especificaciones de software	Network Simulator versión 3.26	Simulador de red
	OS	Ubuntu 14.04 LTS

Los nodos de sensores estáticos, los nodos de sensores móviles y la BS se despliegan con el propósito de experimentar el modelo propuesto. La simulación de la detección y recuperación del agujero de cobertura propuesta se realiza en un entorno 1000 x 1000 m. Los parámetros necesarios para la simulación se pueden ver en la tabla 5.4. El rango de detección de los nodos se establece en 35 m y los *bytes* de datos adquiridos se toman como 1 KB. La longitud de los bits se considera 450 bits. La R_{max} se denomina rango de detección máximo y la P_{max} se denomina potencia en el rango de detección máximo, respectivamente. El tamaño del agujero de cobertura se toma como 80 m². La energía inicial de los nodos sensores es 1Joule.

Tabla 5. 4 Parámetros de simulación

Parámetros	Descripción
Área de simulación	1000m *1000m
Números de nodos estáticos	25
Número de nodos móviles	50
Número de estación base	1
Rango de detección	35 m
Bytes de datos adquiridos	1KB
Número de bits transmitidos	450 bits
Duración de una sola operación	0.140μs
R_{max}	50m
p_{max}	300mW
Exponente de pérdida de ruta	1
Tamaño del agujero	80m ²
Energía	1 J
Tiempo de simulación	150 s
Longitud de la cola	10000 paquetes
Colocación de nodo	Uniformemente aleatorio
Rondas de simulación	1000
Tipo de interfaz de red	Inalámbrico
Duración del transporte de paquete	1 segundo
Duración de la espera del vecino	0.5 segundos
Parámetros de algoritmo	
SARSA	
Epsilon (probabilidad de elegir explorar)	1
Tasa de aprendizaje	0.8
Factor de descuento	0.8
decaer	0.6

5.8.2 Análisis

Se analiza el método propuesto utilizando la métrica de tasa de cobertura y de varias métricas de desempeño en WSN como el número de nodos muertos, el rendimiento. Así también se utiliza la métrica de uso de energía como el consumo medio de energía en la red. La eficacia del mecanismo propuesto se comprueba comparándolo con dos obras publicadas en revistas indexadas.

5.8.2.1 Impacto de la tasa de cobertura

La tasa de cobertura se conoce como la cantidad de área cubierta por los nodos sensores en la región. La tasa de cobertura de MiA-CODER se compara con otros dos trabajos de investigación existentes (SRC y H3) con respecto al número de nodos sensores frente a la tasa de cobertura. La figura 5.9 muestra la tasa de cobertura y el número de nodos sensores los cuales son directamente proporcionales entre sí, lo que significa que a medida que aumenta el número de nodos sensores en la región, también aumenta la tasa de cobertura.

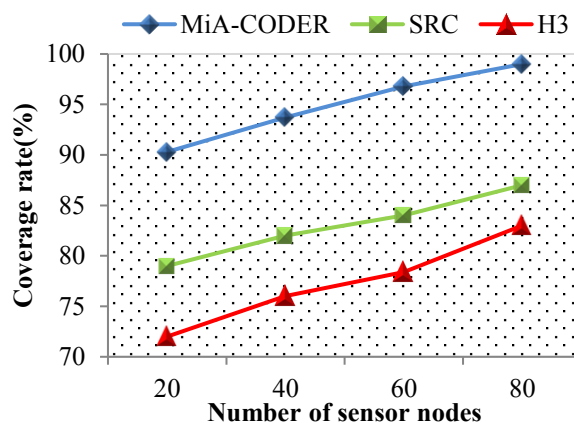


Figura 5. 9. Número de nodos frente a tasa de cobertura

Asimismo, la tasa de cobertura de MiA-CODER es alta, ya que cumple con los procesos de prevención y reparación de agujeros. La prevención del agujero se lleva a cabo, aumentando la eficiencia energética de los nodos y la reparación del agujero se implementa mediante la ejecución del algoritmo SARSA multi-agente, en el que la BS cubre el agujero moviendo el nodo móvil. Las obras existentes realizan la prevención de agujeros o la detección de agujeros, lo que no es eficiente para lograr una mayor tasa de cobertura.

Si embargo, la figura 5.10 muestra la comparación de MiA-CODER en términos de tasa de cobertura con respecto al tiempo de simulación. A partir de dicha figura, es evidente que la tasa de cobertura es inversamente proporcional al tiempo de simulación, lo que significa que a medida que aumenta el tiempo de simulación, la tasa de cobertura disminuye eventualmente. Sin embargo, MiA-CODER obtiene más alta tasa de cobertura frente a mecanismo SRC y H3.

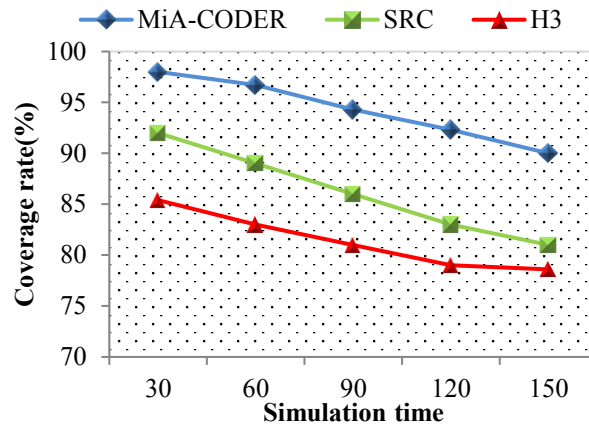


Figura 5. 10. Tiempo de simulación frente a tasa de cobertura

La formación de la topología del árbol de clústeres utilizando el triángulo de *Sierpinski* aumenta la eficiencia energética de los nodos sensores que evitan la formación de agujeros de cobertura en la red. Además, el proceso de reparación de agujeros realizado por la BS elimina los agujeros, lo que da como resultado una mejor *QoSensing*. La falta de implementación, tanto de la prevención de agujeros como de la reparación de agujeros reduce la tasa de cobertura de estos enfoques.

En la tabla 5.5 se muestra el análisis de la tasa de cobertura del sistema propuesto con respecto a métodos SRC y H3 en términos de número de sensores y tiempo de simulación en segundos. La tasa de cobertura general es alta en comparación con los otros dos métodos.

Tabla 5. 5. Datos cuantitativos de la tasa de cobertura

Método	Número de nodos sensores	Tiempo de simulación (s)
MiA-CODER	94.95 ± 0.5	94.26 ± 0.5
SRC (Simplified Rips Complex)	83 ± 0.5	86.2 ± 0.5
H3 (Heuristic Hole Healing)	77.35 ± 0.5	81.4 ± 0.5

5.8.2.2 Impacto del número de nodos muertos

Los nodos muertos se refieren a los nodos que se agotan o quedaron sin energía, debido a la gestión ineficaz de la energía. En la figura 5.11 se compara el número de nodos muertos empleando el algoritmo propuesto frente a mecanismos; SRC y H3. Se visualiza que el tiempo de simulación y el número de nodos muertos son directamente proporcionales entre sí, lo que significa que a medida que aumenta el tiempo de simulación, también aumenta el número de nodos muertos. El mecanismo propuesto tiene un número bajo de nodos muertos que los trabajos existentes, debido a la implementación de una topología de clúster desigual y al ciclo de trabajo dinámico de los nodos en la red.

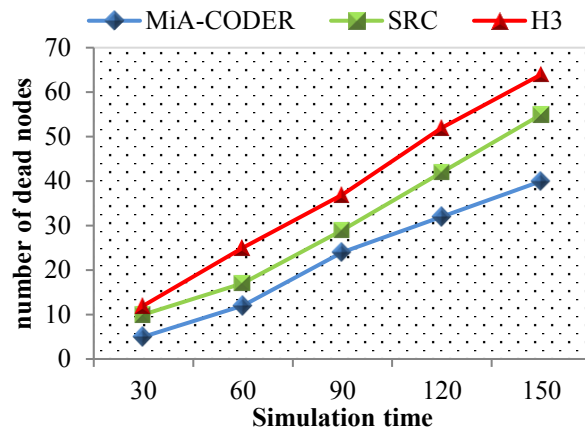


Figura 5. 11. Tiempo de simulación frente a número de nodos muertos

La topología de clúster desigual mejora la solidez y reduce el problema del agujero de cobertura para los nodos cercanos a la BS. La ejecución del ciclo de trabajo reduce el desperdicio no deseado de energía en la red. Las obras existentes tienen una estructura de topología ineficaz y una débil gestión de energía en la red.

En la tabla 5.6 se presenta un rango inclusivo de valores de nodos muertos para el algoritmo MiA-CODER, con respecto a los dos métodos frente al tiempo de simulación (150 segundos).

Tabla 5. 6. Número de análisis de nodos muertos

Método	Tiempo de simulación (150 s)
MiA-CODER	22±1.0
SRC	30±1.0
H3	38±1.0

El número de nodos muertos es bajo en el método propuesto frente a los otros dos enfoques. Esto muestra que MiA-CODER aumenta la vida útil de los nodos.

5.8.2.3 Impacto del rendimiento

El rendimiento en WSN se lo puede cuantificar con el throughput en una determinada cantidad de tiempo. Así mismo se hace la comparación con resultados del rendimiento de los enfoques SRC y H3 con respecto al número de nodos sensores. Las obras existentes carecen de un mecanismo de recuperación adecuado que afecta el rendimiento de esos enfoques

En la figura 5.12 se muestra que el rendimiento aumenta con el incremento del número de nodos de sensores.

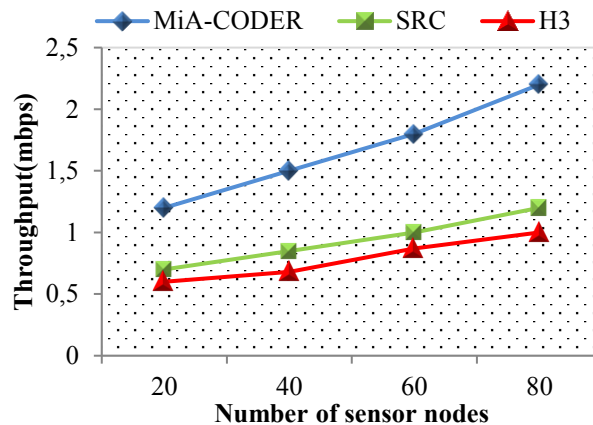


Figura 5. 12. Throughput frente al número de nodos sensores

El rendimiento de la WSN con el mecanismo MiA-CODER, es alto debido a la detección y cobertura de agujeros en la red. La detección se realiza mediante el protocolo de descubrimiento de agujeros basado en sector virtual (ViSHD) y la recuperación de agujeros de cobertura se ejecuta mediante la implementación de SARSA multi-agente, basado en múltiples parámetros.

5.8.2.4 Impacto de la fiabilidad

A continuación, se evalúa la fiabilidad de la WSN al expresar el comportamiento de la red (por ejemplo, crear, enviar, recibir, reenviar y descartar paquetes). La fiabilidad indica la capacidad de realizar funciones u operaciones requerida bajo ciertas condiciones dentro de intervalos de tiempo dados, es decir durante un cierto período de tiempo; y por tanto, demuestra la eficacia de un mecanismo (tener rutas disponibles mantener una tabla de enrutamiento que maneje el tráfico de paquetes adecuadamente) a largo plazo.

La fiabilidad del mecanismo MiA-CODER se compara con la de otros enfoques. Así la tasa de transmisión y recepción de paquetes aumenta con el aumento del tiempo de simulación. Para que un mecanismo se establezca como altamente confiable, el número de paquetes transmitidos, el número de paquetes recibidos y el número de paquetes de control (recopila la información en términos de ID de nodo, energía residual, distancia, etc.) deben ser altos. La fiabilidad de un enfoque se ve afectada por los agujeros de cobertura que se forman en la red. El mecanismo analiza la fiabilidad de la red tanto antes como después de la reparación de agujeros de cobertura. Por consiguiente, se tiene:

a) Fiabilidad antes de la reparación de agujeros de cobertura: En la figura 5.13 se muestra el número de paquetes transmitidos para el mecanismo propuesto, antes de la reparación del agujero de cobertura y se compara con dos enfoques existentes con respecto al tiempo de simulación. El mecanismo tiene un gran número de paquetes transmitidos con éxito, incluso antes de la reparación del agujero de cobertura debido a la adopción de la prevención de agujeros de cobertura. Esto reduce el número de agujeros de cobertura que se forman en la red. En consecuencia, el mecanismo propuesto es confiable con

un número máximo de paquetes transmitidos que enfoques SRC y H3. Los enfoques existentes no logran éxito, debido a la falta de técnicas de prevención de cobertura.

