



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

Sistema de Posgrado

Maestría en Telecomunicaciones

Tema:

**“Incidencia del consumo energético en la calidad de servicio QoS
de una red del estándar IEEE 802.15.4”**

Autora:

Cindy Elizabeth Sisalema Rivera

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de
Magister en Telecomunicaciones

Tutor:

MSC. Manuel Romero Paz

Guayaquil, a los 13 días del mes de julio del 2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por la Ing. Cindy Elizabeth Sisalema Rivera, como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones.

Guayaquil, a los 13 días del mes de julio del 2020

TUTOR

MSc. Manuel Romero Paz

DIRECTOR DEL PROGRAMA

MSc. Manuel Romero Paz



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Cindy Elizabeth Sisalema Rivera

DECLARO QUE:

La Tesis “**Incidencia del consumo energético en la calidad de servicio QoS de una red del estándar IEEE 802.15.4**” previa a la obtención del Título de Magíster en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, a los 13 días del mes de julio del 2020

LA AUTORA

Sisalema Rivera, Cindy Elizabeth



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

AUTORIZACIÓN

Yo, Sisalema Rivera, Cindy Elizabeth

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución de la Tesis de Maestría titulada: **“Incidencia del consumo energético en la calidad de servicio QoS de una red del estándar IEEE 802.15.4”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 13 días del mes de julio del 2020

LA AUTORA

Sisalema Rivera, Cindy Elizabeth

REPORTE DE URKUND

The screenshot displays the URKUND interface. At the top left, the document information is as follows:

- Documento:** TI Cindy Sisalema.docx (015518801)
- Presentado:** 2020-06-14 15:11 (45:00)
- Presentado por:** Luis Córdoba Rivadeneria (lcordova@yahoo.com)
- Recibido:** luis.cordova.luz@analisis.urfkand.com

Below this, it states: "74% de estas 20 páginas, se componen de texto presente en 11 fuentes."

On the right side, there is a "Lista de Fuentes" (List of Sources) panel with the following entries:

- <http://www.google.com/...>
- tema+redes+de+sensores+reinales+tronicas_6r57U_1761104_Group4_Pedro+Sensores+Inala...
- TI-David@idone.pdf
- <http://tesis.loria.iesee.org/izarno/izarno.js?z=4&nombre=644467&numero=985>
- <http://bibliog.us.es/proyectos/abreproj/20408/fichero/Archivos/C294301deunuar...>

The main content area shows the following text:

Sistema de Posgrado Maestría en Telecomunicaciones Tema: "Incidencia del consumo energético en la calidad de servicio QoS de una red del estándar IEEE 802.15.4" Autora: Cindy Elizabeth Sisalema Rivera

Trabajo de titulación previa a la obtención del grado de Magister en Telecomunicaciones

Tutor: MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil, a los 2 días del mes de marzo del 2020

SISTEMA DE POSGRADO

CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por la Ing. Cindy Elizabeth Sisalema Rivera, como requerimiento parcial para la obtención del

Grado Académico de Magister en Telecomunicaciones.

Guayaquil, a los 2 días del mes de Marzo del 2020 TUTOR

_____ MSc. Manuel Romero Paz

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de estar en este mundo, en especial a mis padres Luis Sisalema Isa y Jenny Rivera Merejildo, que siempre han estado a mi lado con palabras de aliento y motivación evitando que decaiga y sobre todo brindándome su confianza y dándome consejos, A mi hermana: Lissett Sisalema Rivera, y a mi hija Jayden Álvarez, a todos los amigos, compañeros y personas que me apoyaron de una a otra manera, que fueron un apoyo fundamental en la elaboración de la presente tesis.

AGRADECIMIENTOS

Dios, tu amor y bondad no tienen fin me permite sonreír ante todos mis logros que son resultados de tu ayuda y cuando caigo y me pones a prueba, aprendo de mis errores y me doy cuenta lo pones frente mío para que mejore como ser humano y crezca de diversas maneras.

Este trabajo de tesis ha sido una gran bendición en todo sentido y le agradezco a mi padre celestial y no cesan mis ganas de decir que es gracias a ti que esta meta está cumplida.

Gracias por estar presente no solo en esta etapa tan importante de mi vida sino en todo momento ofreciéndome lo mejor para mi persona.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

MSc. Manuel Romero Paz

TUTOR

MSc. Manuel Romero Paz

DIRECTOR DEL PROGRAMA

MSc. Edgar Quezada Calle

REVISOR

MSc. Luis Córdova Rivadeneira

REVISOR

Resumen

Se estudia la incidencia del consumo energético de nodos típicos de una red de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network, WSN) y la calidad de servicio (Quality of Service, QoS) de una red del estándar IEEE 802.15.4. El modelo de comunicación adecuado debe garantizar la QoS necesaria (por ejemplo, la consistencia temporal y espacial de los datos de los sensores distribuidos para una correcta cooperación y coordinación de los nodos). La metodología empleada es bibliográfica por la recolección de fuentes científicas para elaborar un estado del arte actualizado del desempeño de las redes de sensores inalámbricos con calidad de servicio, también es pre-experimental por el manejo de un simulador para evaluar dos protocolos de enrutamiento tipo reactivo (DSR y AODV), enrutamiento vector-distancia o enrutamiento enlace-estado para aplicaciones en coberturas medianamente densas (redes de 300 y 500 nodos), cantidad promedio de sensores en el monitoreo de variables de interés para sectores de una ciudad. El resultado o aportación es la valoración de consumo energético y su efecto en métricas de desempeño de la QoS manipulando dos protocolos de enrutamiento reactivos. El simulador utilizado es NS-3.

Palabras clave: WSN, 802.15.4, QoS, AODV, Enrutamiento

Abstract

The incidence of energy consumption of typical nodes of a wireless sensor network (Wireless Sensor Network, WSN) and the quality of service (Quality of Service, QoS) of an IEEE 802.15.4 standard network are studied. The appropriate communication model must ensure the necessary QoS (for example, the temporal and spatial consistency of the distributed sensor data must be guaranteed for proper cooperation and coordination of the nodes). The methodology used is bibliographic for the collection of scientific sources to develop an updated state of the art of the performance of wireless sensor networks with quality of service, it is also pre-experimental for the use of a simulator to evaluate two reactive type routing protocols (DSR and AODV) vector-distance routing or link-state routing for applications in moderately dense coverage (networks of 300 and 500 nodes), average number of sensors in monitoring variables of interest to sectors of a city. The result or contribution is the assessment of energy consumption and its effect on performance metrics of the QoS by manipulating two reactive routing protocols. The simulator used is NS-3.

Keywords: WSN, 802.15.4, QoS, AODV, Routing

Índice General

Resumen	IX
Abstract	X
Índice General.....	XI
Índice de Figuras.....	XV
Índice de Tablas	XVII
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1 Introducción	2
1.2 Justificación	3
1.3 Planteamiento del Problema	3
1.4. Objeto de Estudio	3
1.5 Objetivos:.....	3
1.5.1 Objetivo General	3
1.5.2 Objetivos Específicos	4
1.6 Hipótesis	4
1.7 Metodología	4
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS DEL INTERNET DE LAS COSAS Y RED DE SENSORES INALÁMBRICOS.....	5
2.1 Ecosistema IoT.....	5
2.2 Estándar IEEE 802.15.4e.....	7
2.3 IEEE 802.11ah	9
2.4 WirelessHART	10
2.5 Z-Wave	11
2.6 Bluetooth de baja energía	11
2.7 ZigBee	11
2.8 Red de Sensores Inalámbricos	12

2.8.1 Elementos de WSN.....	13
2.8.2 Nodo de sensor	13
2.9 Infraestructura de las redes de sensores inalámbricas	14
2.9.1 Tipos de redes inalámbricas de sensores	16
2.9.2 Topologías de Red.....	19
2.9.2.1 Red en Estrella (Punto a multipunto).....	19
2.9.2.2 Redes en Malla	20
2.9.2.3 Redes de Árbol o Clúster	20
2.9.2.4 Topologías de Red Híbridas	21
2.9.3 Protocolos, Algoritmos y Estándares en las WSN	22
2.9.3.1 Últimas Tendencias.....	25
2.9.4 Aplicaciones en Redes Inalámbricas de Sensores.....	27
2.10 Operación de las redes de sensores inalámbricas.....	28
2.10.1 Requisitos de aplicación	31
2.11 Clasificación de los Protocolos de Enrutamiento	32
2.12 Red tipo Jerárquica.....	33
2.13 Centrado en Datos	33
2.13.1 Protocolos de Sensor para Información a través de Negociación (SPIN)	34
2.13.2 Iniciado en el Destino, Destination-initiated (Dst-initiated).....	35
2.13.3 Difusión Dirigida (DD, Directed Diffusion).....	35
2.13.4 Iniciado por la Fuente – Source initiated (Src initiated).....	35
2.14 Categorías de Protocolos de Enrutamiento.....	35
2.14.1 Protocolos de Enrutamiento basados en Descubrimiento de Ruta.....	36
2.14.1.1 Protocolos Reactivos.....	36
2.14.1.2. Protocolos Proactivos.....	37

2.14.1.3. Protocolos de Enrutamiento Híbrido	38
2.15 Protocolos de enrutamiento basados en organización de red	38
2.15.1 Topología Plana.....	38
2.15.2 Enrutamiento basado en la Jerarquía	38
2.15.3 Enrutamiento basado en la Ubicación (geocéntrico).....	39
2.16 Operación basada en Protocolos de Enrutamiento.....	39
2.16.1 Protocolo de Enrutamiento de Múltiples Rutas	39
2.16.2. Protocolo de Enrutamiento basado en Consultas	40
2.16.3. Protocolos de Enrutamiento basados en Negociación	40
2.16.4. Protocolos de Enrutamiento basados en QoS.....	40
2.16.5. Protocolo Coherente de Enrutamiento de Procesamiento de Datos ..	41
2.17 Desempeño de protocolos en redes móviles	41
2.17.1 Protocolos proactivos:	41
2.17.2 Protocolos reactivos:.....	42
2.18 Protocolo de vector de distancia (DV):	42
2.18.1 Protocolo de enrutamiento inalámbrico (WRP, Wireless Routing Protocol):	43
2.18.2 Procedimientos del protocolo de enrutamiento DSR	43
2.18.3 Procedimientos del protocolo de enrutamiento AODV:.....	44
2.19 Red WSN con calidad de detección	45
CAPÍTULO 3: MODELO DE ENRUTAMIENTO EN WSN.....	46
3.1 Nodos con recursos muy limitados:	46
3.2 Nodos con mayores capacidades.....	47
3.3 Estrategias de enrutamiento en WSN.....	51
3.4 Modelos de Reporte de Datos	52
3.4.1 Modelo basado en eventos	52

3.4.2 Modelo basado en tiempo	52
3.4.3 Modelo basado en requerimientos.....	53
3.4.4 Modelo híbrido	53
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE SIMULACIÓN DE RED WSN	54
4.1 NS-3	54
4.1.1 Diseño experimental	54
4.2 Resultados obtenidos.....	56
4.3 Indicador de Calidad de Servicio QoS	60
Conclusiones.....	61
Recomendaciones	63
Bibliografía.....	64
GLOSARIO	68