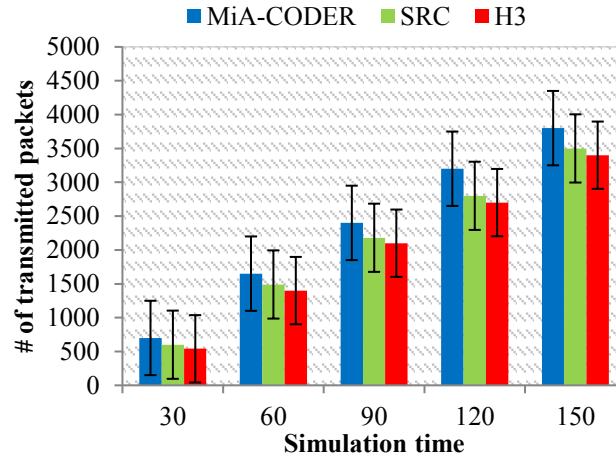


Figura 5. 13. Paquetes transmitidos (antes de reparación del agujero) vs tiempo de simulación

En la figura 5.14 se muestra la comparación del mecanismo MiA-CODER antes de la reparación del agujero de cobertura con mecanismos SRC y H3 en términos de número de paquetes Transmitidos con éxito con respecto al tiempo de simulación. El mecanismo propuesto tiene el número máximo de paquetes transmitidos con éxito, debido a la implementación de una topología de árbol de clúster desigual y una selección efectiva de la CH, utilizando el algoritmo *Mo BWo*. El número de paquetes recibidos con éxito es bajo para los enfoques existentes porque brindan una solución solo para la detección y reparación de agujeros de cobertura, pero no brindan ninguna solución para la prevención de agujeros de cobertura en la red.

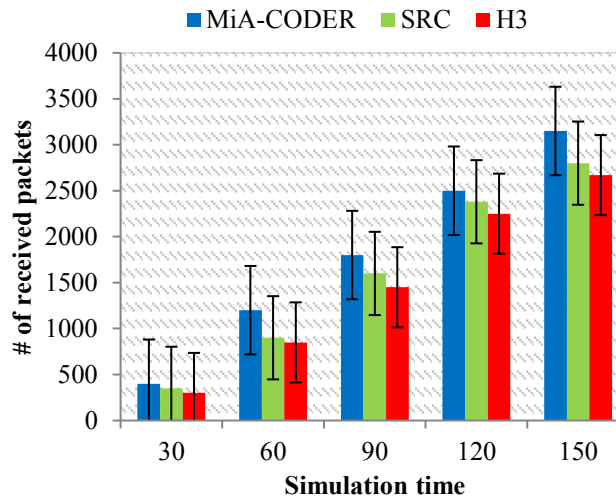


Figura 5. 14. Paquetes recibidos (antes de reparación del agujero) vs tiempo de simulación

La comparación del mecanismo MiA-CODER con otros trabajos existentes en términos de número de paquetes de control antes de la reparación del agujero de cobertura con respecto al tiempo de simulación se muestra en la figura 5.15 en donde el mecanismo formulado tiene un alto número de paquetes de control

debido a la formación de topología *Unequal Sierpinski Cluster Tree* (USCT) y la implementación de la programación dinámica del sueño en la red.

Esto reduce la carga en la red facilitando así la transmisión efectiva de datos. Los enfoques existentes no se centraron en la gestión adecuada de la carga en la red, lo que afecta la fiabilidad de esos enfoques.

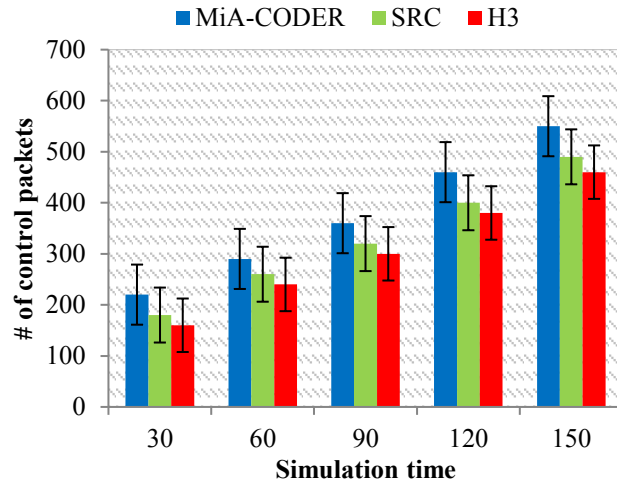


Figura 5. 15. Paquetes de control (antes de reparación del agujero) vs. tiempo de simulación

b) Fiabilidad después de la reparación de los agujeros de cobertura: El número de paquetes transmitidos para el mecanismo MiA-CODER después de la reparación del agujero de cobertura se compara con los dos enfoques antes mencionados con respecto al mismo tiempo de simulación. Comparando la figura 5.13 y la figura 5.16 muestran que el número de paquetes transmitidos del mecanismo propuesto aumenta después de la reparación del agujero de cobertura, lo que da como resultado una fiabilidad mejorada. Esto se debe a la implementación de la detección y reparación de agujeros de cobertura en la que el CH detecta el agujero de cobertura mediante el protocolo de Detección de Agujeros basado en el Sector Virtual (ViSHD), en el que se descubren los agujeros de cobertura tanto dentro del clúster como entre los clústeres y la cobertura.

La reparación del agujero la lleva a cabo la BS, utilizando el algoritmo MA-SARSA en el que el agujero de cobertura se repara seleccionando un nodo móvil óptimo más cercano al agujero y reemplazándolo en la región del agujero. Al hacerlo, se logra la transmisión eficiente de datos, lo que resulta en una mejora de QoS en la red. La falta de estrategias eficientes de detección y reparación de agujeros de cobertura afecta la fiabilidad de los dos enfoques mencionados.

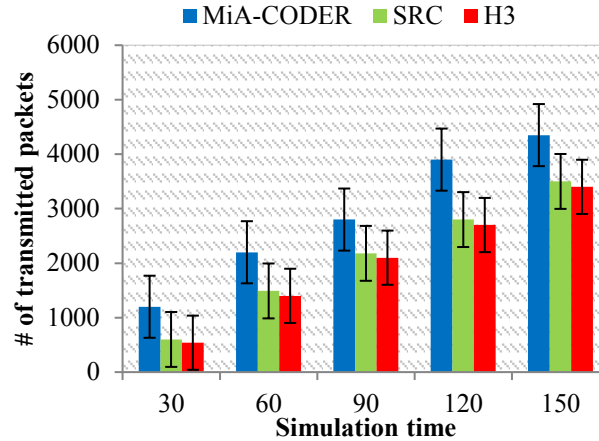


Figura 5. 16 Paquetes transmitidos (después de reparación del agujero) vs. tiempo de simulación

El número de paquetes recibidos del mecanismo MiA-CODER, después de la reparación del agujero de cobertura se compara con SRC y H3 con respecto al tiempo de simulación. A partir de la figura 5.14 y la figura 5.17, muestran que el número de paquetes recibidos aumentó después de la reparación del agujero de cobertura, lo que resultó en una mayor fiabilidad del enfoque.

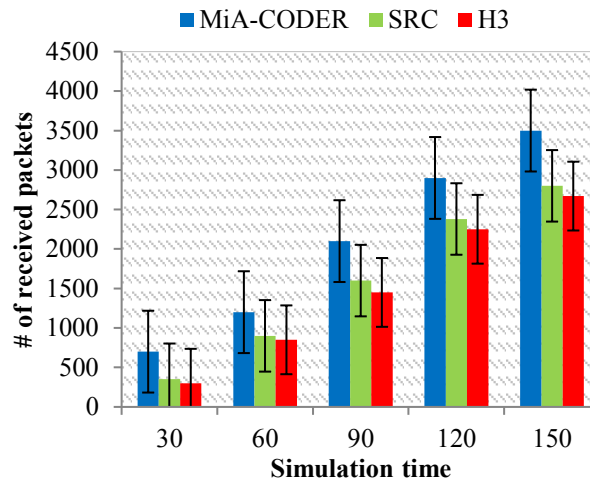


Figura 5. 17. Paquetes recibidos (después de reparación del agujero) vs. tiempo de simulación
 Esto se debe a la detección y la reparación de los agujeros de cobertura de una manera eficiente, lo que da como resultado una recepción de datos razonable y, por tanto, se logra una calidad de servicio mejorada. Se puede señalar que el número de paquetes de control aumenta después de la reparación del agujero de cobertura, lo que significa que la ejecución de la reparación aumenta la fiabilidad del mecanismo propuesto.

La comparación del MiA-CODER con los dos métodos antes mencionados, después de la reparación del agujero de cobertura con respecto al tiempo de simulación se muestra en la figura 5.18.

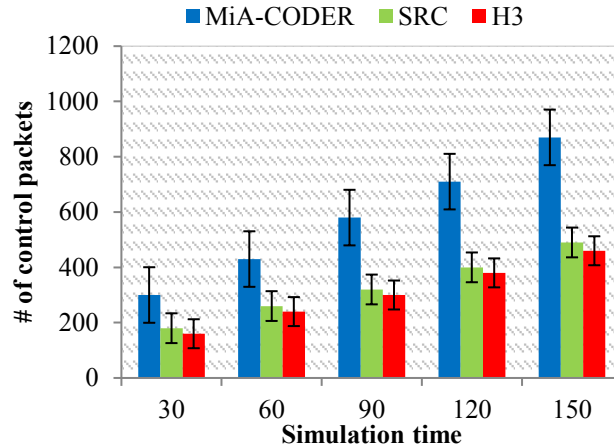


Figura 5. 18. Paquetes de control (después de reparación del agujero) vs. tiempo de simulación. Existe un aumento en el número de paquetes de control y esto se debe a la eficiente detección y reparación de agujeros de cobertura que lleva a cabo el mecanismo propuesto. La detección de agujeros de cobertura, tanto dentro del grupo como entre los grupos mejora la precisión del proceso de detección de agujeros, lo que ayuda a recuperar los agujeros de cobertura. Por lo tanto, la fiabilidad de MiA-CODER es más alta que los enfoques existentes.

5.8.2.5 Impacto del consumo medio de energía

El consumo medio de energía se conoce como la cantidad media de energía consumida por los nodos de la red. Cuanto mayor es el consumo de energía, más rápido se agotan los nodos. En la figura 5.19 muestra la comparación entre el consumo medio de energía de la obra, propuesta con las obras existentes con respecto al tiempo de simulación. De la figura se desprende claramente que el tiempo de simulación y el consumo medio de energía son directamente proporcionales entre sí.

El consumo medio de energía del mecanismo MiA-CODER es bajo en comparación con las dos obras existentes debido a la implementación de triángulos de *Sierpinski* basados en *clustering* desigual y programación de sueño de nodos en la red. Esto reduce el consumo de energía de los nodos en la red, aumentando así la vida útil de los nodos. Los enfoques existentes no proporcionan un mecanismo de consumo de energía eficiente que aumente el consumo de energía de los nodos y reduzca la vida útil de la red.

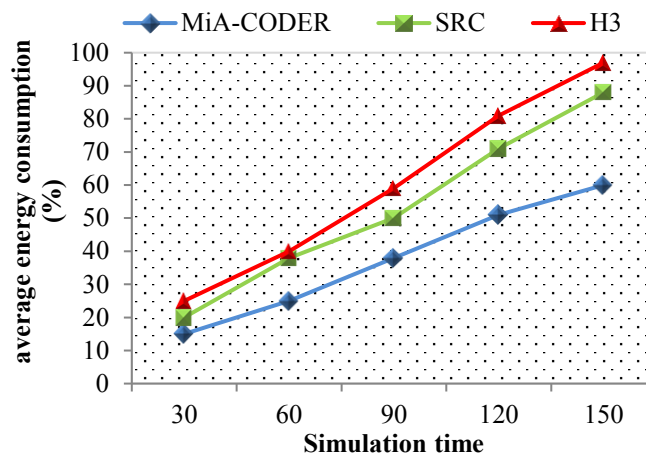


Figura 5. 19. Tiempo de simulación vs. promedio. consumo de energía

5.9 Discusión

La detección de agujeros de cobertura en topología de clústeres desiguales ayuda a identificar zonas desatendidas e inclusive sus vías de comunicación alternativas y ayuda a regular el flujo de tráfico de datos. La ausencia de algoritmos de detección de agujeros eventualmente causará problemas en el enrutamiento. Para reducir las brechas de cobertura, cada nodo sensor elige la acción combinada de reposición de nodos y ajuste del rango de detección. Los resultados de la simulación demuestran que, a diferencia de métodos como SRC y H3, el enfoque propuesto puede sostener una cobertura general de red en presencia de eventos de daño aleatorio por parte de los nodos sensores en topología de clústeres desiguales.

El índice de cobertura es una métrica muy importante, así los trabajos existentes exteriorizan dos métodos (i) despliegue óptimo del sensor (etapa inicial) y (ii) mejora de la cobertura (detección y recuperación de agujeros (después del despliegue)). El primer método requiere un alto costo para encontrar la posición óptima para todos los nodos y no es adecuado para redes a gran escala. Sin embargo, estos métodos no detectan el agujero con precisión ni lo recuperan utilizando una cantidad mínima de nodos debido al diseño deficiente del algoritmo, la consideración limitada de métricas, etc.

El método MiA-CODER logra una óptima QoSensing y mejoras en conectividad. Estas mejoras inciden en eficiencia energética para los nodos de toda la red.

Este capítulo contribuyó a la publicación del artículo MiA-CODER indexada en revista Applied Sciences de editorial MDPI.

CAPÍTULO 6:

CONCLUSIONES Y

FUTUROS TRABAJOS

Conclusiones

Los algoritmos de detección de agujeros de cobertura en una WSN evitan incremento en tiempo de respuesta o latencia en las comunicaciones. A pesar que el despliegue no deterministas sus nodos esten dispersados al azar o distribuidos escasamente en un área.

Para maximizar la vida útil de la red en escenarios no deterministas de WSN, tanto en topología estrella, malla (capítulo 4) se propuso el método de 4 fases que involucra calidad de sensado e inclusive mejoras de ruteo. Se estableció 4 algoritmos, uno por cada fase. Los resultados obtenidos se compararon con ensayos publicados en revistas indexadas y el método propuesto tuvo resultados favorables frente a otras propuestas. Los resultados obtenidos en las métricas empleadas indican que la tasa de cobertura es alta en la red esto indica la mejora en la calidad de detección. La relación de conectividad o tasa de conectividad también aumenta, lo que se traduce en una mejor calidad de detección. El retraso de un extremo a otro (E2E), representa indirectamente la conectividad en la red es decir si la conectividad en la red es alta, entonces el retardo E2E es pequeño. Así mismo el throughput, es alto cuando la conectividad y la cobertura son altas en la red. Por consiguiente, si el QoSensing en la red es alta, y luego el consumo de energía en la red es bajo, se puede decir que el método aplicado es eficiente.

El mecanismo MiA-CODER es una propuesta para red WSN basada en topología de clústeres. Se mejora la cobertura en la red con la detección y recuperación precisas de agujeros de cobertura con topología árbol de clústeres desiguales. Inicialmente, el consumo de energía de cada nodo se minimiza al realizar una topología de árbol de clúster de Sierpinski desigual (USCT), en la que el área de la red se divide en triángulos desiguales, de tal manera que el triángulo más cercano a la BS será más grande, consumiendo menos energía en beneficio de eliminar el problema del agujero de cobertura. De cada clúster, el nodo más eficiente en función de la distancia y la capacidad de energía se selecciona como el CH mediante la implementación de la optimización de viuda negra multiobjetivo (MoBWo). Además, el consumo de energía en la red se minimiza al realizar una programación dinámica de sueño mediante la implementación de la probabilidad *bayesiana* habilitada por entropía de Tsallis (TE2BP), en la que la probabilidad de que el nodo esté en modo de suspensión o en modo activo se calcula en función del valor de entropía para los parámetros importantes.

Una vez que el agujero se detecta con precisión, la BS ejecuta el algoritmo *SARSA Multi-Agent* en el que el proceso de reparación del agujero se lleva a cabo seleccionando de manera óptima un nodo móvil para cubrir el agujero, lo que se realiza en función de la distancia, la vida útil y el nivel de cobertura. Esto mejora la cobertura mejorando así el QoSensing en la red.

Trabajo a Futuro

Diseño y desarrollo de algoritmos y mecanismos específicos que aborden las características únicas de redes con despliegue aleatorio basado en topología de clústeres desiguales (cercano a implementaciones reales), con el objetivo de mejorar la cobertura, eficiencia energética y seguridad de la red.

Desarrollar algoritmos de detección de agujeros de cobertura que sean capaces de adaptarse a la variabilidad en la densidad de nodos y la distribución desigual de los clústeres. Con uso de técnicas de aprendizaje automático para identificar patrones y anomalías en los datos recopilados por los nodos sensores.

Explorar las implicaciones de seguridad asociadas con la detección y reparación de agujeros de cobertura en clústeres desiguales para soluciones de seguridad en la red contra posibles ataques o intrusiones durante este proceso. Los protocolos de enrutamiento son blanco de una gran variedad de ataques, donde intrusos recopilan y modifican datos de origen cuando dicha información se transmite por parte de los nodos intermediarios.

Evaluar en un entorno de implementación real, como el seguimiento de uno o varios objetivos, vigilancia de fronteras, etc.

Referencias

- Advanticsys. (2013). *Plataforma de sensor inalámbrico Mote CM5000-MSP*. Obtenido de <https://telosbsensors.wordpress.com/>
- Ahmad, A., Javaid, N., Khan, Z., Qasim, U., & Alghamdi, T. (2014). *(ACH)2: Routing Scheme to Maximize Lifetime and Throughput of Wireless Sensor Networks*. Obtenido de IEEE Sensors Journal, Vol. 14, Issue. 10, pp. 3516-3532: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6825849>
- AloTI. (2020). *High Level Architecture (HLA) Release 5.0*. Obtenido de https://aioti.eu/wp-content/uploads/2020/12/AIOTI_HLA_R5_201221_Published.pdf
- Al-Karaki , J., & Kamal, A. (2004). *Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey*. *IEEE Wirel. Commun.* 11 : 6-28.
- Alnawafa, E., & Marghescu, I. (2018). *New Energy Efficient Multi-Hop Routing Techniques for Wireless Sensor Networks: Static and Dynamic Techniques*. Obtenido de Sensors (Basel, Switzerland) vol. 18.6 1863. 2018, doi: 10.3390 / s18061863.
- Ammari, H. M. (2014). *The Art of Wireless*. Berlin Heidelberg: Springer Heidelberg . <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-40009-4.pdf>.
- Antil, P., & Malik, A. (2014). *Hole Detection for Quantifying Connectivity in Wireless Sensor Networks: A Survey*. Obtenido de <https://www.hindawi.com/journals/jcnc/2014/969501/>
- Azharuddin, M., Pratyay, K., & Prasanta, K. (2016). *Energy efficient fault tolerant clustering and routing algorithms for wireless sensor networks*. Obtenido de Computers and Electrical Engineering, Elsevier, Vol. 41, pp. 177-190,: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045790614002134>
- Baltaci, A., & Dinc, E. (2021). *A Survey of Wireless Networks for Future Aerial COMMunications (FACOM)*. Obtenido de <https://arxiv.org/pdf/2111.04175.pdf>
- Bansal, S., & Kumar, D. (2020). *IoT Ecosystem: A Survey on Devices, Gateways, Operating Systems, Middleware and Communication*. Obtenido de Int J Wireless Inf Networks 27, 340–364: <https://doi.org/10.1007/s10776-020-00483-7>
- Bhattacharyya, D., Kim, T.-h., & Pal, S. (2010). *A Comparative Study of Wireless Sensor Networks and Their Routing Protocols*. Obtenido de Sensors Journal (Basel). 2010; 10(12): 10506–10523.: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3231091/>

- Buyya, R., Chang, C., & Narayana, S. (2018). *Internet of Things (IoT) and New Computing*. Obtenido de <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1812/1812.00591.pdf>
- Capella, J. (2010). *Redes inalámbricas de sensores: una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos*. Obtenido de Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia : <https://pdfs.semanticscholar.org/c4cc/bc4e7d8492dfa350ed75faff9e01659607d.pdf>
- Chase, Q., Wu, & Wang, L. (2017). *On Efficient Deployment of Wireless Sensors for Coverage and Connectivity in Constrained 3D Space*. Obtenido de Sensors Journal MDPI: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2304>
- Chen, D., & Varshney, P. (2004). *QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey*. Obtenido de Conference: Proceedings of the International Conference on Wireless Networks,: https://www.researchgate.net/publication/220719599_QoS_Support_in_Wireless_Sensor_Networks_A_Survey
- Chen, X., Wang, X., & Chen, X. (2013). *Energy-Efficient Optimization for Wireless Information and Power Transfer in Large-Scale MIMO Systems Employing Energy Beamforming*. Obtenido de IEEE Wireless Communications Letters, Vol. XX, NO. Y, 2013: <https://arxiv.org/pdf/1309.6027.pdf>
- Cobos, E. (2007). *Estudio de las redes sensoriales como una nueva alternativa de comunicación Inalámbrica*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/2372/1/T-ESPE-025074.pdf>
- Deepak, S., Sakkari, & Basavaraju, T. (2015). *GCCT: A Graph-Based Coverage and Connectivity Technique for Enhanced Quality of Service in WSN*. Obtenido de Wireless Personal Communications, Springer, Vol. 85, Issue. 3, pp. 1295-1315: <https://dl.acm.org/doi/10.1007/s11277-015-2841-0>
- Desai, P., Sheth, A., & Anantharam, P. (2014). *Semantic Gateway as a Service Architecture for IoT Interoperability*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/267157426_Semantic_Gateway_as_a_Service_Architecture_for_IoT_Interoperability
- Dung, L., Hieu, T., Choi, S., & Kim, B. (2017). *An Impact of Beamforming on the Path Connectivity in Cognitive Radio Ad Hoc Networks*. Obtenido de Sensors Journal 2017, 17(4), 690;: doi:10.3390/s17040690
- Elhabyan, R., Shi, W., & St-Hilaire, M. (2019). *Coverage Protocols for Wireless Sensor Networks: Review and Future Directions*. Obtenido de Journal of

Communications and Networks, V. 21, N. 1:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8680729>

- Elloumi, O. (2017). *Convergence matters for the Internet of Things: How can standards contribute?* Obtenido de ITU News: <https://www.itu.int/en/myitu/News/2020/05/07/13/19/Convergence-matters-for-the-Internet-of-Things-How-can-standards-contribute>
- European Platforms Initiative. (2018). *Advancing IoT Platforms Interoperability*. Obtenido de <https://iot-epi.eu/wp-content/uploads/2018/07/Advancing-IoT-Platform-Interoperability-2018-IoT-EPI.pdf>
- Feng, X., Zhang, X., Zhang, J., & Muhdhar, A. (2019). "A coverage hole detection and repair algorithm in wireless sensor networks," *Cluster Comput*, vol. 22, no. 5, pp. 12473–12480, . Obtenido de doi: 10.1007/s10586-017-1665-y.
- Garbarino, J. (2011). *Protocolos para redes inalámbricas de sensores*. Obtenido de Tesis de Ingeniería en Informática. UBA: <http://materias.fi.uba.ar/7500/Garbarino.pdf>
- Gifty, J., & Sumathi, K. (2016). *ZigBee Wireless Sensor Network Simulation with Various Topologies*. Obtenido de IEEE International Conference on Green Engineering and Technologies: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7916714>
- Gui, J., Zhou, X., & Xiong, N. (2016). *A Cluster-Based Dual-Adaptive Topology Control Approach in Wireless Sensor Networks*. Obtenido de MDPI Sensors Journal, Vol. 16: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/10/1576>
- Gunjan, Maheshwari, P., & Sharma, A. (2018). *Modified TEEN for Handling Inconsistent Cluster Size Problem in WSN*. Obtenido de International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, 2018, pp. 1-6.: doi: 10.1109/WiSPN
- Gupta, H., Rao, S., & Venkatesh, T. (2016). *Analysis of stochastic coverage and connectivity in three-dimensional heterogeneous directional wireless sensor networks*. Obtenido de Pervasive and Mobile Computing Volume 29. ACM Digital. : <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1016/j.pmcj.2015.08.004>
- Hajjej, F., & Zaied, M. (2020). *A distributed coverage hole recovery approach based on reinforcement learning for Wireless Sensor Networks*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S157087051830982X>
- Huynh, T.-T., Dinh-Duc, A.-V., & Tran, C.-H. (2016). *Delay-Constrained Energy-Efficient Cluster-based Multi-Hop Routing in Wireless Sensor Networks*. Obtenido de Journal of Communications and Networks, Vol. 18, Issue. 4, pp. 580-588: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7578939>