Índice de Figuras

Figura 2. 1 Ecosistema de IoT.....	6
Figura 2. 2 Protocolos para IoT.....	7
Figura 2. 3 Esquema de WirelessHart.....	10
Figura 2. 4 Red WSN y sus conexiones para aplicaciones de monitoreo típico ...	13
Figura 2. 5 Estructura de un nodo sensor típico	14
Figura 2. 6 Red de sensores básica	15
Figura 2. 7 Red de sensores de escala mayor	15
Figura 2. 8 Red en Estrella	19
Figura 2. 9 Red en Malla.....	20
Figura 2. 10 Red de árbol.....	21
Figura 2. 11 Topología híbrida estrella-malla	22
Figura 2. 12 Pila de protocolos de redes <i>ad-hoc</i>	23
Figura 2. 13 Pila de protocolos de redes <i>ad-hoc</i> de sensores.....	24
Figura 2. 14 Pila de protocolos de redes ZigBee.....	25
Figura 2. 15 Aplicaciones en Redes Inalámbricas de Sensores.....	28
Figura 2. 16 Nodo sensor en una estación base.....	28
Figura 2. 17 Arquitectura de red de Single-Hop	29
Figura 2. 18 Arquitectura de red Multi-Hop	30
Figura 2. 19 Arquitectura plana.....	30
Figura 2. 20 Arquitectura jerárquica.....	30
Figura 2. 21 Clasificación básica de los protocolos de enrutamiento.....	33
Figura 2. 22 Protocolo de enrutamiento SPIN	34
Figura 2. 23 Categorías de protocolos de enrutamiento.....	36
Figura 3. 1 Operación de Flooding en una WSN	46
Figura 3. 2 Esquema Red WSN con direccionamiento IP.....	48
Figura 3. 3 Esquema de datos de difusión dirigida.....	49
Figura 3. 4 (a) Basados en eventos (b), en tiempo (c), en requerimientos.....	52
Figura 4. 1 Instalación de NS-3.....	54
Figura 4. 2. Simulación con 200 Nodos.....	56
Figura 4. 3 Paquetes de control en movilidad de nodos con alta carga de tráfico.	58

Figura 4. 4 Tasa de entrega de paquetes en movilidad de nodos con alta carga de tráfico.....	59
Figura 4. 5 Tasa de entrega de paquetes con 3 niveles de carga	59

Índice de Tablas

Tabla 2. 1 Diversos tipos de redes de sensores	17
Tabla 2. 2 Diferencias entre WSN y redes <i>ad hoc</i> convencionales.	18
Tabla 4. 1 Resumen de parámetros de simulación	56
Tabla 4. 2 Número de paquetes de control en movilidad y densidad de nodo.....	57
Tabla 4. 3 Tasa de entrega de paquetes (%).....	58
Tabla 4. 4 Retraso de extremo a extremo (segundos) para la movilidad y densidad del nodo.....	60

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Se considera que las redes de sensores tienen una aplicación importante en la recolección, procesamiento y comunicación de información sobre variables de interés. Por ejemplo, información o datos sobre aspectos ambientales las cuales tienen un potencial sobresaliente para la investigación y la aplicación. Básicamente, las redes de sensores en procesos de la recopilación de datos para el monitoreo de las variables de interés afectan la calidad de servicio, cuando los paquetes de información se retransmiten en casos de pérdida de paquetes en el entorno de comunicación de la red

El parámetro de calidad de servicio en redes WSN (Wireless Sensor Networks) bajo el estándar IEEE 802.15.4, es vital para asegurar la comunicación confiable entre nodos, en una red de gran extensión, como es el caso de una ciudad, un bosque etc. El nodo sensor consume energía al retransmitir la información entre los diversos nodos de la red. Ahorrar o gestionar la energía entre la comunicación o el procesamiento de información entre los nodos de una red puede mejorarse por el uso de un protocolo de enrutamiento eficiente (Mostafaei, 2019).

La transmisión de datos con protocolo tipo multisalto para WSN, debido a la alta pérdida de paquetes y la eficiencia energética, requiere enlaces confiables para la entrega de datos de extremo a extremo. Los trabajos de enrutamiento de múltiples saltos actuales pueden proporcionar requisitos de QoS como confiabilidad y demora de extremo a extremo, pero sufren un costo de energía significativo (Zamora, Philco, & Estupiñan, 2019).

Una red de sensores está compuesta por una gran cantidad de nodos de sensores que están densamente desplegados dentro del fenómeno o muy cerca de él. La posición de los nodos del sensor no necesita ser diseñada o predeterminada. Esto permite el despliegue aleatorio en terrenos inaccesibles u operaciones de socorro en casos de desastre. Por otro lado, los nodos sensores están equipados con un procesador integrado. En lugar de enviar los datos sin procesar a los nodos responsables del procesamiento de información, utilizan sus capacidades de procesamiento para realizar cálculos simples localmente y transmitir solo los datos requeridos y parcialmente procesados (Rajkumar S. Deshpande, 2018).

1.2 Justificación

Las comunicaciones dentro de una red WSN por la necesidad de funcionar de manera autónoma y durante grandes periodos de tiempo aumenta el consumo de energía que limita la capacidad de procesamiento y transmisión de los datos y finalmente incide en la calidad de servicio. Por consiguientes es fundamental seleccionar un protocolo de enrutamiento eficiente en consumo de energía mientras la red de sensores se comunica y procesa datos dentro de una red WSN bajo estándar IEEE 802.15.4

1.3 Planteamiento del Problema

Existe la problemática de la calidad de servicio QoS en transmisión de datos en redes WSN que tienen como limitante la duración de sus baterías, y el cual se torna primordial cuando se pierden los paquetes o existen retardos en la red.

Las WSN del estándar IEEE 802.15.4 con sus nodos en el procesamiento de información (datos) y la transmisión de dicha información (paquetes) en el caso de monitorear variables de interés para una ciudad pueden tener pérdida de paquetes, este aspecto abraza la calidad de servicio de la red en general (incluye nodos sensores, coordinador, gateway) y es una medida comparativa de los paquetes que son exitosamente transmitidos y recibidos del número total de paquetes que fueron transmitidos.

1.4. Objeto de Estudio

Los protocolos de enrutamiento para red WSN del estándar IEEE 802.15.4.

Se definen las variables de investigación:

VI: Protocolo de enrutamiento

VD: Calidad de Servicio en red WSN

1.5 Objetivos:

1.5.1 Objetivo General

Evaluar la incidencia del consumo energético en la calidad de servicio utilizando protocolos de enrutamiento multisalto en una red IEEE 802.15.4 con 300 y 500 nodos.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los protocolos de enrutamiento en WSN.
- Estudiar modelo de enrutamiento para sistemas de red de área personal inalámbrica o del estándar IEEE 802.15.4
- Desarrollar simulaciones con una red inalámbrica con 300 y 500 sensores con criterio de QoS.

1.6 Hipótesis

El empleo de protocolos de enrutamientos multisalto con eficiencia energética puede asegurar la QoS en redes IEEE 802.15.4 con 300 y 500 nodos. El protocolo de enrutamiento AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) ayuda a mejorar la calidad de servicio minimizando el consumo energético de las baterías de los nodos en una red WSN.

1.7 Metodología

La Metodología a utilizar en el presente trabajo se fundamenta en una investigación con métodos y técnicas científicas:

Métodos empleados: Observación, Análisis, Discusión de resultados.

Técnicas empleadas para la Recolección de datos; Fichas de resúmenes, Tablas de Excel.

Se emplea el método empírico por cuanto se debe manejar el software Network Simulator 3 con usos de protocolos de enrutamiento tipo multisalto en redes de 300 y 500 nodos.

Se emplea también la metodología pre-experimental pues se debe modelar con el simulador de eventos discretos NS-3 con escenarios con tres niveles de tráfico (bajo, medio y alto) así también con densidad de nodos utilizando la topología estrella. El resultado o aportación de la evaluación se fundamenta en obtención de tres métricas de desempeño de red que forman una valoración del consumo energético y su efecto en la calidad de servicio QoS para una red del estándar IEEE802.15.4.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS DEL INTERNET DE LAS COSAS Y RED DE SENSORES INALÁMBRICOS

El Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT) está logrando despliegue para supervisión y control de variables de interés tanto en áreas de investigación científica, en sectores de una ciudad para supervisar factores del ambiente, de transportación, en industrias, en el mismo hogar, etc. La base tecnológica son la comunicación máquina a máquina (M2M, Machine to Machine) y los dispositivos inteligentes *plug-and-play* que se puedan implementar en cualquier entorno y que puedan comunicarse y colaborar con otros dispositivos. Esto se ha hecho factible solo con la evolución reciente del protocolo de internet (IP, Internet Protocol), los dispositivos de detección, análisis de *big data*, etc.

El IoT permite que cosas, o dispositivos que no sea una computadora, perciban, detecten, procesen o calculen y actúen permitiéndoles comunicarse y coordinar entre sí en la decisión. En otras palabras, permite que las cosas actúen de manera inteligente y tomen decisiones consensuadas que beneficien a muchas aplicaciones. Transforman objetos o sensores de observadores pasivos a computación activa, comunicando, colaborando y tomando decisiones críticas. Los protocolos llevan al IoT a ofrecer servicios muy importantes, sin embargo, introducen la necesidad de especialistas estándares y protocolos de comunicación para manejar los desafíos resultantes.

Un ejemplo del ecosistema IoT actualmente disponible son los hogares inteligentes, que están compuestos por sensores para controlar la temperatura, el calor y otra variable doméstica en los hogares. Estas aplicaciones impondrían nuevos desafíos y la necesidad de estándares para manejar la diversidad de aplicaciones y requisitos.

Existen organismos internacionales para difundir estándares de interoperabilidad como: Internet Engineering TaskForce (IETF), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y otras organizaciones de normalización.

2.1 Ecosistema IoT

El ecosistema IoT, como se muestra en la figura 2.1, consiste en un modelo de siete plazas: mercado, adquisición, interconexión, integración, análisis, aplicaciones y

servicios. En la plaza inferior, la capa de mercado sería el dominio de una red inteligente de energía (Smart grid), un hogar conectado o salud inteligente, etc. La segunda plaza consta de sensores y dispositivos inteligentes que pueden considerarse como el núcleo de la aplicación. El tipo y la distribución de los sensores varían, dependiendo de las aplicaciones deseadas. Ejemplos de tales sensores, son sensores de temperatura, humedad, medidores de servicios eléctricos o cámaras entre otros actuadores más.

La tercera plaza consiste en la interconexión que facilita la comunicación de los datos del sensor a un centro de datos o almacenamiento en la nube. Allí los datos se combinan con otros conjuntos de información conocidos, como datos geográficos, de población o económicos. Los datos combinados se analizan utilizando técnicas de aprendizaje automático y minería de datos. En el nivel de aplicación se necesitan: software de colaboración (aplicaciones o apps) y comunicación para habilitar aplicaciones distribuidas muy grandes. Tales paradigmas incluyen redes definidas por software (SDN, Software Defined Networking), arquitectura orientada a servicios (SOA, Service Oriented Architecture), etc. Finalmente, la plaza superior consta de servicios que resultan, como gestión de energía, salud, educación, transporte, etc. Se requiere seguridad y gestión para cada una de estas siete plazas que son integradas una encima de la otra.