- Hyeon, S., & Kim, K. (2010). *A new geographic routing protocol for aircraft ad hoc networks*. Obtenido de Proceedings of the IEEE/AIAA 29th Digital Avionics Systems Conference (DASC), pp. 2.E.2-1–2.E.2-8.
- Intanagonwiwat, C., Govindan, R., & Estrin, D. (2000). *Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks*. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '00*, pages 56–67, New York, NY, USA, ACM.
- Jam, B., Farman, H., & Javed, h. (2017). *Energy Efficient Hierarchical Clustering Approaches in Wireless Sensor Networks: A Survey*. Obtenido de <https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2017/6457942/>
- Jameii, S., Faez, K., & Dehghan, M. (2015). *Multi objective Optimization for Topology and Coverage Control in Wireless Sensor Networks*. Obtenido de International Journal of Distributed Sensor Networks, Hindawi Publications: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2015/363815>
- Jimenez, E. (2013). *Modelo de Interoperabilidad para Plataformas de Cloud Computing basado en Tecnologías del Conocimiento*. Obtenido de Tesis doctoral. Universidad Carlos III de Madrid: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/18172/tesis_enrique_jimenez_domingo_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Kamgueu, P., Nataf, E., & Djotio, T. (2017). Architecture for an efficient integration of wireless sensor networks to the Internet through Internet of Things gateways. En S. Journal. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1550147717744735>.
- Keleadile, L., Murtala, A., Mangwala, M., & Chuma, J. (2019). *Communication protocols for wireless sensor networks: A survey and comparison*. Obtenido de Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844018340192>
- Khalifa, B., Khedr, A., & Aghbari, A. (2020). *A Coverage Maintenance Algorithm for Mobile WSNs With Adjustable Sensing Range*. Obtenido de IEEE Sensors Journal, vol. 20, no. 3, pp. 1582–1591, Feb. 2020,: doi: 10.1109/JSEN.2019.2946623
- Khamlichi, Y., Mesmoudi, Y., Tahiri, A., & Abtoy, A. (2018). *A Recovery Algorithm to Detect and Repair Coverage Holes in Wireless Sensor Network Systems*. Obtenido de <http://www.jocm.us/uploadfile/2018/0613/20180613043933874.pdf>
- Khan, J., Qureshi, H., & Iqbal, A. (2016). *Energy management in Wireless Sensor Networks: A survey*. Obtenido de Hal Journal: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01283728/document>

- Khelil, A., & Beghdad, R. (2016). *ESA: an Efficient Self-deployment Algorithm for Coverage in Wireless Sensor Networks*. Obtenido de Procedia Computer Science, Elsevier, Vol. 98, pp. 40-47: https://www.researchgate.net/publication/308480865_ESA_An_Efficient_Self-deployment_Algorithm_for_Coverage_in_Wireless_Sensor_Networks
- Khelil, A., Beghdad, R., & Khelloufi, A. (2020). "3HA: Hybrid Hole Healing Algorithm in a Wireless Sensor Networks," *Wireless Pers Commun*, vol. 112, no. 1, pp. 587–605. Obtenido de doi: 10.1007/s11277-020-07062-2.
- Koo, J., Oh, S.-R., & Kim, Y.-G. (2019). *Device Identification Interoperability in Heterogeneous IoT Platforms*. Obtenido de Sensors 19(6): 1433: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6471944/>
- Kuila, P., Prasanta, K., & Jana. (2014). *Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: Particle swarm optimization approach*. Obtenido de Engineering Applications of Artificial Intelligence, Elsevier, Vol. 33, pp. 127-140,: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197614000852>
- Kumar, S., & Lobiyal, D. (2013). *Sensing Coverage Prediction for Wireless Sensor Networks in Shadowed and Multipath Environment*. Obtenido de Hindawi: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/565419/>
- Lata, S., Mehfuz, S., Urooj, S., Ali, A., & Nasse, N. (2020). "Disjoint Spanning Tree Based Reliability Evaluation of Wireless Sensor Network," *Sensors*, vol. 20, no. 11, Art. no. 11,. Obtenido de doi: 10.3390/s20113071.
- Le, N., & Jang, Y. (2015). *Energy-Efficient Coverage Guarantees Scheduling and Routing Strategy for Wireless Sensor Networks*. Obtenido de International Journal of Distributed Sensor Networks. SAGE, V 11. N. 8: <https://doi.org/10.1155/2015/612383>
- Li, S., Kim, J., Han, D., & Lee, K. (2019). *A Survey of Energy-Efficient Communication Protocols with QoS Guarantees in Wireless Multimedia Sensor Networks*. Obtenido de Sensor. 19 (1), 199;: <https://doi.org/10.3390/s19010199>
- Liang, J., Luy, M., & Kui, X. (2014). *A Survey of Coverage Problems in Wireless Sensor Network*. Obtenido de Sensors & Transducers Journal, V. 163, N 1, pp. 240-246: https://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/january_2014/Vol_163/PRP_0059.pdf
- Libelium. (2015). *50 aplicaciones de sensores para un mundo más inteligente*. Obtenido de http://www.libelium.com/resources/top_50_iot_sensor_applications_ranking/#show_infographic

- Liu, L., Wei, W., Zhao, D., & Ma, H. (2015). *Urban Resolution: New Metric for Measuring the Quality of Urban Sensing*. Obtenido de IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 14, Issue. 12, pp. 2560-2575: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7044580>
- Liu, X. (2016). *Survivability-Aware Connectivity Restoration for Partitioned Wireless Sensor Networks*. Obtenido de IEEE Communications Letters, Vol. 21, Issue. 11, pp. 2444-2447: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7913690?denied=>
- Liu, Y., Liu, A., Zhang, N., Liu, X., Ma, M., & Hu, Y. (2019). "DDC: Dynamic duty cycle for improving delay and energy efficiency in wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 131, pp. 16–27,. Obtenido de doi: 10.1016/j.jnca.2019.01.
- Liu, Y., Wu, Q., Zhao, T., Tie, Y., Bai, F., & Jin, M. (2019). *An Improved Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks*. Obtenido de Sensors 19(20), 4579;: <https://doi.org/10.3390/s19204579>
- Mahesh, N., & Vijayachitra, S. (2019). "DECSA: hybrid dolphin echolocation and crow search optimization for cluster-based energy-aware routing in WSN," *Neural Comput & Applic*, vol. 31, no. 1, pp. 47–62,. Obtenido de doi: 10.1007/s00521-018-3637-4.
- Maroto, S. (2010). *Desarrollo de aplicaciones basada en WSN*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8592/PFC%20-%20DESARROLLO%20DE%20APLICACIONES%20BASADAS%20EN%20WSN.pdf>
- Mercado, G. (2019). *Interoperabilidad en IoT- LACNIC31*. Obtenido de <https://www.lacnic.net/innovaportal/file/3635/1/62-lacnic-31-interoperabilidad-en-iot-g-mercado.pdf>
- Mihajlov, B., & Bogdanoski, M. (2014). *Analysis of the WSN MAC Protocols under Jamming DoS Attack*". Obtenido de International Journal of Network Security, Vol. 16, Issue. 4, pp. 304-312,: https://www.researchgate.net/publication/259296305_Analysis_of_the_WSN_MAC_Protocols_under_Jamming_DoS_Attack
- More, K., Wolkersdorfer, C., & Kang, N. (2020). *Automated measurement systems in mine water management and mine workings – A review of potential methods*. Obtenido de Elsevier: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212371720300457>
- Mostafaei, H. (2019). "Energy-Efficient Algorithm for Reliable Routing of Wireless Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 7, pp. 5567-5575. Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8464660&isnumber=8657433>

- Movva, P., & Rao, P. (2019). "Novel Two-Fold Data Aggregation and MAC Scheduling to Support Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Network," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 1260–1274,. Obtenido de doi: 10.1109/ACCESS.2018.2888484.
- Muhammad, S., Abdul, H., Hassan, C., & Thabit, S. (2016). *Coverage Enhancement Algorithms for Distributed Mobile Sensors Deployment in Wireless Sensor Networks*. Obtenido de International Journal of Distributed Sensor Networks: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1155/2016/9169236>
- Nguyen, H., Förster, A., Puccinelli, D., & Giordano, S. (2011). *Sensor node lifetime: An experimental study*. Obtenido de IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom): <https://ieeexplore.ieee.org/document/5766869>
- Niu, X., Tao, Z., Wu, G., Huang, ., C., & Cui, L. (2006). *Hybrid cluster routing: an efficient routing protocol for mobile ad hoc networks*. Obtenido de Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 3554–3559,.
- Ortega-Corral, C., Acosta del Río, O., & López, J. (2017). *Arquitecturas y protocolos avanzados de enrutamiento de redes inalámbricas de sensores*. Obtenido de <http://201.151.251.123/ftp/transparencia/2017/2/41A/Arquitecturas%20y%20protocolos%20avanzados%20de%20enrutamiento%20de%20redes.PDF>
- Palacios, E., & et al. (2019). "Analyzing And Improving Quality Of Sensing In Wireless Sensor Network". *Proceedings*,. Obtenido de doi:10.1109/chilecon47746.2019.8987604
- Palma, A. (2009). *Análisis de protocolos de enrutamiento para redes de sensores inalámbricas*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/30042564.pdf>
- Pereira, V. (2016). *Performance Measurement in Wireless Sensor Networks*. Obtenido de Tesis Doctoral Universidad de Coimbra: <https://core.ac.uk/download/pdf/43581447.pdf>
- Priyadarshi, R., Gupta, B., & Anurag, A. (2020). *Deployment techniques in wireless sensor networks: a survey, classification, challenges, and future research issues*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Omnidirectional-and-directional-sensor-node-in-WSN_fig6_338709616
- Rajkumar S. Deshpande, S. M. (2018). *Quality of Service in Wireless Sensor Networks: Issues and*. Obtenido de IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)ISSN: 2278-0661, ISBN: 2278-8727, PP: 45-52: <http://www.iosrjournals.org/iosr-jce/papers/sicete-volume3/33.pdf>

- Rault, T. (2015). *Energy-efficiency in wireless sensor networks*. Obtenido de Hal Journal: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01470489/document>
- Ravi. (2019). *Basics of Wireless Sensor Networks (WSN) | Classification, Topologies, Applications*. Obtenido de <https://www.electronicshub.org/wireless-sensor-networks-wsn/>
- Razzaq, M., Ningombam, D., & Shin, S. (2018). *Energy efficient K-means clustering-based routing protocol for WSN using optimal packet size*. Obtenido de International Conference on Information Networking (ICOIN), Chiang Mai, 2018, pp. 632-635.: doi: 10.1109/ICOIN.20
- Riva, G. (2015). *Protocolos para el Procesamiento Distribuido de Funciones de Umbral en Redes Inalámbricas de Sensores*. Obtenido de Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba : <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/2546>
- Rueda, J. S., & Talabera, J. (2017). *Similarities and differences between Wireless Sensor Networks and the Internet of Things: Towards a clarifying position*. Obtenido de Revista Colombiana de Computación Vol. 18, No. 2, pp. 58–74. : <https://doi.org/10.29375/25392115.3218>
- Sadagopan, N., Krishnamachari, B., & Helmy, A. (2003). *“The ACQUIRE Mechanism for Efficient Querying in Sensor Networks*. Obtenido de Elsevier journal on Ad Hoc Networks, .
- Sahoo, P., Chiang, M., & Wu, S. (2016). *An Efficient Distributed Coverage Hole Detection Protocol for Wireless Sensor Networks*. Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4813961/>
- Saravia, D. (2020). *Arquitectura de análisis de datos generados por el Internet de las cosas (IoT) en tiempo real*. Obtenido de aTesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/149398/Sarabia%20-%20Arquitectura%20de%20an%C3%A1lisis%20de%20datos%20generados%20por%20el%20internet%20de%20las%20cosas%20IoT%20en%20tiempo%20....pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Sethi, P., & Sarang, S. (2016). *Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications*. Obtenido de <https://www.hindawi.com/journals/jece/2017/9324035/>
- Shabbir, N., & Hassan, S. (2017). *Protocolos de enrutamiento para redes inalámbricas de sensores*. Obtenido de doi: 10.5772 / intechopen.70208
- Shagari, N., Idris, M., Salleh, R., & Ah, I. (2020). *“Heterogeneous Energy and Traffic Aware Sleep-Awake Cluster-Based Routing Protocol for Wireless Sensor Network,” IEEE Access, vol. 8, pp. 12232–12252,. Obtenido de doi: 10.11*