Figura 2. 1 Ecosistema de IoT

Fuente: (Tara & Raj, 2017)

Se indica qué aplicaciones de WSN emplean las capas, de enlace de datos, de red y las capas de transporte/sesión. La capa de enlace de datos se conecta a elementos de IoT que podrían ser dos sensores o un sensor y dispositivo de puerta de enlace

que conecta un conjunto de sensores a internet. A menudo existe la necesidad de múltiples sensores para comunicarse y agregar información antes de llegar a Internet. Se han diseñado protocolos especializados para el enrutamiento entre sensores y son parte de la capa de red. Los protocolos de capa de sesión permiten la mensajería entre varios elementos del subsistema de comunicación IoT. Además, también se han desarrollado varios protocolos de seguridad y gestión para IoT como se muestra en la figura 2.2

Sesión	MQTT, SMQTT, CoRE, DDS, AMQP, XMPP, CoAP, IEC, etc.	Seguridad	Gestión
Red	Encapsulación 6LoWPAN, 6TISCH, 6Lo, etc. Ruteo RPL, CORPL, CARP	IEEE 1888.3, TCG, OAuth 2.0, SMACK, SASL, EDSA, ace, DTLS, Dice, etc.	IEEE 1905, IEEE 1451, TR-069, OMA-DM, LWM2M, IEEE 1377, IEEE P1828, IEEE P1856
Enlace de datos	WiFi, Bluetooth Low Energy, Z-Wave, ZigBee Smart, DECT/ULE, 3G/LTE, NFC, Weightless, HomePlug GP, 802.11ah, 802.15.4e, G.9959, WirelessHART, DASH7, ANT+, LTE-A, LoRaWAN, ISA100.11a, DigiMesh, WiMAX, etc.		

Figura 2. 2 Protocolos para IoT

Fuente: (Tara & Raj, 2017)

Varias organizaciones de normalización propusieron estándares para cubrir todas esas cinco capas. Entre ellos destacan IEEE, IETF e UIT. En términos generales, IEEE funciona principalmente en el enlace de datos, IETF trabaja en redes y varias organizaciones trabajan en la sesión, seguridad y gestión. Estos protocolos y muchos otros se enumeran en la figura 2.2. los protocolos de enlace de datos de IoT incluye la capa física (PHY) y protocolos de capa MAC que se combinan para la mayoría de los estándares.

2.2 Estándar IEEE 802.15.4e

Es un estándar de enlace de datos que se usa comúnmente en la capa MAC. El estándar especifica el formato de trama, encabezados, direcciones de destino y origen e identifica cómo se puede iniciar la comunicación entre los nodos. Los formatos de trama tradicionales utilizados en redes convencionales no son adecuados por la alimentación restringida de los dispositivos IoT. En 2008, se creó el estándar IEEE 802.15.4e para extender IEEE 802.15.4 y admitir baja comunicación de potencia. Utiliza sincronización de tiempo y salto de canal para permitir alta confiabilidad, comunicación de costos bajos en enlaces de datos de

IoT. Sus características de capa MAC específicas se pueden resumir de la siguiente manera.

Estructura de trama: IEEE define la programación y asignación del estado de los nodos en un momento en la estructura de trama específica 802.15.4e. Un nodo puede estar en estado de suspensión, transmisión o recepción. Al transmitir, envía sus datos y espera un acuse de recibo. Al recibir, el nodo enciende su radio antes de la hora de recepción programada, recibe los datos, envía un acuse de recibo, apaga la radio, entrega datos a las capas superiores y vuelve a dormir. En el modo de suspensión, el nodo apaga su sistema de radio para guardar, y almacena todos los mensajes que necesita enviar en la próxima oportunidad de transmisión.

- **Programación:** el diseñador puede definir el algoritmo de programación en función de las necesidades de la aplicación, sin embargo, ésta debe cumplir con los requisitos de movilidad y traspaso para ser aceptados por los estándares. La programación puede ser centralizada por un nodo administrador o coordinador que es responsable de construirla, informar a otros sobre ella y otros nodos solo seguirán la programación.

- **Sincronización:** la sincronización de nodos es necesaria para mantener la conectividad de los nodos con sus vecinos y la puerta de entrada. Se puede hacer a través de la sincronización basada en el reconocimiento o en la trama. En modo basado en acuses de recibo, los nodos que ya estaban en comunicación envían acuses de recibo como garantías de confiabilidad de que pueden usarse para mantener la conectividad también. En el modo basado en tramas, los nodos no se comunican y, por lo tanto, envían una trama vacía a intervalos predeterminados, aproximadamente 30 segundos.

- **Salto de canal:** se introdujo el salto de canal en IEEE802.15.4e para permitir el acceso por intervalos de tiempo al medio inalámbrico que utiliza el salto de canal con intervalo de tiempo (TSCH, Time Synchronized Channel Hopping). Requiere cambiar la frecuencia usando una secuencia aleatoria predeterminada que es arbitraria en longitud, pueden ir hasta 511 elementos y cubrir todo o un subconjunto de canales que están disponibles para la capa física. Los siguientes paquetes se envían en diferentes canales que siguen la secuencia especificada y, por lo tanto, en un patrón de salto pseudoaleatorio. Ésta introduce diversidad de frecuencia y reduce los efectos de interferencia y desvanecimiento de múltiples rutas. Además, aumenta

la seguridad, ya que cada salto puede ser una defensa contra ataques selectivos de interferencia.

- **Formación de red:** anunciar la red y solicitar unirse son dos requisitos importantes para cualquier protocolo MAC. En 802.15.4e, los nodos escuchan los comandos de difusión y al recibir al menos uno de esos comandos, puede enviar una solicitud de unión al dispositivo de difusión. En un sistema centralizado, la solicitud de unión se enruta al nodo coordinador y se procesa allí mientras que, en sistemas distribuidos, son procesados localmente. Una vez que un dispositivo se une a la red y es completamente funcional, la formación se desactiva y se activará nuevamente si recibe otra solicitud de unión.

2.3 IEEE 802.11ah

IEEE 802.11ah es la versión menos costosa de los estándares IEEE 802.11 que es liviana para cumplir con necesidades IoT. Los estándares IEEE 802.11 (también conocidos como Wi-Fi) son los estándares inalámbricos más utilizados en redes tradicionales. Han sido ampliamente adoptados para todos los dispositivos digitales, incluyendo computadoras portátiles, teléfonos inteligentes, tabletas, etc. Sin embargo, los estándares WiFi originales no son adecuados para aplicaciones IoT debido a su marco superior y alto consumo de energía. Por lo tanto, el grupo de trabajo IEEE 802.11 formó un grupo de trabajo para desarrollar el estándar 802.11ah que admite una comunicación de bajo consumo de energía, adecuada para sensores y motas (Park, 2016).

Las características de la capa MAC IEEE 802.11ah incluyen:

- **Trama de sincronización:** solo las estaciones válidas con información de canal válida pueden transmitir reservando el medio del canal. Una estación sabe que puede transmitir si recibe el paquete de campo de duración correctamente. Si no recibe la trama correctamente, debería esperar una duración llamada retraso de sonda, el cual puede ser configurado por los puntos de acceso en 802.11ah y transmitir una trama de sincronización al comienzo del ciclo de transmisión.

- **Intercambio eficiente de paquetes bidireccionales:** permite la comunicación tanto de enlace ascendente como de enlace descendente entre los puntos de acceso y los sensores son una característica de IEEE 802.11ah. Esta característica reduce

el consumo de energía ya que los sensores se irán a dormir tan pronto como terminen su comunicación.

- **Trama MAC corta:** IEEE 802.11ah reduce el tamaño de trama de 30 bytes en IEEE 802.11 tradicional a 12 bytes. Por lo tanto, la trama 802.11ah tiene mucho menos trama superior y es más adecuada para aplicaciones IoT.

- **Paquete de datos nulo:** los estándares 802.11 tradicionales tenían tramas de reconocimiento (ACK, acknowledgement) de 14 bytes sin datos. Dicha característica agregaría muchos gastos generales, especialmente para IoT. 802.11ah resuelve este problema introduciendo una pequeña señal, llamada preámbulo, que se usa en lugar de ACK y tiene un tamaño mucho menor.

- **Mayor tiempo de reposo:** como este estándar está diseñado para dispositivos con limitaciones de energía, permite un largo período de sueño y debe despertarse con poca frecuencia para intercambiar datos solamente.

2.4 WirelessHART

WirelessHART es un estándar de capa MAC que funciona además de IEEE 802.15.4 PHY y utiliza acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, Time Division Multiple Access) en su MAC. Utiliza algoritmos de codificación avanzados para cifrar mensajes y verificar la integridad. Por lo tanto, es más seguro y confiable que otros. Su arquitectura, como se muestra en la figura 2.3 consta de un administrador de red y otro de seguridad, una puerta de enlace para conectar la red inalámbrica a la red cableada, equipos wireless como dispositivos de campo, puntos de acceso, enrutadores y adaptadores.

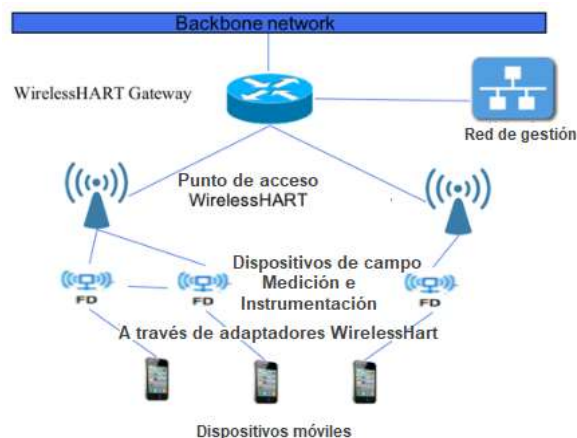


Figura 2. 3 Esquema de WirelessHart

Fuente: (CORDIS, 2013)

El estándar ofrece seguridad de extremo a extremo por los mecanismos que hacen cumplir la misma, desde las fuentes hasta los destinos mientras que los mecanismos por salto lo aseguran al siguiente salto solamente.

2.5 Z-Wave

El estándar MAC Z-Wave es de bajo consumo de energía, diseñado para la automatización del hogar, pero recientemente utilizado en muchas aplicaciones de IoT, incluidas las casas inteligentes y los pequeños dominios comerciales. Cubre hasta 30 medidores de distancia, comunicación punto a punto y es adecuado para mensajes pequeños. Utiliza CSMA/CA para acceso a los medios además de pequeños mensajes ACK para una transmisión confiable. Sigue una arquitectura maestro/esclavo en la cual el maestro controla a los esclavos, les envía comandos y maneja la programación de toda la red

2.6 Bluetooth de baja energía

Otro estándar de comunicación de corto alcance para la capa de enlace de datos que se usa ampliamente en IoT, es Bluetooth low energy o Bluetooth inteligente. Se utiliza principalmente en redes de vehículos. Tiene una latencia pequeña que es 15 veces menor que los estándares Bluetooth originales. Su baja energía puede alcanzar diez veces menos que el Bluetooth clásico. Su control de acceso utiliza un MAC sin contención con baja latencia y transmisión rápida. Adopta una arquitectura maestro/esclavo y ofrece dos tipos de marcos: publicitarios y de datos. El marco publicitario se utiliza para el descubrimiento y es enviado por esclavos en uno o más canales de publicidad dedicados. Los nodos maestros detectan los canales de publicidad para encontrar esclavos y conectarlos. Después de la conexión, el maestro le dice al esclavo que es el ciclo de vigilia y la secuencia de programación. Los nodos generalmente están despiertos solo cuando se están comunicando y de lo contrario, se van a dormir para ahorrar energía.

2.7 ZigBee

ZigBee es uno de los estándares más utilizados en IoT, se dedica a la comunicación de medio alcance en hogares inteligentes, controles remotos y sistemas de salud. Sus topologías de red incluyen estrella, punto a punto o cluster-tree. Un coordinador controla la red y está ubicado en el centro en una topología en estrella, la raíz de un árbol o topología de clúster y en cualquier parte de la topología de igual a igual.

El estándar ZigBee define dos perfiles de pila: ZigBee y ZigBee Pro. Estos perfiles de pila admiten redes de malla completa y funcionan con diferentes aplicaciones que permiten implementaciones con poca memoria y potencia de procesamiento. ZigBee Pro ofrece más funciones que incluyen seguridad mediante el intercambio de claves simétricas, escalabilidad mediante la asignación de direcciones estocásticas y un mejor rendimiento mediante el uso eficiente de mecanismos de enrutamiento.

2.8 Red de Sensores Inalámbricos

Una red de sensores es una estructura que consta de sensores, unidades computacionales y elementos de comunicación con el propósito de registrar, observar y reaccionar a un evento o fenómeno. Si el sistema de comunicación en una red de sensores se implementa utilizando un protocolo inalámbrico, las redes se conocen como redes de sensores inalámbricas o simplemente WSN.

Una red WSN como entidad es una tecnología importante para el siglo XXI. Los desarrollos recientes en sensores MEMS (Microelectromechanical Systems, Sistema Micro Electromecánico) y los componentes en miniatura, las antenas reconfigurables miniaturizadas y los sistemas integrados en paquetes (SiP, Session Initiation Protocol) rentables, los sistemas en chip (SoC, System on Chip) de radio basados en MEMS y de consumo ultra bajo, el procesamiento de señales de sensores y protocolos de comunicación flexibles, pueden implementarse en un área amplia y pueden interconectarse a través de enlaces inalámbricos e Internet para diversas aplicaciones civiles y militares (CORDIS, 2013).

Una red de sensores inalámbricos consta de nodos de sensores como se verá más adelante, que se implementan en alta densidad y, a menudo, en grandes cantidades y admiten sensores, procesamiento de datos, informática integrada y conectividad.

Los eventos pueden estar relacionados con cualquier cosa como el mundo físico, un entorno industrial, un sistema biológico o un marco de TI (Tecnología de la Información), mientras que el organismo de control u observación puede ser una aplicación de consumo, gobierno, civil, militar o una entidad industrial.

Dichas redes de sensores se pueden usar para teledetección, telemetría médica, vigilancia, monitoreo, recolección de datos, etc. En la figura 2.4 se muestra el

esquema de la WSN y sus aspectos de conectividad con internet relacionando procesamiento, almacenamiento, minería de datos y su respectivo análisis.

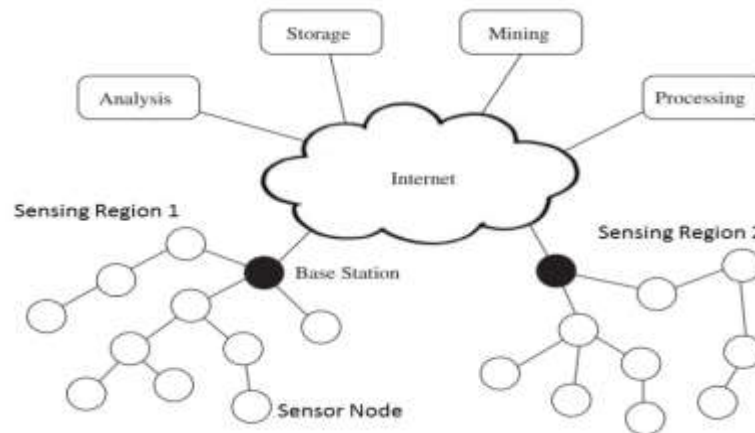


Figura 2. 4 Red WSN y sus conexiones para aplicaciones de monitoreo típico

Fuente: (Ravi, 2019)

2.8.1 Elementos de WSN

Una red de sensores inalámbricos típica se puede dividir en dos elementos. Son:

- Nodo de sensor
- Red de arquitectura

2.8.2 Nodo de sensor

Un nodo de sensor en un WSN consta de cuatro componentes básicos:

- Fuente de alimentación
- Sensor
- Unidad de procesamiento
- Sistema de comunicación

El sensor recopila los datos analógicos del mundo físico y un ADC (Analog-to-Digital Converter) los convierte a digitales. La unidad de procesamiento principal, que generalmente es un microprocesador o un microcontrolador, realiza un procesamiento y manipulación de datos inteligentes.

El sistema de comunicación consiste en un sistema de radio, generalmente una radio de corto alcance, para la transmisión y recepción de datos. Como todos los componentes son dispositivos de baja potencia, se utiliza una batería pequeña como CR-2032 para alimentar todo el sistema. Véase la figura 2.5

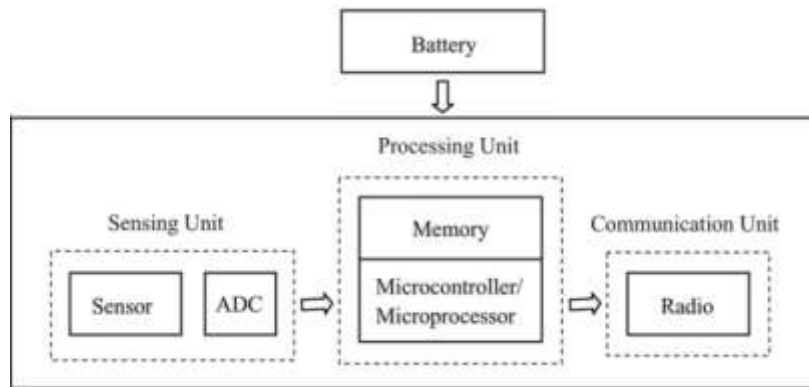


Figura 2. 5 Estructura de un nodo sensor típico

Fuente: (Ravi, 2019)

A pesar del nombre, un nodo de sensor consiste no solo en el componente de detección, sino también en otras características importantes como las unidades de procesamiento, comunicación y almacenamiento. Con todas estas características, componentes y mejoras, un nodo de sensor es responsable de la recopilación de datos del mundo físico, análisis de red, correlación de datos y fusión de datos de otro sensor con sus propios datos.

2.9 Infraestructura de las redes de sensores inalámbricas

Una red inalámbrica de sensores funciona sin infraestructura física alguna, consiste de dispositivos distribuidos, espacialmente y autónomos, utilizando nodos de sensores para monitorizar condiciones físicas o ambientales. Las redes inalámbricas de sensores pueden contar con cientos de nodos, los cuales tienen la capacidad de comunicarse entre ellos utilizando señales de radio. Un sistema WSN incorpora una puerta de entrada o salida (gateway) que provee conectividad inalámbrica hacia la infraestructura cableada.

El protocolo inalámbrico que se seleccione depende de los requerimientos de la aplicación. Algunos de los estándares disponibles incluyen radiofrecuencias de 2.4 GHz basados en el estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee, Wireless HART, etc.) o IEEE 802.11 (Wi-Fi) o radio frecuencias propietarias, los cuales son normalmente de 900 MHz, entre otros (Vázquez, 2014). Véase un esquema de red básico de WSN en la figura 2.6.



Figura 2. 6 Red de sensores básica
Fuente: (Villalba, 2015)

No obstante, en la mayoría de las aplicaciones a gran escala, se tienen nodos de sensores dispersos en un campo de monitorización y cada uno de estos nodos de sensores tiene la capacidad para recopilar datos y encaminarlos hacia un nodo recolector y los usuarios finales (Capella, 2010).

Se debe indicar que cuando se implementan redes de gran escala, los nodos están distribuidos al azar o éstos son móviles la configuración manual deja de ser una solución. Por consiguiente, en el escenario de monitorización a gran escala, los datos son enviados de vuelta al usuario final por medio de múltiples “saltos” de un nodo a otro, atravesando la red, hasta llegar a un nodo recolector. Este nodo se puede comunicar con el nodo gestor de tareas a través de Internet o vía satélite. Véase la figura 2.7.

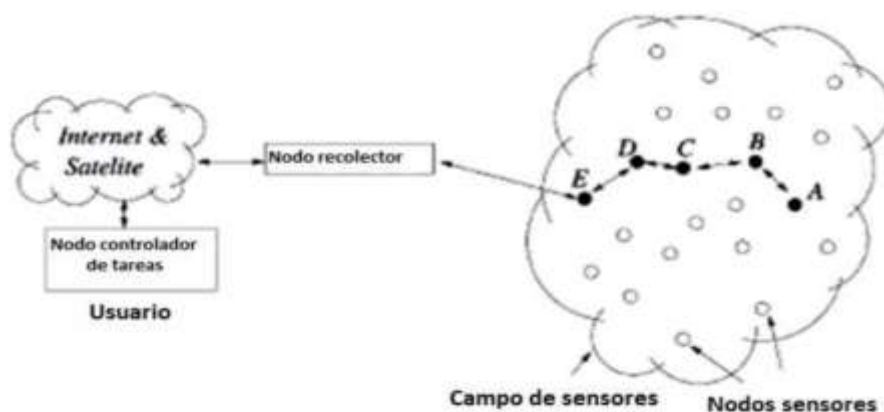


Figura 2. 7 Red de sensores de escala mayor
Fuente: (Villalba, 2015)

En sistemas alimentados con batería, las altas tasas de transmisión de datos y un uso frecuente de radio transmisiones consumen mayor energía. Por lo que es

fundamental observar detalles como tiempo de vida y materiales directos de la batería. En la última década, esto ha llevado a los investigadores a un constante desarrollo de sistemas, algoritmos y la subsecuente estandarización de sistemas de bajo consumo energético. En la actualidad, muchos de los sistemas WSN están basados en tecnologías como ZigBee o Hart Inalámbrico debido a las ventajas que presentan con respecto al bajo consumo de potencia en su funcionamiento y ancho de banda (Vázquez, 2014).

2.9.1 Tipos de redes inalámbricas de sensores

La estructura de una red inalámbrica de sensores incluye diferentes topologías de comunicación por radiofrecuencia. De acuerdo con la distancia entre los nodos de los sensores y la estación base, las redes inalámbricas de sensores pueden ser de salto único (también conocido como no propagantes) o sistemas de saltos múltiples (propagación múltiple). Cuando se habla de redes de gran escala donde los nodos están distribuidos al azar o éstos son móviles la configuración manual deja de ser una solución.

En estos casos, los nodos intermedios funcionarán para encaminar los datos, además dichos nodos intermedios podrán agregar sus propios datos. Las redes de salto único tienen una estructura y control mucho más simple y pueden ser implementadas en aplicaciones donde las áreas de detección sean pequeñas; las redes de saltos múltiples son utilizadas en aplicaciones más amplias y de mayor complejidad.