- Shah, R., & Rabaey, J. (2002). *Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks*. In *2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record. WCNC 2002 (Cat. No.02TH8609)*, volume 1, pages 350–355.
- Shaimaa, M., Haitham, H., & Imane, S. (2015). *Harmony Search-based K-Coverage Enhancement in Wireless Sensor Networks*. Obtenido de International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering Vol:9, No:1: https://scholar.cu.edu.eg/?q=imane_saroit/files/3_0.pdf
- Shakeri, M., Sadeghi-Niaraki, A., Choi, S., & S. (2020). “*Performance Analysis of IoT-Based Health and Environment WSN Deployment*,” *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 20,. Obtenido de doi: 10.3390/s20205923.
- Sharmin, N., Karmaket, A., Lambert, W., & Alam, M. (2020). *Minimizing the Energy Hole Problem in Wireless Sensor Networks: A Wedge Merging Approach*. Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6983154/>
- Sharmin, S., Nur, F., Razzaque, A., Rahman, M., & Almogren, A. (2017). *Tradeoff Between Sensing Quality and Network Lifetime for Heterogeneous Target Coverage Using Directional Sensor Nodes*. Obtenido de IEEE Access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7954952>
- Shen, J., Wang, A., Wang, C., Hung, P., & Chin-Feng. (2017). *An Efficient Centroid-Based Routing Protocol for Energy Management in WSN-Assisted IoT*. Obtenido de IEEE Access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8027036>
- Sobin, C. (2020). *A Survey on Architecture, Protocols and Challenges in IoT*. Obtenido de Wireless Personal Communications: doi:10.1007/s11277-020-07108-5
- Sohraby, K., Minoli, D., & Znati, T. (2007). *WIRELESS SENSOR NETWORKS Technology, Protocols, and Applications*. Obtenido de Wiley-Interscience,.
- Suciu, I. (2020). *Energy aware optimization for Radio Technologies*. Obtenido de PhD Program in Network Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya: <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/668889/TIS1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tripathi, A., Prabhat, H., Dutta, T., Mishra, R., & Shukl, K. (2018). *Coverage and Connectivity in WSNs: A Survey,nResearch Issues and Challenges*. Obtenido de IEEE Access: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8372454>

- Vinodhini, R., & Gomathy, C. (2020). "MOMHR: A Dynamic Multi-hop Routing Protocol for WSN Using Heuristic Based Multi-objective Function," *Wireless Personal Communications*, vol. 111,. Obtenido de doi: 10.1007/s11277-019-06891-0.
- Wang, B. (2011). *Coverage problems in sensor networks: a survey*.
- Wang, J., Ju, C., Kim, H., Sherratt, R., & Lee, S. (2019). "A mobile assisted coverage hole patching scheme based on particle swarm optimization for WSNs," *Cluster Comput*, vol. 22, no. 1, pp. 1787–1795,. Obtenido de doi: 10.1007/s10586-017-1586-9.
- Weyrich, M., & Ebert, C. (2016). *Arquitecturas de referencia para el Internet de las Cosas. Software IEEE*, 33(1), 112–116. . Obtenido de doi:10.1109/ms.2016.20
- Xiao, F., Yang, X., Yang, M., Sun, L., & Wang, R. (2016). *Surface Coverage Algorithm in Directional Sensor Networks for Three-Dimensional Complex Terrains*. Obtenido de Tsinghua Science and Technology, Vol. 21, Issue. 4, pp. 397-406,: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7536717>
- Xing, G., Wang, X., Zhang, Y., & Lu, C. (2009). *Integrated coverage and connectivity configuration for energyconservation in sensor networks*,. Obtenido de ACM Transactions on Sensor ACM Transactions on Sensor.
- Xu, Y., Luo, X., Wang , W., & Zhao, W. (2017). *Efficient DV-HOP Localization for Wireless Cyber-Physical Social Sensing System: A Correntropy-Based Neural Network Learning Scheme*. Obtenido de Sensors Jornal 2017, 17(1), 135: doi:10.3390/s17010135
- Yacchirema, D. (2019). *Arquitectura de interoperabilidad de dispositivos físicos para el Internet de las Cosas IoT*. Obtenido de Tesis doctoral. Universitat de Valencia: <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/129858/Yacchirema%20-%20Arquitectura%20de%20Interoperabilidad%20de%20dispositivos%20f%C3%ADsicos%20para%20el%20%20Internet%20de%20las%20C....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ye, F., Zhong, G., Cheng, J., & Lu, S. (2014). *Peas: a robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks*,. Obtenido de Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS '03), pp. 28–37,.
- Zafeiropoulos, A., Spanos, D.-E., Arkoulis, S., & Konstantinou, N. (2011). En *Data management in sensor networks using Semantic web technologies* (pág. Capítulo 11E). Atenas: Nova Science.
- Zamora, N., Philco, O., & Estupiñan, E. (2019). "The performance of QoS in wireless sensor networks," *2019 14th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, Coimbra, Portugal, 2019, pp. 1-5. Obtenido de

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8760756&isnumber=8760589>

- Zeng, D., Zhang, S., Gu, L., Yu, S., & Fu, Z. (2018). "Quality-of-sensing aware budget constrained contaminant detection sensor deployment in water distribution system," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 103, pp. 274–279,. Obtenido de doi: 10.1016/j.
- Zhang, J., Chu, H., & Feng, X. (2020). "Efficient Coverage Hole Detection Algorithm Based on the Simplified Rips Complex in Wireless Sensor Networks," *Journal of Sensors*, vol. 2020, pp. 1–13,. Obtenido de doi: 10.1155/2020/3236970.
- Zhang, Q., & Fok, M. (2017). A Two-Phase Coverage-Enhancing Algorithm for Hybrid Wireless Sensor Networks. Obtenido de *Sensors Journal*, Vol. 17, Issue. 1: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/1/117>
- Zhang, X., Xu, C., & Xu, J. (2015). *Hierarchical ZRP's performance vs ZRP's performance in MANET*. Obtenido de *Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN '15)*, pp. 423–426,.
- Zhang, Y., & Liu, M. (2020). "Regional Optimization Dynamic Algorithm for Node Placement in Wireless Sensor Networks," *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 15,. Obtenido de doi: 10.3390/s20154216.
- Zhuo, M., Liu, L., Zhou, S., & Tian, Z. (2021). *Survey on security issues of routing and anomaly detection for space information networks*. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41598-021-01638-z.pdf?proof=t%2525C2%2525A0>

Apéndice A: Artículos publicados en revistas

Producción científica 1

- Artículo: Multihop Deterministic Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks MDR
- Autores: Orlando Philco Asqui, Luis Armando Marrone, Emily Estupiñan Chaw
- Fecha de publicación: Marzo 2021
- Revista: International Journal of Communications, Network and System Sciences
- Editor: Scientific Research
- Volumen: 14
- Número: 3
- DOI: 10.4236 / ijcn.2021.143003



International Journal of Communications, Network and System Sciences

ISSN Print: 1913-3715

ISSN Online: 1913-3723

www.scirp.org/journal/ijcn

E-mail: ijcn@scirp.org

[Google-based Impact Factor: 68](#)

[Submission](#)

[Citations](#)

[h5-index & Ranking](#)

Journal Metrics / Impact Factor

Journal	Start Year	Articles	Total Cites	Cites per Article	h* index	h5 index
IJCNS	2008	819	7218	8,8	34	14

The listed h5 index is originated from Google Scholar Metrics updated in July 2019.

The listed h index was calculated based on the citations statistics from Google Scholar. Updated in April 2021.*

Multihop Deterministic Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks MDR

Orlando Philco Asqui¹, Luis Armando Marrone², Emily Estupiñan Chaw¹

¹Faculty of Technical Education for Development, Catholic University Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador

²National University of La Plata, La Plata, Argentina

Email: luis.philco@cu.ucsg.edu.ec, lmarrone@linti.unlp.edu.ar, emily.estupinan.chaw@gmail.com

How to cite this paper: Asqui, O.P., Marrone, L.A. and Chaw, E.E. (2021) Multihop Deterministic Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks MDR. *Int. J. Communications, Network and System Sciences*, 14, 31-45.
<https://doi.org/10.4236/ijcns.2021.143003>

Received: March 19, 2021

Accepted: March 28, 2021

Published: March 31, 2021

Copyright © 2021 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Abstract

The inception of Wireless Sensor Networks (WSN) has brought convenience into many lives with uninterrupted wireless network. The nodes that transmit data consist of heterogeneous and battery equipped sensor nodes (SNs) that are deployed randomly for network surveillance. To manage the random deployment of nodes, clustering algorithms are used with efficient routing protocols. This results in aggregation and dropping of redundant data packets that enables flawless data transmission from cluster nodes to Base Station (BS) via Cluster Heads (CHs). In this paper, a dynamic and multi-hop clustering and routing protocol for thorough behavior analysis is proposed, taking distance and energy into consideration. This forms a smooth routing path from the cluster nodes, CHs, Sub-CHs to the BS. On comparing proposed process with the existing system, experimental analysis shows a significant enhancement in the performance of network lifetime, with improved data aggregation, throughput, as the protocol showing deterministic behavior while traversing the network for data transmission, we name this protocol as Multi-hop Deterministic energy efficient Routing protocol (MDR).

Keywords

Energy Efficiency, Multi-Hop Routing Protocol, Wireless Sensor Networks, Network Lifetime

1. Introduction

Wireless sensor networks (WSNs) are wireless networks that monitor physical or environmental conditions like sound, vibration, temperature, motion, pressure etc. WSNs generally consist of sensor nodes (SNs) that hold decent processing

Producción científica 2

- Artículo: 4TQS: Four Tiers OVER Quality of Sensing with Energy Improvement in Wireless Sensor Network
- Autores: Luis Orlando Philco Asqui, Néstor Zamora C.
- Fecha de publicación: Julio 2021
- Revista: International Journal of Communications, Network and System Sciences
- Editor: Scientific Research
- Volumen: 14
- Número: 7
- DOI: 10.4236 / ijcnsc.2021.147007

The screenshot shows the article page on the Scientific Research website. The header includes the journal name, 'OPEN ACCESS' badge, and a login button. A navigation bar lists Home, Articles, Journals, Books, News, About, Services, and Submit. Below the navigation bar is a search bar and a breadcrumb trail: Home > Journals > Article. The left sidebar contains a 'Journals Menu' with links to Articles, Archive, Indexing, Aims & Scope, Editorial Board, For Authors, and Publication Fees. Below the menu is a 'Related Articles' section listing several papers related to wireless sensor networks. The main content area displays the article title, authors (Luis Orlando Philco Asqui, Néstor A. Zamora Cedeño), affiliation (Faculty of Technical Education for Development, Catholic University Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador), DOI (10.4236/ijcnsc.2021.147007), and download/view statistics (143 Downloads, 693 Views). The abstract describes the 4TQS algorithm for QoSensing improvement in WSNs. Keywords include QoSensing, 4Tiers, Metrics, Coverage, and Connectivity. Social media share buttons for Facebook, Twitter, LinkedIn, and YouTube are provided at the bottom.

Scientific Research
An Academic Publisher

OPEN ACCESS Login

Home Articles Journals Books News About Services Submit

Home > Journals > Article Search Title, Keywords, Author, etc.

Journals Menu

- > Articles
- > Archive
- > Indexing
- > Aims & Scope
- > Editorial Board
- > For Authors
- > Publication Fees

Related Articles

- A Fault-Tolerant Cooperative Spectrum Sensing Algorithm over Cognitive Radio Network Based on Wireless Sensor Network
- Energy Optimisation in Wireless Sensor Network
- Minimization of Collision in Energy Constrained Wireless Sensor Network
- An Energy-Balanced Clustering Routing Algorithm for Wireless Sensor Network
- Energy Efficient Path

International Journal of Communications, Network and System Sciences > Vol.14 No.7, July 2021

4TQS: Four Tiers OVER Quality of Sensing with Energy Improvement in Wireless Sensor Network

Luis Orlando Philco Asqui, Néstor A. Zamora Cedeño
Faculty of Technical Education for Development, Catholic University Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.