En base a la cantidad de nodos y dependencia de datos, las WSN pueden ser clasificadas como sistemas de agregación y sin agregación. En redes densamente distribuidas, los nodos están situados cerca unos de otros. Por lo tanto, la información de varias fuentes podría estar altamente correlacionada y funciones de agregación pueden ejecutarse en los nodos intermedios para eliminar redundancia de datos. De esta manera, se reduce el gasto de energía y la carga de tráfico en el sistema total. Sin embargo, los nodos intermedios realizarán funciones de cálculo, que pueden requerir de mayores recursos. Igualmente, el esquema de agregación es una opción adecuada en los sistemas a gran escala, con nodos de sensores distribuidos de forma masiva.

En los sistemas sin agregación, los datos de cada nodo serán enviados al destino tal como los generó el transmisor original. La carga computacional en los nodos intermedios es relativamente pequeña y el sistema puede alcanzar una alta precisión. Sin embargo, la carga de tráfico total del sistema puede aumentar rápidamente conforme aumenta el tamaño de la red, se consumirá más energía y se producirán más colisiones y congestión, lo que originará un tiempo de latencia alto. Por lo tanto, este esquema es adecuado para sistemas pequeños.

Las WSN pueden ser deterministas o dinámicas, según estén distribuidos los nodos. En sistemas deterministas, las posiciones de los nodos sensores están fijas o planificadas de antemano. El control de este sistema es más simple y su aplicación es más sencilla. Por tanto, en muchos casos, las ubicaciones de los nodos de sensores no están disponibles a priori. Sin embargo, los nodos sensores deben trabajar de manera dinámica. El esquema dinámico es más escalable y flexible, pero requiere de algoritmos de control más complejos (Riva, 2015).

Por otra parte, con base en sus esquemas de control, las WSN pueden ser no autoconfigurables o autoconfigurables. En el primer caso, los nodos sensores no son capaces de organizarse por sí mismos, sino que dependen de un controlador central. El esquema sólo se puede utilizar en redes de pequeña escala. Sin embargo, en la mayoría de las redes inalámbricas de sensores, los nodos sensores pueden mantener la conectividad por sí mismos. Este esquema de autoconfiguración encaja mejor en sistemas de gran escala para llevar a cabo tareas complejas de supervisión, recolección y difusión de información (Montoya & Ovalle, 2012).

En la tabla 2.1 se muestran los diversos tipos de redes de sensores dependiendo de diversos factores:

Tabla 2. 1 Diversos tipos de redes de sensores

Factores	Grupos distintivos
Distancia a la estación base	Salto único vs. saltos múltiples
Dependencia de datos	Sin agregación vs. con agregación
Distribución de sensores	Determinista vs. dinámica
Esquema de control	Autoconfigurable vs. no autoconfigurable

Fuente. La autora

Cabe mencionar que la mayoría de las WSN utilizan una arquitectura de red *ad hoc*, con nodos móviles y autoconfigurables, o sea capaces de formar una red sin la ayuda de infraestructuras establecidas. Los nodos móviles manejan el control

necesario y tareas de red de manera distribuida. En cambio, la arquitectura ad hoc es muy atractiva para redes de sensores por varias razones:

- ❖ Una arquitectura ad hoc supera las dificultades planteadas por los ajustes predeterminados de estructura de las otras familias WSN; como así también pueden ser rápidamente desplegadas al azar y reconfiguradas, según se agreguen nuevos nodos, en caso de fallas en los existentes sin afectar a la funcionalidad de los demás nodos.
- ❖ Las redes *ad hoc* pueden adaptarse fácilmente a aplicaciones específicas.
- ❖ Esta arquitectura es muy resistente a fallas en los nodos y ofrece un alto nivel de tolerancia, debido a la redundancia de los nodos y su naturaleza distribuida.
- ❖ Se puede lograr una gran eficiencia energética a través del enrutamiento de saltos múltiples. Es fácil demostrar que el consumo de energía debido a la transmisión de la señal es menor en varios órdenes de magnitud con múltiples saltos de encaminamiento a corta distancia, en lugar de un solo salto de largo alcance a un mismo destino.
- ❖ Las redes *ad hoc* tienen la ventaja de la reutilización de ancho de banda, que también se beneficia del punto anterior.

A continuación, la tabla 2.2 resume las principales diferencias entre los dos tipos de redes.

Tabla 2. 2 Diferencias entre WSN y redes *ad hoc* convencionales.

	WSN	Redes <i>ad hoc</i> convencionales
Número de nodos	Alto; cientos o inclusive miles de nodos	moderado
Redundancia de datos	Alta	Baja
Alimentación eléctrica	No recargable, baterías difícilmente reemplazables	Recargable o con baterías fácilmente sustituibles
Velocidad de transmisión	Baja; 1–100kb/s	Alto
Movilidad de los nodos	Baja	Pueden ser dinámicas
Dirección del flujo de datos	Predominantemente unidireccional; De nodos sensores a estación base	Bidireccional
Envío de paquetes	De muchos a uno; datos centralizados	Dirección céntrica punto a punto
Diseminación de	Difusión (broadcast) o por saltos	Salto por salto o difusión

datos		
Direccionamiento	ID globalmente variado	ID globalmente único
Ciclo de trabajo activo	Podría ser tan bajo como 1%	Alto

Fuente. La autora

Es importante mencionar que la mayoría de la literatura existente para las WSN está basada en arquitecturas de saltos múltiples y *ad hoc*. Sin embargo, debido a los requisitos de aplicaciones únicas, las redes inalámbricas de sensores difieren en gran medida de las redes inalámbricas *ad hoc* convencionales. Como resultado, las arquitecturas de red existentes *ad hoc* y sus protocolos no pueden aplicarse directamente a las redes de sensores.

2.9.2 Topologías de Red

A continuación, se muestra un breve análisis de las topologías; como así también de protocolos, arquitecturas de sistemas y algoritmos, generalmente implementados en las redes inalámbricas de sensores.

2.9.2.1 Red en Estrella (Punto a multipunto)

La red en estrella, es una topología de comunicaciones en donde una sola estación base puede enviar o recibir mensajes a un grupo de nodos. Los nodos remotos no se les permite enviar mensajes entre sí. Las ventajas en el uso de esta topología para redes inalámbricas de sensores son su simplicidad y capacidad para mantener el consumo de energía del nodo a un mínimo (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam, & Cay, 2002).

La desventaja de este tipo de red es que la estación base debe estar dentro del alcance de transmisión de todos los nodos individuales, aparte de no ser robusta, como otras redes, debido a su dependencia de un único nodo para gestionar la red (Véase la figura 2.8).

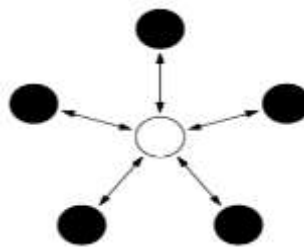


Figura 2. 8 Red en Estrella
Fuente: (CORDIS, 2013)

2.9.2.2 Redes en Malla

La red en malla permite la transmisión de datos de un nodo a otro, siempre y cuando esté dentro de su alcance de transmisión. Es decir, se trata de una comunicación de saltos múltiples. Esta topología de red tiene como ventajas la redundancia y la escalabilidad.

Si un nodo individual falla, otro nodo todavía tendrá la capacidad de comunicarse con el resto de los elementos de la red, que a su vez, podrán reenviar el mensaje a la ubicación deseada. Permite agregar nodos nuevos fácilmente.

La desventaja de este tipo de red es en un consumo mayor de energía en los nodos que implementan comunicaciones de saltos múltiples, en comparación con los nodos que no tienen esta capacidad, limitando así la vida útil de la batería. Al mismo tiempo, como el número de saltos para la comunicación de un destino aumenta, el tiempo para entregar el mensaje también aumenta. En la figura 2.9 se puede observar una red en malla. (Vázquez, 2014)



Figura 2. 9 Red en Malla
Fuente: (Montoya & Ovalle, 2012)

2.9.2.3 Redes de Árbol o Clúster

Para aumentar la distancia que una red puede cubrir, se puede implementar una topología de árbol. En esta arquitectura, cuya complejidad es mayor respecto a las anteriores, cada nodo mantiene una sola trayectoria de comunicación directa al *gateway*, pero puede usar otros nodos para encaminar sus datos a esa trayectoria.

Esta topología presenta un problema de consideración. Si el nodo que encamina falla, todos los nodos que dependen de éste también pierden sus trayectorias de comunicación con el *gateway*. En la figura 2.10 puede ver una red de árbol (Vázquez, 2014).

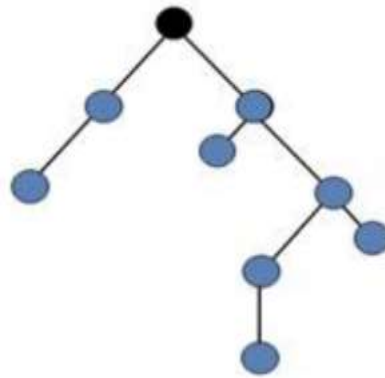


Figura 2. 10 Red de árbol
Fuente: (CORDIS, 2013)

2.9.2.4 Topologías de Red Híbridas

Dado que, en algunas ocasiones, los requerimientos de diseño de una red de sensores demandan la implementación de arquitecturas muy complejas, ya sea por ciertas necesidades en ingeniería a cubrir o por la flexibilidad de los equipos de última generación. Se puede recurrir al uso de las topologías antes mencionadas, cuya combinación suma las ventajas de cada una de éstas. A continuación, en la figura 2.8 se muestra una topología híbrida estrella-malla.

Un híbrido entre las redes de estrella y malla, proporciona un arreglo extremadamente robusto y versátil, manteniendo el consumo de energía de los nodos en un mínimo. En esta topología de red los nodos de sensores con el nivel de energía más bajo no se habilitan con la capacidad de reenviar mensajes. Así, se mantiene un consumo mínimo de energía. Sin embargo, otros nodos de la red están habilitados con la capacidad de saltos múltiples, lo cual permite reenviar los mensajes de los nodos de bajo nivel de energía a otros nodos de la red (Vázquez, 2014).

En general, los nodos con capacidad de saltos múltiples, consumen mayor energía por lo que de ser posible serán conectados a la línea de alimentación eléctrica o se les proveerá de baterías de mayor capacidad. Como ejemplo, ésta es la topología implementada por el estándar ZigBee.

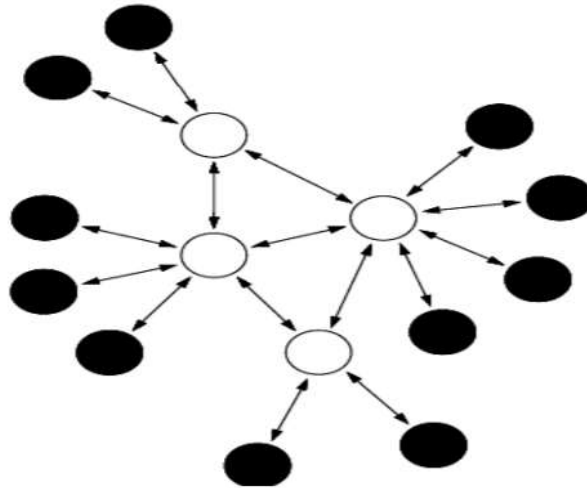


Figura 2. 11 Topología híbrida estrella-malla
Fuente: (CORDIS, 2013)

En este sentido, durante la búsqueda constante de mejoras en el desempeño y tiempo de vida de las WSN, se han realizado esfuerzos por crear protocolos de encaminamiento “conscientes” del consumo de energía en la red, de modo tal que se adapten a dicha situación. Existen diferentes alternativas como la Jerarquía de Agrupamiento Adaptativo con Bajo Consumo de Energía (LEACH, Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) o el Protocolo de Sensores para la Obtención de información por Negociación (Sensor Protocol for Information via Negotiation, SPIN).

El primero incluye información del grupo (clúster) de sensores y elige algunos nodos aleatoriamente. Éstos procesarán localmente la información, para reducirla globalmente y enviar la información al nodo recolector. Al rotar esta función se distribuye el consumo de energía entre los nodos de la red.

Por otro lado, el enfoque de SPIN es el de encaminar la información a través de una WSN de manera eficiente, mediante la negociación de datos descriptivos de un paquete (considerablemente más pequeños) antes de enviar el paquete en sí. Además, accede a la información de los niveles de energía de los nodos y adapta el protocolo basado en la cantidad de batería restante.

2.9.3 Protocolos, Algoritmos y Estándares en las WSN

El diseño tradicional de los protocolos de una red inalámbrica *ad hoc*, se basa principalmente en una pila de capas, tal como se muestra en la figura 2.12. Este modelo de capas hace una contribución significativa a la simplificación del diseño

de la red. Por consiguiente, la estructura de capas produce protocolos robustos y escalables. Sin embargo, el diseño y el funcionamiento de cada capa en la pila están aislados, y la interfaz entre capas es estática e independiente de las restricciones de red y las aplicaciones individuales.

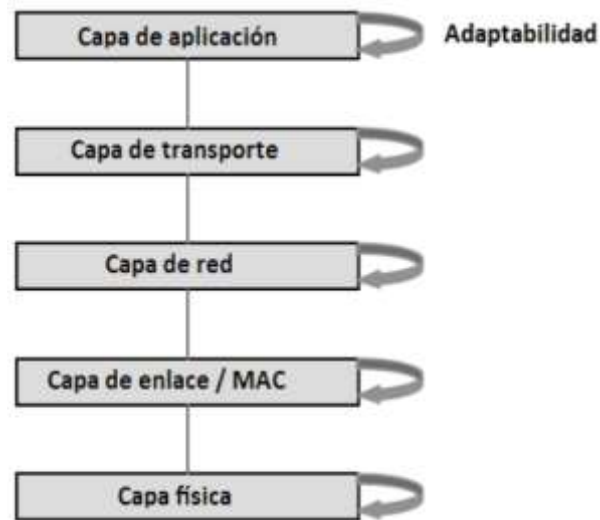


Figura 2. 12 Pila de protocolos de redes *ad-hoc*
Fuente: (Vázquez, 2014)

Al igual que en el caso de las redes cableadas, el uso directo de esta pila da lugar a un bajo rendimiento en los recursos de la WSN, sobre todo, en energía, ancho de banda, capacidad de memoria y velocidad de procesamiento que de por sí ya son muy limitados. Pues, muchas redes inalámbricas de sensores se dedican a la recolección de datos en tiempo real y podría producirse alta demanda de ancho de banda y retardos en ciertos momentos. Por lo tanto, ha sido necesario explorar nuevos enfoques para romper la frontera tradicional entre las capas auxiliares y crear nuevos paradigmas.

Una pila de protocolos comúnmente utilizada por el nodo recolector y los nodos sensores se muestra en la figura 2.13. Esta pila de protocolos combina el manejo de la energía y movilidad, integra los datos con protocolos de red, usa la energía de manera eficiente a través del medio inalámbrico y promueve esfuerzos cooperativos entre los nodos sensores. La pila de protocolos consiste en la capa de aplicación, de transporte, de red, de enlace de datos, física, plano de administración de energía, de gestión de la movilidad, y de gestión de tareas, los cuales se describen a continuación (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam, & Cay, 2002), (Vázquez, 2014).

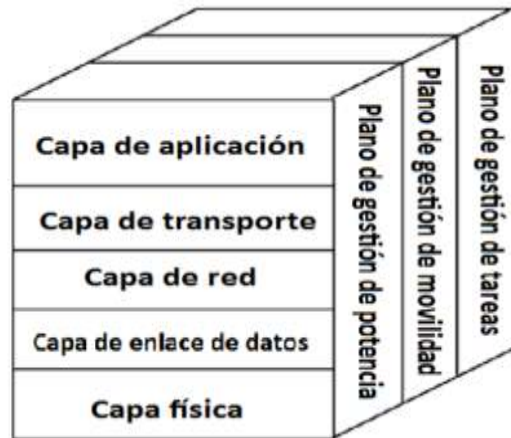


Figura 2. 13 Pila de protocolos de redes *ad-hoc* de sensores

Fuente: (Vázquez, 2014)

- **Capa de aplicación:** Los diferentes tipos de *software* de aplicación están contruidos para ser utilizados en función de las tareas de detección. Dicha capa hace que el *hardware* y el *software* de la capa más baja sean transparentes para el usuario final.
- **Capa de transporte:** Esta capa ayuda a mantener el flujo de datos, si la aplicación de la red de sensores lo requiere.
- **Capa de red:** Se encarga del encaminamiento de los datos suministrados por la capa de transporte y de los protocolos específicos de enrutamiento por saltos múltiples entre los nodos sensores y nodos recolectores.
- **Capa de enlace de datos:** Es responsable de multicanalizar el flujo de datos, detección de la trama de red, controles de acceso al medio (MAC) y de errores. Dado que el medio ambiente es ruidoso y los nodos pueden ser móviles, el protocolo MAC es capaz de minimizar las colisiones entre vecinos.
- **Capa física:** Se ocupa de las necesidades de una modulación simple pero robusta, selección de frecuencias, cifrado de datos, técnicas de transmisión y recepción.

Adicionalmente, en el modelo se tienen los planos de gestión de potencia, movilidad y tareas. Éstos controlan la potencia, el movimiento y la distribución de tareas entre los nodos sensores. Además, éstos planos ayudan a los nodos a coordinar las tareas de detección y reducir el consumo total de energía.

2.9.3.1 Últimas Tendencias

Actualmente, el uso de tecnologías y estándares, surgidas de plataformas de *hardware* y *software* libre, han ayudado enormemente a generar nuevas y mejores tecnologías, diseñadas específicamente para el uso de equipos de baja potencia y de las redes inalámbricas de sensores.

Protocolos

Las tecnologías ZigBee y HART inalámbrico que trabajan específicamente con el estándar IEEE 802.15.4, de manera similar al modelo OSI (Open System Interconnection), tienen capas independientes. En las últimas aplicaciones, también se habla de 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks). Esto hace posible que los dispositivos, como los nodos de una red inalámbrica puedan comunicarse directamente con otros dispositivos IP.

En la figura 2.14 se muestran las diferentes capas que conforman la pila de protocolos para ZigBee/6LoWPAN.

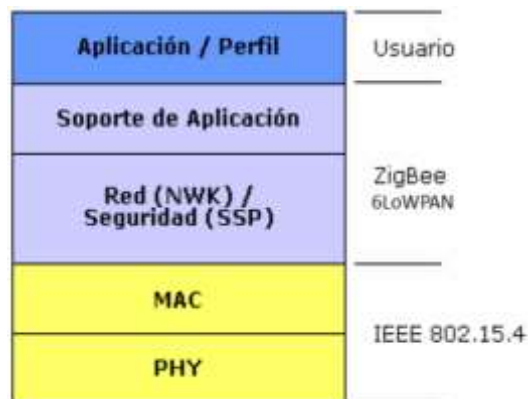


Figura 2. 14 Pila de protocolos de redes ZigBee

Fuente: (Vázquez, 2014)

La capa de más bajo nivel es la capa física (PHY), que en conjunto con la capa de acceso al medio (MAC), brindan los servicios de transmisión de datos por el aire punto a punto. Estas dos capas están detalladas en el estándar IEEE 802.15.4–2003.

Por consiguiente, el estándar trabaja sobre las bandas de radiofrecuencia Industrial, Científica y Médica (ISM, Industrial, Scientific and Medical) de uso no regulado, donde se definen hasta 16 canales en la banda de los 2.4 GHz, cada una de ellos con un ancho de banda de 5 MHz. Además, se utilizan radios con un espectro de dispersión de secuencia directa, logrando de esa forma, tasas de transmisión en el

aire de hasta 250 kbps con un alcance que oscila entre los 10 y 75 m, los cuales dependen mucho del entorno.

Asimismo, la capa de red (NWK, Network) tiene como objetivo principal permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer una interfaz adecuada para su uso por parte de la capa de aplicación. En esta capa se brindan los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a ella, encaminar paquetes dirigidos a otros nodos en la red, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos. Se debe tener en cuenta que el algoritmo de encaminamiento que se usa, es el de encaminamiento de malla, el cual se basa en el protocolo AODV.

Pues, cuando ésta capa cumple la función de unir o separar dispositivos, a través del controlador de red, implementa seguridad y encamina tramas a sus respectivos destinos. También, la capa de red del controlador es responsable de crear una nueva red y asignar direcciones a los dispositivos de la misma. Es en esta capa en donde se implementan las distintas topologías (árbol, estrella y malla) soportadas por ZigBee.

La siguiente capa es la de soporte a la aplicación que es el responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos. Las capas de red y de soporte a la aplicación, son determinadas por la unión ZigBee.

En el nivel conceptual más alto se encuentra la capa de aplicación que no es otra cosa que la aplicación misma y de la que se encargan, tanto fabricantes como desarrolladores. Es en esta capa es donde se encuentran los ZDO (ZigBee Device Object – Objetos de dispositivos ZigBee), los cuales se encargan de definir el papel del dispositivo en la red, si actuará para coordinar, encaminar o como dispositivo final; la subcapa APS (Applications Supports) y los objetos de aplicación definidos por cada uno de los fabricantes (Maroto, 2010).

Cada capa se comunica con sus capas subyacentes por medio de una interfaz de datos y otra de control, las capas superiores solicitan servicios a las capas inferiores y éstas reportan sus resultados a las superiores. Además de las capas mencionadas, se integra otro par de módulos a la arquitectura, que son: módulo de seguridad, que

provee los servicios para cifrar y autenticar los paquetes y el módulo de administración del dispositivo ZigBee, que se encarga de gestionar los recursos de red del dispositivo local, así como también proporcionar a la aplicación funciones de administración remota.

Recolección de Energía Ambiental y Dispositivos de Baja Potencia

Uno de los medios más atractivos para la alimentación de los nodos de sensores inalámbricos, se basa en la obtención de energía del ambiente. Pese a que un nodo inalámbrico puede funcionar durante años con una sola batería de litio, el mantenimiento de las baterías en una instalación gigantesca, con cientos de sensores puede ocasionar un problema.

Igualmente, los dispositivos de captación de energía ofrecen dicha posibilidad, gracias a los requerimientos de energía minúsculos de los dispositivos de ultrabaja potencia.

Existe un sorprendente número de fuentes de energía ambiental que se puede transformar en energía eléctrica adecuada para los nodos sensores.

Una célula fotovoltaica común puede proporcionar 50 mW continuamente, desde un entorno de oficina normalmente iluminado con tan poco como 300 lux. Pequeños captadores de energía de vibración, que aprovechan el efecto piezoeléctrico, pueden proporcionar algunos miliWatts de potencia continua (Alvarado, 2013).