DOI: 10.4236/ijcnsc.2021.147007 PDF HTML XML 143 Downloads 693 Views

Abstract

This paper presents four algorithms for QoSensing (4TQS) and routing on dynamics Wireless Sensor Networks. Since many types of researches held on QoSensing improvement in terms of coverage and connectivity enhancement. In a WSN with a density of 120 static and 30 mobile nodes, the major power-consuming activities are mobility and communication. Such power constraint has a great effect on the node activities and the same network. We analyzed the occurrence of coverage holes which is, regions inside the area of interest that are void of operational nodes for sensing and/or routing purposes. 4TQS method shows clustering phase through neuro-fuzzy based affinity propagation NFAP, sleep scheduling phase with ESLS algorithm and the assist of coverage enhancement phase in which HAHP is involved. Routing phase and connectivity metrics are improved with DTMR algorithm. Involvement of four efficient algorithms results in improved QoSensing in WSN. We analyzed our proposed method in both Star and Mesh topology in order to evaluate the QoSensing metrics in both topologies. Our method shows promising results in QoSensing metrics or performance in dynamics WSNs.

Keywords

QoSensing, 4Tiers, Metrics, Coverage, Connectivity

Share and Cite:

Facebook Twitter LinkedIn YouTube

4TQS: Four Tiers OVER Quality of Sensing with Energy Improvement in Wireless Sensor Network

Luis Orlando Philco Asqui, Néstor A. Zamora Cedeño

Faculty of Technical Education for Development, Catholic University Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador

Email: luis.philco@cu.ucsg.edu.ec, nestor.zamora@cu.ucsg.edu.ec

How to cite this paper: Asqui, L.O.P. and Cedeño, N.A.Z. (2021) 4TQS: Four Tiers OVER Quality of Sensing with Energy Improvement in Wireless Sensor Network. *Int. J. Communications, Network and System Sciences*, 14, 95-118.
<https://doi.org/10.4236/ijcns.2021.147007>

Received: June 28, 2021

Accepted: July 28, 2021

Published: July 31, 2021

Copyright © 2021 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This paper presents four algorithms for QoSensing (4TQS) and routing on dynamics Wireless Sensor Networks. Since many types of researches held on QoSensing improvement in terms of coverage and connectivity enhancement. In a WSN with a density of 120 static and 30 mobile nodes, the major power-consuming activities are mobility and communication. Such power constraint has a great effect on the node activities and the same network. We analyzed the occurrence of coverage holes which is, regions inside the area of interest that are void of operational nodes for sensing and/or routing purposes. 4TQS method shows clustering phase through neuro-fuzzy based affinity propagation NFAP, sleep scheduling phase with ESLS algorithm and the assist of coverage enhancement phase in which HAHP is involved. Routing phase and connectivity metrics are improved with DTMR algorithm. Involvement of four efficient algorithms results in improved QoSensing in WSN. We analyzed our proposed method in both Star and Mesh topology in order to evaluate the QoSensing metrics in both topologies. Our method shows promising results in QoSensing metrics or performance in dynamics WSNs.

Keywords

QoSensing, 4Tiers, Metrics, Coverage, Connectivity

1. Introduction

When all nodes have the same hardware and capabilities, the network is homogeneous; otherwise, it is heterogeneous. Grouping of nodes within the network to facilitate or improve communication makes it hierarchical. In a flat network,

Producción científica 3

- Artículo: MiA-CODER: Aprendizaje de refuerzo habilitado por agentes multi-inteligentes para la detección y recuperación precisas de agujeros de cobertura en WSN con QoSensing basado en árboles de clústeres desiguales.
- Autores: Luis Orlando Philco A, Luis Marrone, E. Estupiñan.
- Fecha de publicación: Noviembre 2021
- Revista: Applied Sciences
- Editor: MDPI

Volumen:11

Numero:23

DOI: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/23/11134>

Article

MiA-CODER: A Multi-Intelligent Agent-Enabled Reinforcement Learning for Accurate Coverage Hole Detection and Recovery in Unequal Cluster-Tree-Based QoSensing WSN

Luis Orlando Philco ^{1,*}, Luis Marrone ^{2,*} and Emily Estupiñán ^{1,*}

¹ Faculty of Technical Education for Development, Catholic University Santiago de Guayaquil, Guayaquil 090101, Ecuador

² Faculty of Informatics, National University of La Plata, La Plata B1900, Argentina

* Correspondence: luis.philco@cu.sgu.edu.ec (L.O.P.); lmarrone@infinti.unlp.edu.ar (L.M.); emily.estupinan.chaw@gmail.com (E.E.)

Citation: Philco, L.O.; Marrone, L.; Estupiñán, E. MiA-CODER: A Multi-Intelligent Agent-Enabled Reinforcement Learning for Accurate Coverage Hole Detection and Recovery in Unequal Cluster-Tree-Based QoSensing WSN. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 11134. <https://doi.org/10.3390/app132311134>

Academic Editor:
Juan Francisco De Paz Santana

Received: 21 September 2023
Accepted: 22 November 2023
Published: 24 November 2023

Abstract: Coverage is an important factor for the effective transmission of data in the wireless sensor networks. Normally, the formation of coverage holes in the network deprives its performance and reduces the lifetime of the network. In this paper, a multi-intelligent agent enabled reinforcement learning-based coverage hole detection and recovery (MiA-CODER) is proposed in order to overcome the existing challenges related to coverage of the network. Initially, the formation of coverage holes is prevented by optimizing the energy consumption in the network. This is performed by constructing the unequal Sierpinski cluster-tree topology (USCT) and the cluster head is selected by implementing multi-objective black widow optimization (MolWo) to facilitate the effective transmission of data. Further, the energy consumption of the nodes is minimized by performing dynamic sleep scheduling in which Tsallis entropy enabled Bayesian probability (TE2BP) is implemented to switch the nodes between active and sleep mode. Then, the coverage hole detection and repair are carried out in which the detection of coverage holes if any, both inside the cluster and between the clusters, is completed by using the virtual sector-based hole detection (VSHD) protocol. Once the detection is over, the BS starts the hole repair process by using a multi-agent SARSA algorithm which selects the optimal mobile node and replaces it to cover the hole. By doing so, the coverage of the network is enhanced and better QoSensing is achieved. The proposed approach is simulated in NS 3.26 and evaluated in terms of coverage rate, number of dead nodes, average energy consumption and throughput.

Keywords: coverage enhancement; clustering; sleep scheduling; hole detection; hole recovery

Apéndice B: Artículos de conferencia

1. Artículo: “Analyzing And Improving Quality Of Sensing In Wireless Sensor Network”

Published in: IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), Valparaíso, Chile, 2019, pp. 1-7.

Autores: E. Palacios, Orlando Philco Asqui, L. Cordova, T. Bastidas.

DOI: [10.1109/CHILECON47746.2019.8987604](https://doi.org/10.1109/CHILECON47746.2019.8987604)

ISSN: 2166-0727

Días de la conferencia: 13-27 Nov. 2019

Lugar de la conferencia: Valparaíso, Chile

Fecha de indexación al IEEE Xplore: 10 February 2020

Electronic ISBN: 978-1-7281-3185-6

Editorial: IEEE XPLORE digital library

[IEEE.org](#) | [IEEE Xplore](#) | [IEEE-SA](#) | [IEEE Spectrum](#) | [More Sites](#) [SUBSCRIBE](#)

IEEE Xplore® [Browse](#) [My Settings](#) [Help](#) [Institutional Sign In](#)

[Conferences](#) > [2019 IEEE CHILEAN Conference ...](#)

Analyzing And Improving Quality Of Sensing In Wireless Sensor Network

Publisher: IEEE [Cite This](#) [PDF](#)

[Edwin F. Palacios Meléndez](#) ; [Luis O. Philco Asqui](#) ; [Luis S. Córdova](#) ; [Tomas G. Bastidas Cabrera](#) ; [Miguel A. Franco Bayas](#) [All Authors](#)

31 Full Text Views

Abstract	Abstract: Exponential growth of WSN introduces new requirement related to sensing efficiency which is named as Quality of Sensing (QoSensing). Many researches held on QoSensing improvement in terms of coverage and connectivity enhancement. But these works fail to provide balance between various QoSensing metrics. To address this problem, brief analysis of QoSensing metrics such as coverage, connectivity, delay, energy efficiency, and throughput is provided in this paper. Based on critical analysis, this paper presents an efficient Four Tier (4Tier) method which is comprised with following four phases: (i) clustering phase, (ii) sleep scheduling phase, (iii) coverage enhancement phase, and (iv) routing phase. In clustering phase, Neuro-Fuzzy based Affinity Propagation (NFAP) algorithm is involved to cluster sensor nodes in the network. Energy Efficient Sleep/Listen Scheduling (ESLS) algorithm is employed in sleep scheduling phase which results in enhanced energy efficiency. To overcome coverage problem in WSN, Hybrid Analytical Hierarchy Process (HAHP) is involved in third phase. In order to improve data transmission, Delay Tolerance Multipath Routing (DTMR) algorithm is incorporated in routing phase. Involvement of four efficient phases results in improved QoSensing in WSN. We analyzed our proposed 4Tier method in both Star and Mesh topology in order to evaluate the QoSensing metrics in both topologies. Our extended simulation result shows promising results in coverage rate, connectivity ratio, energy efficiency, delay, and throughput.	
Document Sections		
I. Introduction		
II. Related Works.		
III. Proposed Work		
IV. Experimental Evaluation		
VI. Conclusion		
Authors		
Figures	Published in: 2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)	
References	Date of Conference: 13-27 Nov. 2019	INSPEC Accession Number: 19353610
Keywords	Date Added to IEEE Xplore: 10 February 2020	DOI: 10.1109/CHILECON47746.2019.8987604
Metrics	► ISBN Information:	Publisher: IEEE
Media	Conference Location: Valparaíso, Chile	

I. Introduction

WSN is an emerging technology which probes world-wide interest towards it [1]. But resource constraints of sensor nodes affect the sensing quality of WSN. According to B.Wang et al [2], coverage and connectivity are the major constraints in QoSensing. High coverage and connectivity requires high delay and energy. Different QoSensing metrics are analyzed by various researchers in WSN [3], [4]. Here authors consider throughput, delay, energy consumption, connectivity, jitter, packet delivery ratio, and coverage as major performance metrics. These metrics are analyzed in different topologies such as star, mesh, tree etc. To enhance QoSensing in terms of coverage factor many research works such as Coverage Contribution Area (CCA) [5], Coverage Aware Sensor Automation (CASA)

2. Artículo: “The performance of QoS in wireless sensor networks”

Published in: 2019 14th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)

Autores: N. Zamora, Orlando Philco A, E. Estupiñan C.

DOI: [10.23919 / CISTI.2019.8760756](https://doi.org/10.23919/CISTI.2019.8760756)

ISSN: 2166-0727

Días de la conferencia: 19-22 June 2019

Lugar de la conferencia: Coimbra, Portugal

Fecha de indexación al IEEE Xplore: 15 July 2019

Editorial: IEEE XPLORE digital library

[IEEE.org](#) | [IEEE Xplore](#) | [IEEE-SA](#) | [IEEE Spectrum](#) | [More Sites](#) [SUBSCRIBE](#)

IEEE Xplore® [Browse](#) [My Settings](#) [Help](#) [Institutional Sign In](#)

[Conferences](#) > [2019 14th Iberian Conference ...](#)

The performance of QoS in wireless sensor networks

Publisher: IEEE [Cite This](#) [PDF](#)

Néstor Zamora Cedeño ; Orlando Philco Asqui ; Emily Estupiñan Chaw [All Authors](#)

83 Full Text Views

[Abstract](#)[Document Sections](#)[I. Introduction](#)[II. Wireless Sensor Networks](#)[III. AODV Protocol](#)[IV. Analysis in the NS-3 Simulator](#)[V. Results](#)[Show Full Outline](#)[Authors](#)[Figures](#)[References](#)[Keywords](#)[Metrics](#)

Abstract:

This research paper provides a brief description of the wireless sensor network and the protocol to be used. Through this technology, benefits are obtained that provide the sensor networks together with greater freedom when placing the sensors in the vicinity of the target. In wireless sensor networks, routing is a critical and important aspect. The work focuses on the performance of the quality of services in the wireless sensor network (WSN) under the AODV routing protocol. This document tries to characterize the AODV protocol by performing simulations in the NS3 (Network Simulator Version 3) program. In the simulations of the AODV protocol, a set of metrics that can be used for comparisons in different scenarios are shown. The main objective of this document will be to offer a suitable simulation environment to determine the operation of the protocol to be used in wireless sensor networks.