Cuando estos dispositivos se combinan con baterías recargables, cualquiera de ellos puede proporcionar suficiente potencia para un nodo sensor. Una antena eficiente es otro componente fundamental del diseño de sensores inalámbricos. Al igual que con los microcontroladores, el perfil de potencia del transceptor tiene un impacto significativo en la vida de la batería. Se debe tener un modo de bajo consumo de energía (*sleep*), potencia de transmisión programable y la capacidad de activación de temporizadores.

2.9.4 Aplicaciones en Redes Inalámbricas de Sensores

Las aplicaciones en WSN se pueden dividir en dos categorías: monitorización y seguimiento. La monitorización puede aplicarse, por ejemplo, al monitoreo de recursos naturales (ríos, volcanes, incendios, etc.), de cultivos, de animales, de pacientes y deportistas, de estructuras (puentes, edificios), el seguimiento de objetos

móviles, la domótica en hogares (control de calefacción, refrigeración, iluminación, seguridad, etc.), el control de tráfico vehicular, la automatización industrial, etc. (Riva, 2015). Por otro lado, el seguimiento puede ser aplicado sobre objetos, animales, personas y vehículos.

La figura 2.15 muestra las aplicaciones en redes inalámbricas de sensores.

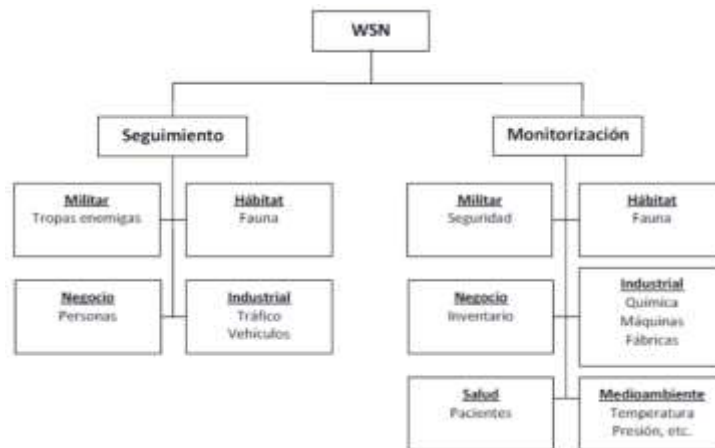


Figura 2. 15 Aplicaciones en Redes Inalámbricas de Sensores

Fuente: (Riva, 2015)

2.10 Operación de las redes de sensores inalámbricas

Cuando se despliega una importante cantidad de nodos sensores en un área grande para monitorear de manera conjunta un entorno físico, la conexión en red de estos nodos es sumamente importante. Además, un nodo sensor en una WSN no solo se comunica con otros nodos, sino también con una estación base (BS, Base Station), mediante comunicación inalámbrica, tal como se muestra en la figura 2.16.

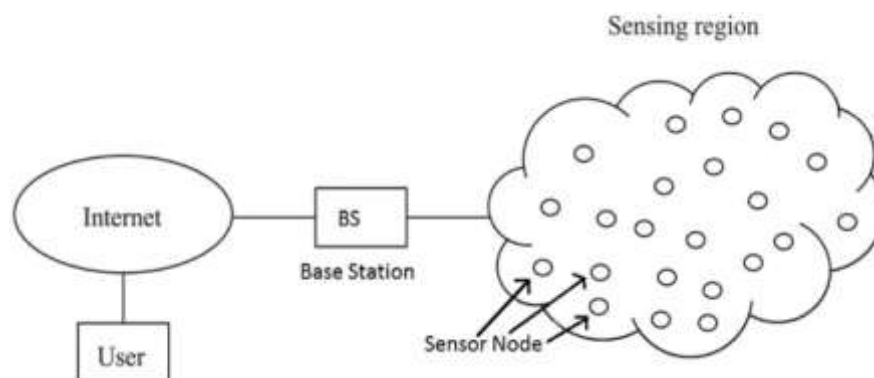


Figura 2. 16 Nodo sensor en una estación base

Fuente: (Mostafaei, 2019)

Como se puede ver en la imagen, la estación base envía comandos a los nodos sensores y estos realizan la tarea cooperando entre sí. Luego de recopilar los datos necesarios, los nodos del sensor envían la información de vuelta a la estación base. Una BS también actúa como puerta de entrada a otras redes a través de Internet. Después de recibir los datos de los nodos del sensor, una estación base realiza un procesamiento de datos simple y envía la información actualizada al usuario a través de Internet (Electronicshub, 2019).

Si cada nodo sensor está conectado a la estación base, se conoce como “arquitectura de red de salto único o single-hop” (véase la figura 2.17). Aunque es posible la transmisión a larga distancia, el consumo de energía para la comunicación será significativamente mayor que la recopilación de datos y el cálculo.

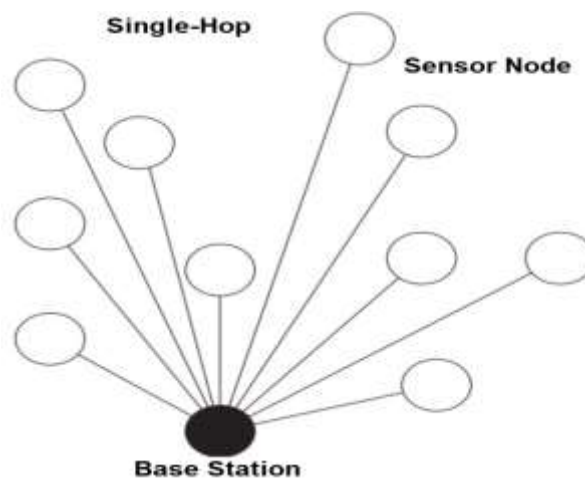


Figura 2. 17 Arquitectura de red de Single-Hop
Fuente: (Electronicshub, 2019)

No obstante, normalmente se usa la arquitectura de red Multi-hop, en lugar de un solo enlace entre el nodo sensor y la estación base, los datos se transmiten a través de uno o más nodos intermedios. Véase la figura 2.18.

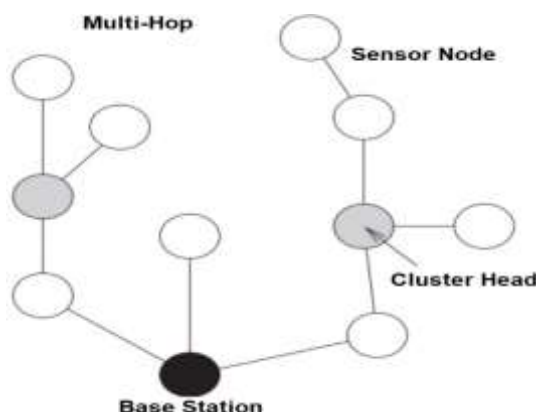


Figura 2. 18 Arquitectura de red Multi-Hop Fuente. (Electronicshub, 2019)

Esto puede ser implementado de dos maneras: arquitectura de red plana y jerárquica. En la primera, la estación base envía comandos a todos los nodos sensores, pero el nodo sensor con la consulta correspondiente responderá utilizando sus nodos pares a través de una ruta de múltiples saltos (Capella, 2010). Véase la figura 2.19.

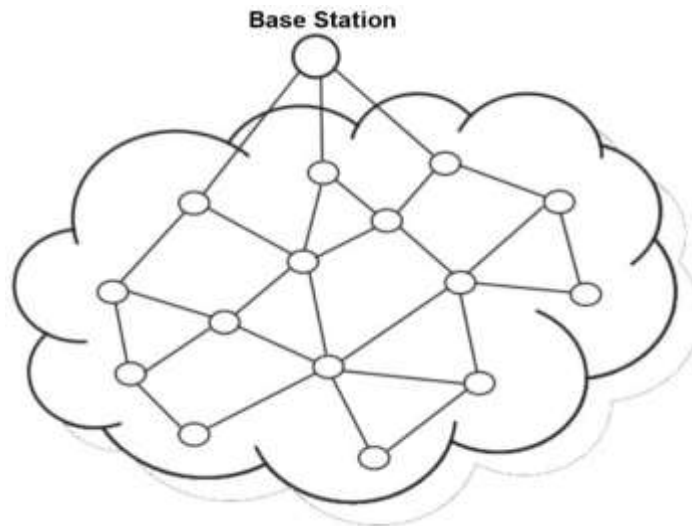


Figura 2. 19 Arquitectura plana Fuente: (Mostafaei, 2019)

En la arquitectura jerárquica, los nodos sensores se forman en grupos y transmiten datos a los correspondientes cabezales del grupo. Los cabezales del clúster pueden transmitir los datos a la estación base, véase la figura 2.20.

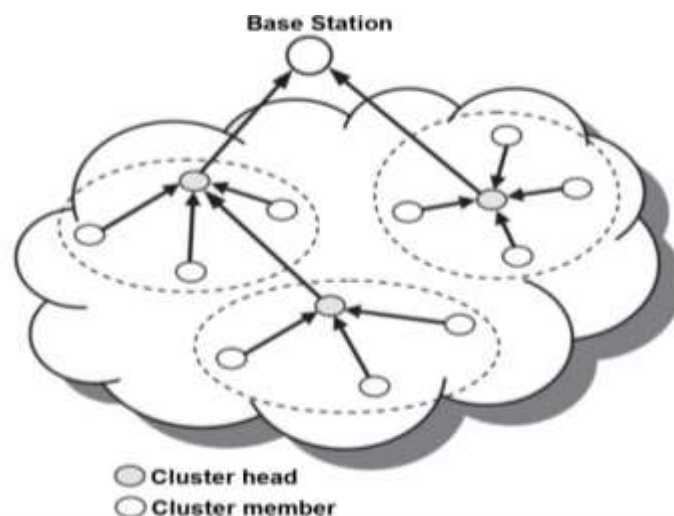


Figura 2. 20 Arquitectura jerárquica

Fuente: (Shabbir & Rizwan, 2017)

2.10.1 Requisitos de aplicación

Las redes inalámbricas de sensores son enormemente específicas de la aplicación y se implementan de acuerdo con los requisitos de la misma. Se clasifican en categorías, las cuales se detallan a continuación.

- WSN estático y móvil
- WSN determinista y no determinista
- Estación base única y estación base múltiple WSN
- Estación base estática y estación base móvil WSN
- WSN de salto simple y salto múltiple
- *Self* - Reconfigurable y Non - *Self* - Configurable WSN
- WSN homogéneo y heterogéneo.

WSN estático y móvil

En la mayoría de las aplicaciones, los nodos sensores están fijos sin movimiento, éstas son redes estáticas. En algunas aplicaciones, especialmente en sistemas biológicos, se requieren nodos de sensores móviles, estas son redes móviles (Cama, Acosta, Piñeres, Caicedo, & Zamora, 2016). Un ejemplo de red móvil es el monitoreo de animales.

WSN determinista y no determinista

En un WSN determinista, la posición de un nodo sensor se calcula y se fija. El despliegue planificado previamente de nodos de sensor solo es posible en un número limitado de aplicaciones, pues en la mayoría no es posible determinar la posición de los nodos del sensor debido a varios factores, como el entorno hostil o las condiciones de funcionamiento desfavorables. Dichas redes son no deterministas y requieren un sistema de control complejo (Saldaña, 2012).