Published in: 2019 14th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)

Date of Conference: 19-22 June 2019	INSPEC Accession Number: 18866934
Date Added to IEEE Xplore: 15 July 2019	DOI: 10.23919/CISTI.2019.8760756
► ISBN Information:	Publisher: IEEE
Print on Demand(PoD) ISSN: 2166-0727	Conference Location: Coimbra, Portugal

I. Introduction

The wireless sensor networks (WSN) constitute a large variety of nodes organized in a cooperative network, which uses sensors in an area to monitor climatic conditions. These networks acquire an ease of expansion and their ability to repair themselves [1]. The development of wireless sensor networks was motivated by military applications such as surveillance on the battlefield [2]; Nowadays, these networks are used in many areas of industrial and civil

3. Artículo: "Analysis of the performance of wireless sensor networks with mobile nodes under the AODV protocol"

Publicado en: International Conference on Information Technology & Systems. ICITS 2020: Information Technology and Systems pp 255-264

Autores: N. Zamora, Orlando Philco Asqui, E. Estupiñan C.

e-book: Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC, volume 1137)

DOI: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-40690-5_25

Días de la conferencia: 5-7 Febrero 2020

Lugar de la conferencia: Bogotá, Colombia

Fecha de indexación: 31 de enero de 2020

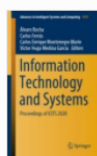
ISBN: 978-3-030-40689-9

ISBN en línea: 978-3-030-40690-5

Editorial: Springer, Cham



Search Home • Log in



[International Conference on Information Technology & Systems](#)
ICITS 2020: [Information Technology and Systems](#) pp 255-264 | [Cite as](#)

Analysis of the Performance of Wireless Sensor Networks with Mobile Nodes Under the AODV Protocol

Authors [Authors and affiliations](#)

Néstor Zamora Cedeño , Orlando Philco Asqui, Emily Estupiñan Chaw

Conference paper
First Online: 31 January 2020

734
Downloads

Part of the [Advances in Intelligent Systems and Computing](#) book series (AISC, volume 1137)

Chapter USD 29.95
Price excludes VAT (Ecuador)

- DOI: 10.1007/978-3-030-40690-5_25
- Instant PDF download
- Readable on all devices
- Own it forever
- Exclusive offer for individuals only
- Tax calculation will be finalised during checkout

[Buy Chapter](#)

> eBook USD 229.00

> Softcover Book USD 299.99

Abstract

Due to recent technological advances, the manufacture of tiny and low-cost sensors has become technically and economically feasible. The sensor electronics measure the environmental conditions related to the environment surrounding the sensor and transforms them into an electrical signal. The processing of such a signal reveals some properties on localized objects and/or events that occur in the vicinity of the sensor. Wireless sensor networks (WSN) contain hundreds or thousands of these network-connected sensor nodes that can communicate with each other or directly to an external base station. Currently there are countless areas where WSNs find application, with telemedicine, industrial process control and precision agriculture being some of the most relevant. In this work the fundamental theoretical aspects of this technology are studied, paying special attention to routing protocols. In addition, modeling and simulation of two network scenarios is performed using Y comparing two softwares, in a network simulator (NS-3) and Omnet++ together with the Castalia module to analyze their respective performances with and without mobility in the nodes, taking into account it counts the energy efficiency, the error rate of reception of the packets and the network load due to the AODV protocol.

Keywords

WSN AODV NS-3 OMNeT++ Castalia Protocol

4. Artículo “Evaluation of TEEN and APTEEN Hybrid Routing Protocols for Wireless Sensor Network Using NS-3”

Publicado en: International Conference on Information Technology & Systems. ICITS 2020: Information Technology and Systems. pp. 255-264

Autores: Orlando Philco A, Luis Marrone, E. Estupiñan C

e-book: Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC, volume 1137)

DOI: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-40690-](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-40690-5_56#citeas)

5 56#citeas

Días de la conferencia: 5-7 Febrero 2020

Lugar de la conferencia: Bogotá, Colombia

Fecha de indexación: 31 de enero de 2020

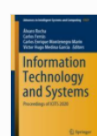
ISBN: 978-3-030-40689-9

ISBN en línea: 978-3-030-40690-5

Editorial: Springer, Cham



Search Home • Log in



International Conference on Information Technology & Systems
ICITS 2020: Information Technology and Systems pp 589-598 | [Cite as](#)

Evaluation of TEEN and APTEEN Hybrid Routing Protocols for Wireless Sensor Network Using NS-3

Authors Authors and affiliations

Orlando Philco Asqui , Luis Armando Marrone, Emily Estupiñan Chaw

Conference paper
First Online: 31 January 2020

746
Downloads

Part of the [Advances in Intelligent Systems and Computing](#) book series (AISC, volume 1137)

- Chapter USD 29.95
Price excludes VAT (Ecuador)
- DOI: 10.1007/978-3-030-40690-5_56
 - Instant PDF download
 - Readable on all devices
 - Own it forever
 - Exclusive offer for individuals only
 - Tax calculation will be finalised during checkout

[Buy Chapter](#)

- [eBook](#) USD 229.00
[Softcover Book](#) USD 299.99

Abstract

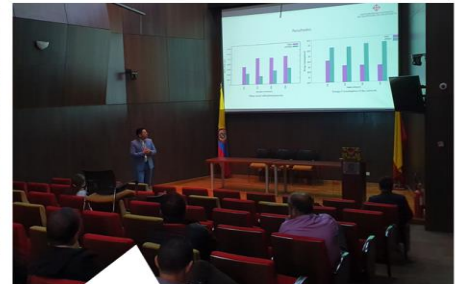
Wireless sensor networks (WSN) with hundreds or thousands of sensor nodes can collect information from a location and transmit the data to a particular user, depending on the application. These sensor nodes have some limitations due to their limited power, storage capacity and computing power. Data is routed from one node to another using different routing protocols. The position of the nodes can significantly affect the useful life of the network. The distribution of a non-uniform node (random location) in a certain area can cause many collisions between packets and therefore unbalanced traffic. Two routing protocols are evaluated; TEEN and APTEEN. As a methodology, the empirical method is used to simulate scenarios with high data traffic, as well as the analytical method to design the connection or topology that converges in energy efficiency. The result suggests that the routing protocol APTEEN in hierarchical cluster topology is the best efficiency in energy consumption.

Keywords

WSN Energy Ns-3 TEEN APTEEN QoS Efficiency

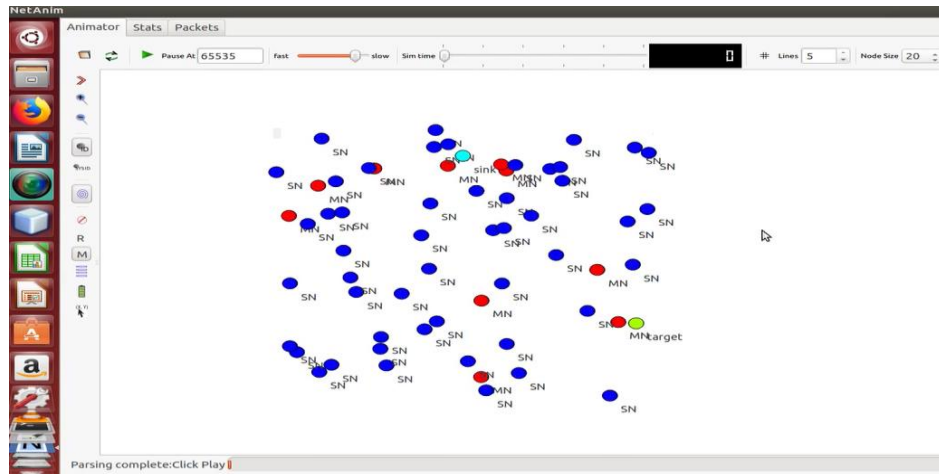
This is a preview of subscription content, [log in](#) to check access.

Ponencias Científicas

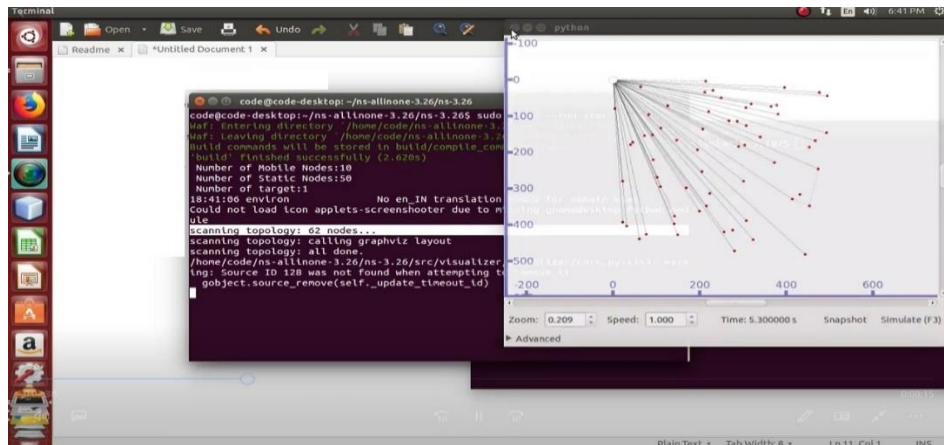


Apéndice C: Capturas en Network Simulator 3

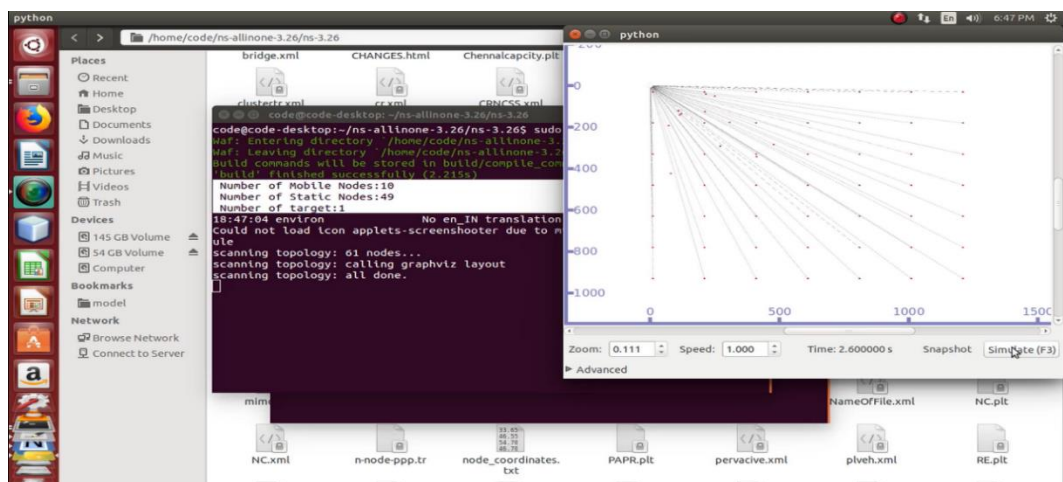
En topología Estrella existen 10 nodos móviles (color rojo), 49 nodos fijos (color azul), un nodo sink (color celeste) y se tiene el objetivo (color verde).



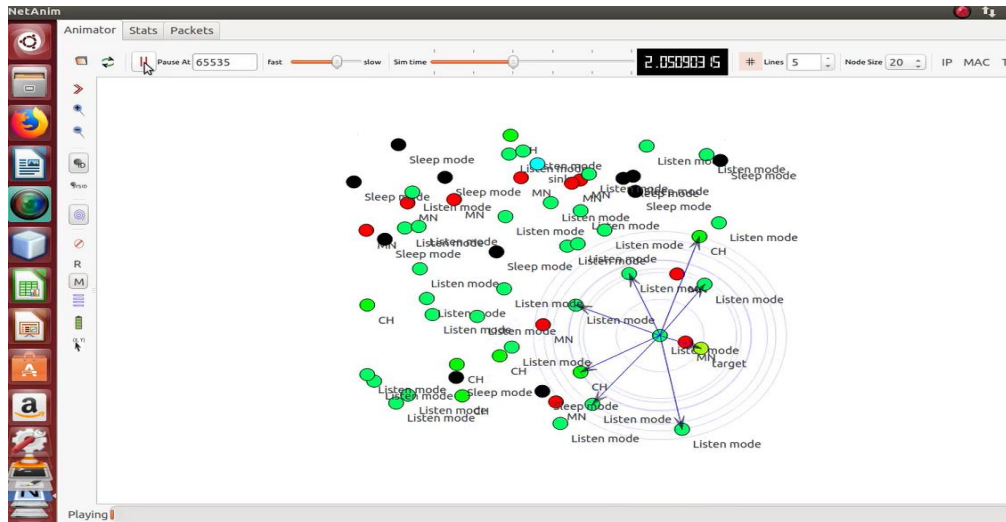
El simulador NS3.26 y netamin facilita un medio gráfico de simulación para topologías estrella y malla.



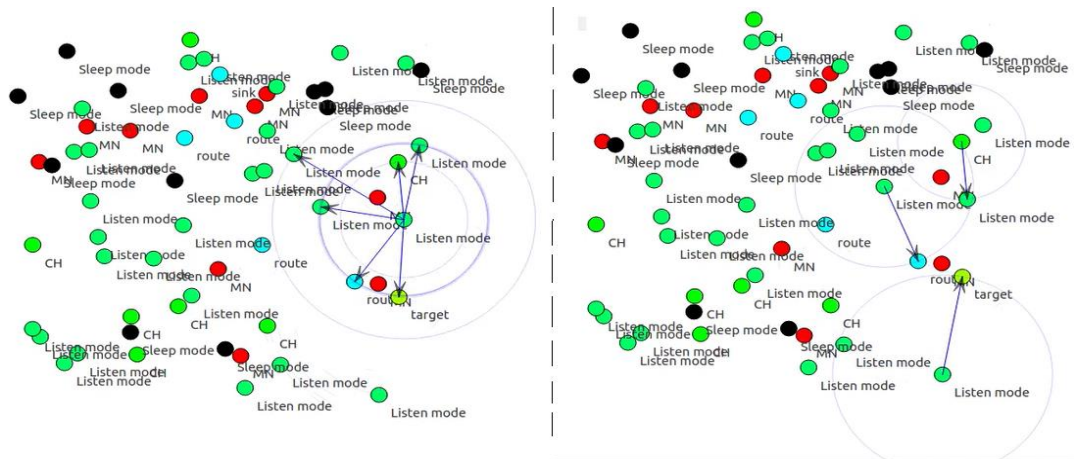
Desde consola se estructura el código para experimentar ambientes de sensado y comunicación.



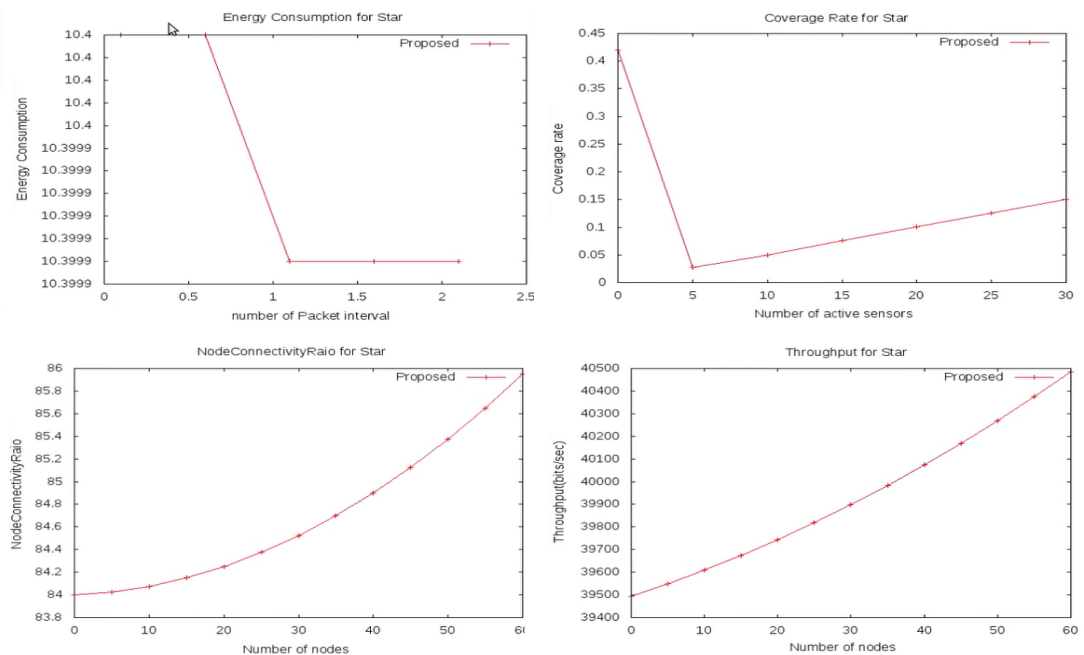
Escaneo de la topología estrella con 62 nodos



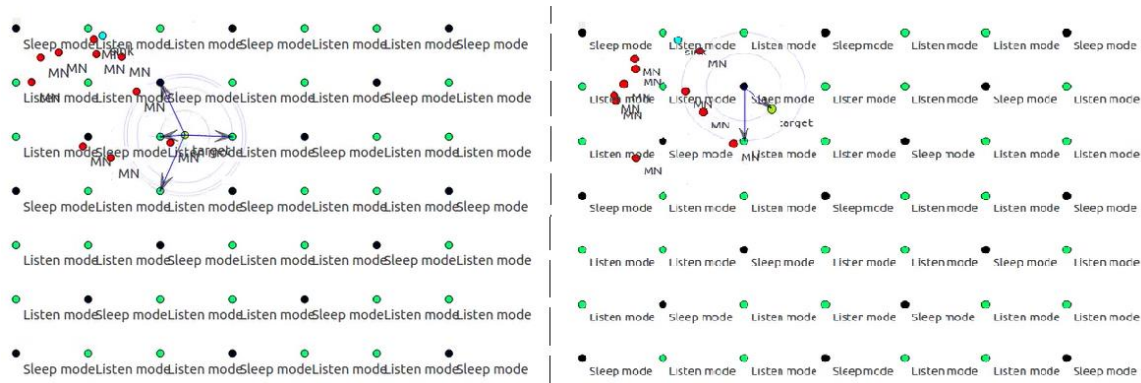
Nodos color negro están en modo sueño y color verde amarillo están activos



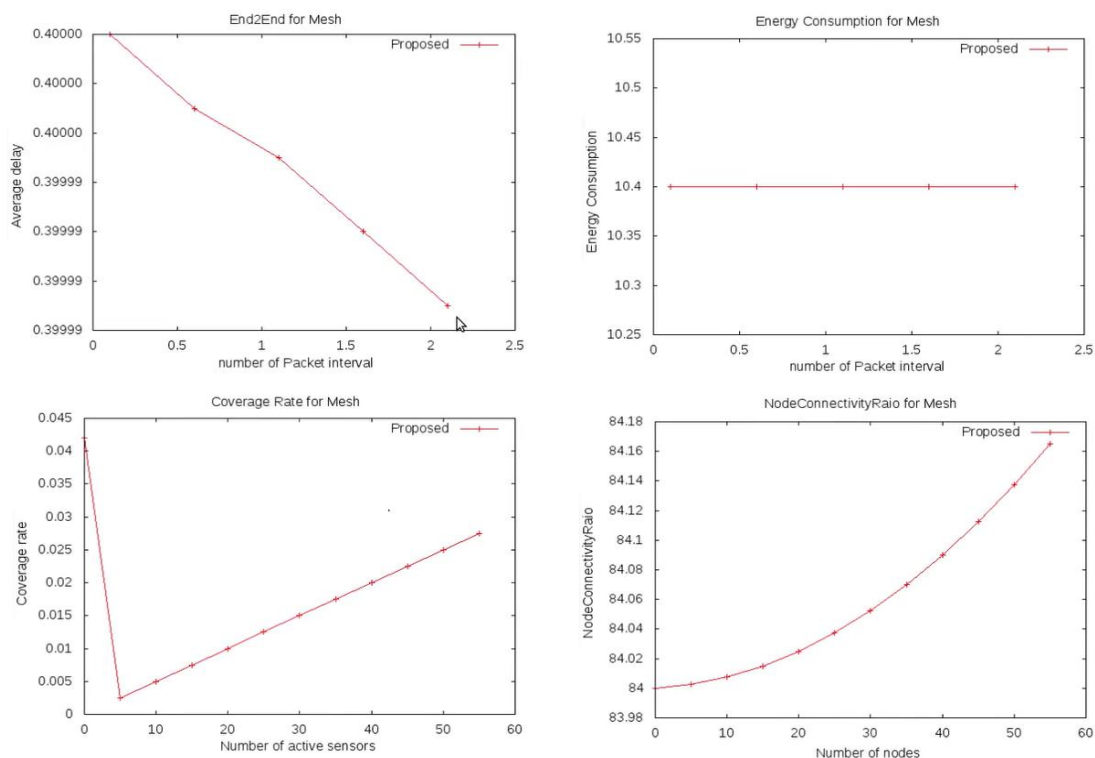
Todos los nodos de color celeste apuntan a sensor y enviar al sumidero la información



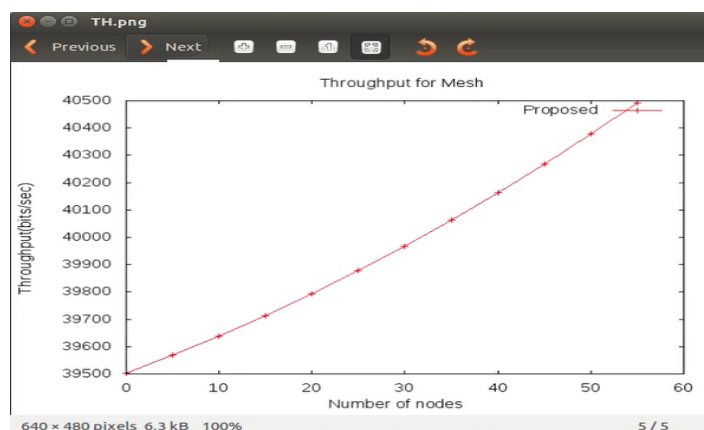
Gráficos de métricas en rendimiento 4Tier en topología estrella



Nodos color celeste apuntan a sensor y enviar al sumidero la información



Gráficos de métricas en rendimiento 4Tier en topología malla



Rendimiento de 4Tier en topología malla

Tabla de notaciones para el capítulo 5

Notations	Description	Notations	Description
V	Denotes the sensors deployed	df	Energy required for CH to perform aggregation
E	Connectivity of the nodes	$(CH - intra(en))$	Energy required for CH in intra cluster routing
p, q	Two sensor nodes in the network	$(CH - R_x - intra(en))$	Energy required for CH in reception of signals inside the cluster
TR	Range of transmission	$(CH - df - intra(en))$	Energy required for CH in aggregation of received signals from CM
c	Cluster comprising of p number of nodes	$(CH - inter(en))$	Energy required for CH in inter cluster routing
cp	Cluster center	$(CH - T_x - intra(en))$	Energy required for CH in transmission of signals between the clusters
$X_{N,i}$	Total number of nodes in the network for CH election	$(CH - CS - inter(en))$	Energy required for CH in sensing of signals
RE	Remaining energy	idle (en)	Energy required in idle state
$Tx(en)$	Energy required for transmission	a, b	Distance between two nodes in the cluster
$Rx(en)$	Energy required for reception	C	Capacity of the node referred in terms of buffer size.
k	Length of message bits.	CR	Current ratio
$\varepsilon_{ap}, \varepsilon_{sp}$	Power consumption of amplifier in two-hop	PM	Profit margins
en_{elec}	Signal processing	P(A)	Probability of

	energy		node being in active mode
CS (en)	Sensing cost	P(S)	Probability of node being in sleep mode
CM	Cluster members	R	Sum of evidence of the values of residual energy
Ty	Tsallis entropy index	E_{bn}	Energy boundary nodes