Estación base única y estación base múltiple WSN

En una estación base única WSN, solo se usa una estación base que se encuentra cerca de la región del nodo sensor. Todos los nodos sensores se comunican con esta BS, en el caso de una estación base múltiple WSN, se utiliza más de una BS y un nodo sensor puede transferir datos a la estación base más cercana.

Estación base estática y estación base móvil WSN

De manera similar a los nodos sensores, las estaciones base pueden ser estáticas o móviles. Las primeras tienen una posición fija, generalmente cerca de la región de detección. Una estación base móvil se mueve alrededor de la región de detección para que la carga de los nodos del sensor esté equilibrada (Cama, Acosta, Piñeres, Caicedo, & Zamora, 2016).

WSN de salto simple y salto múltiple

En una WSN de un solo salto, los nodos del sensor están conectados directamente a la estación base. 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 (Alvarado, 2013).

Self - Reconfigurable y Non-Self-Configurable WSN

En un WSN no autoconfigurable, las redes de sensores no pueden organizarse en una red y dependen de una unidad de control para recopilar información. Pues, en la mayoría de los WSN, los nodos sensores son capaces de organizar y mantener la conexión y trabajan en colaboración con otros nodos sensores para realizar la tarea.

WSN Homogéneo y Heterogéneo

En una WSN homogénea, todos los nodos sensores tienen un consumo de energía, potencia de cálculo y capacidades de almacenamiento similares. En el caso de WSN heterogéneo, algunos nodos sensores tienen mayores requisitos de potencia y energía computacionales que otros y las tareas de procesamiento y comunicación se dividen en consecuencia.

2.11 Clasificación de los Protocolos de Enrutamiento

Los protocolos de enrutamiento determinan cómo los nodos se comunican entre sí y cómo se difunde la información a través de la red. Sin embargo, hay muchas formas de clasificar los protocolos de enrutamiento WSN. A continuación, se detalla la clasificación básica de los protocolos de enrutamiento en la figura 2.21.



Figura 2. 21 Clasificación básica de los protocolos de enrutamiento

Fuente: (Capella, 2010)

2.12 Red tipo Jerárquica

Los nodos sensores se eligen a sí mismos como cabeza de grupo con algunos criterios de probabilidad, definidos por el protocolo y lo anuncian a otros nodos. Se describe un protocolo versátil como LEACH, el cual es un protocolo de enrutamiento que organiza el clúster de modo que la energía se divida por igual en todos los nodos sensores de la red. En el protocolo LEACH, se producen varios grupos de nodos sensores y un nodo definido como cabeza de grupo que actúa como nodo de enrutamiento para todos los demás en el grupo.

Al igual que en los protocolos de enrutamiento, el cabezal del clúster se selecciona antes de que comience la comunicación y ésta falla si hay algún problema en dicho cabezal y hay muchas posibilidades de que la batería se agote antes en comparación con los otros nodos en el grupo porque el cabezal está trabajando en sus tareas de enrutamiento para todo el clúster (Shabbir & Rizwan, 2017)

El protocolo LEACH aplica la aleatorización y la cabeza del clúster se selecciona del grupo de nodos, por lo que esta selección del cabezal de varios nodos de forma temporal, hace que este protocolo sea más duradero ya que la batería de un solo nodo no está cargada por mucho tiempo.

2.13 Centrado en Datos

En la mayoría de las redes inalámbricas de sensores, la información detectada es mucho más valiosa que el nodo en sí. Por lo tanto, las técnicas de enrutamiento centradas en datos se concentran principalmente en la transmisión de información

especificada por ciertos atributos, en vez de recopilar datos de ciertos nodos (Shabbir & Rizwan, 2017).

En el enrutamiento centrado en datos, el nodo sumidero consulta a regiones específicas para recopilar datos de características determinadas, por lo que es necesario un esquema de nombres basado en atributos para describir las

Protocolo características de los datos. Los ejemplos son los siguientes:

2.13.1 Protocolos de Sensor para Información a través de Negociación (SPIN)

El protocolo SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation, del Sensor para obtener Información a través de la Negociación), se define para usar y eliminar deficiencias como inundaciones y chismes, que sucede en otros protocolos. Por tanto, la idea principal es que el intercambio de datos, que es detectado por el nodo, podría requerir más recursos en comparación con los metadatos, que es solo un descriptor sobre los datos detectados por el nodo. El administrador de recursos en cada nodo supervisa sus recursos y adapta su funcionalidad en consecuencia.

Tres mensajes, ADV, REQ y DATA, se utilizan en SPIN. El nodo difunde un paquete ADV a todos los demás nodos, indica que tiene algunos datos. Este mensaje ADV de nodo publicitario incluye atributos de los datos que tiene. Los nodos que tienen intereses en los datos publicitados los solicitan enviando un mensaje REQ, al nodo publicitario. Al recibir el mensaje REQ, el nodo publicitario envía los datos a ese nodo. Este proceso continúa cuando el nodo en la recepción de datos genera un mensaje ADV y lo envía. El modelo completo SPIN se muestra en la figura 2.22.

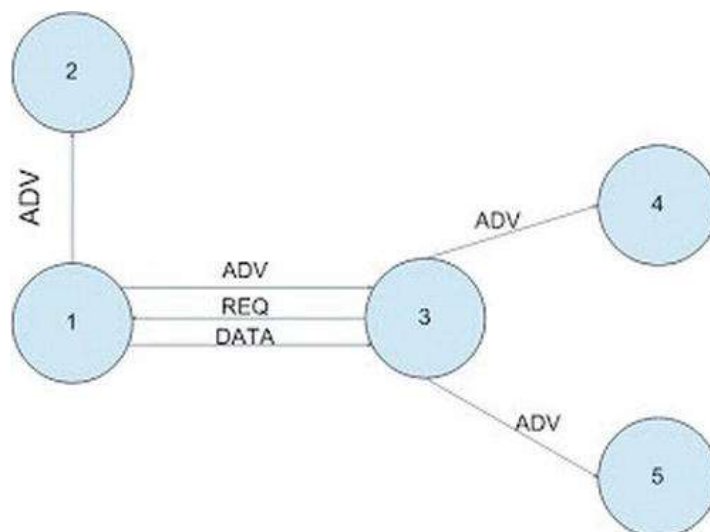


Figura 2. 22 Protocolo de enrutamiento SPIN

Fuente. (Shabbir & Rizwan, 2017)

2.13.2 Iniciado en el Destino, Destination-initiated (Dst-initiated)

Los protocolos se denominan protocolos iniciados en el destino, cuando la generación de la configuración de la ruta se produce en el nodo de destino. Ejemplos, son la Difusión Dirigida (DD) y LEACH.

2.13.3 Difusión Dirigida (DD, Directed Diffusion)

La difusión dirigida es una técnica de enrutamiento centrada en datos y se utiliza para la recopilación y circulación de información. Dicho protocolo de enrutamiento es eficiente y ahorra energía, por eso se incrementa el tiempo de vida de la red. Asimismo, toda la comunicación en el protocolo de enrutamiento de difusión dirigida, es de nodo a nodo, ya que no necesita de direccionamiento. En el siguiente capítulo (subcapítulo 3.1) se detalla más características de este protocolo en transmisión de datos bajo IP que da derivación de nodos con mayores capacidades.

2.13.4 Iniciado por la Fuente – Source initiated (Src initiated)

En este tipo de protocolo, el nodo de origen anuncia cuando tiene datos para compartir y luego la ruta se genera desde el lado de origen hasta el destino. Un ejemplo es SPIN.

2.14 Categorías de Protocolos de Enrutamiento

Para transmitir datos en redes de sensores, se utilizan dos técnicas. El primero se conoce como Inundación y el otro es el protocolo de chismes. No es necesario utilizar ningún algoritmo de enrutamiento y mantenimiento de la topología. En el protocolo de inundación, al recibir un paquete de datos por los nodos sensores, éste se transmite a todos los demás vecinos. El proceso de transmisión continúa hasta que se cumpla cualquiera de las dos condiciones siguientes; el paquete ha llegado exitosamente a su destino y la segunda condición es que el número máximo de saltos de un paquete se haya alcanzado.

Las principales ventajas de las inundaciones son la facilidad de implementación y la simplicidad. Los inconvenientes son la ceguera de los recursos y la superposición e implosión. El protocolo de cotilleo es una versión algo avanzada del de inundación. En el protocolo de chisme, el nodo del sensor, que está recibiendo un paquete de datos, lo transmite al vecino seleccionado arbitrariamente. En el

siguiente turno, los nodos de detección nuevamente seleccionan aleatoriamente otros nodos y le envían datos; este proceso continúa una y otra vez. La transmisión no se usa en el protocolo de chismes como se usó en las inundaciones. De esta forma, el problema de implosión se puede evitar fácilmente. Pero el retraso se mejora de esta manera. A continuación, las principales categorías de los protocolos de enrutamiento se muestran en la figura 2.20.



Figura 2. 23 Categorías de protocolos de enrutamiento
Fuente. El autor

2.14.1 Protocolos de Enrutamiento basados en Descubrimiento de Ruta

Los protocolos de enrutamiento se clasifican en función del proceso que utilizan para descubrir las rutas.

2.14.1.1 Protocolos Reactivos

Los protocolos de enrutamiento reactivo no mantienen toda la topología de la red, se activan únicamente a pedido, cuando cualquier nodo desea enviar datos a otro nodo. Por tanto, las rutas se crean a pedido cuando se inician las consultas. Los protocolos de enrutamiento reactivo más utilizados son los siguientes:

❖ Protocolo Vector de Distancia a pedido Ad-hoc (AODV)

AODV es reactivo a petición del protocolo, está diseñado para redes móviles sin infraestructura. Emplea la metodología de enrutamiento bajo demanda para formaciones de ruta entre nodos de red. La ruta se establece en solitario cuando el nodo fuente desea dirigir paquetes de datos y la ruta preestablecida se mantiene siempre que el nodo fuente lo necesite. Por eso lo llaman On-Demand. AODV satisface el enrutamiento unicast, multicast y broadcast. Este protocolo dirige los

paquetes entre los nodos móviles de la red inalámbrica ad-hoc. Permite que los nodos móviles pasen paquetes de datos al nodo de destino necesario a través de nodos vecinos que no pueden conectar el enlace abiertamente. El material de las tablas de enrutamiento se cambia intermitentemente entre nodos vecinos y se prepara para actualizaciones repentinas.

AODV elige la ruta libre más corta, pero redonda desde la tabla de enrutamiento para transmitir paquetes. Si hay errores o variaciones en la ruta designada, entonces AODV es lo suficientemente inteligente como para crear una nueva ruta fresca para el resto de la comunicación (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam, & Cay, 2002).

❖ **Enrutamiento de Origen Dinámico (DSR)**

DSR (Dynamic Source Routing), es un protocolo de enrutamiento utilizado en redes inalámbricas de sensores desarrolladas en CMU en 1996. El enrutamiento de origen dinámico puede ser reactivo o bajo demanda. Como su nombre indica, utiliza el enrutamiento de origen en lugar de las tablas de enrutamiento, y se divide en dos partes: descubrimiento y mantenimiento de ruta.

No obstante, el nodo de origen inicia una fase de descubrimiento de ruta, la cual consta de mensajes de solicitud y respuesta de ruta (RREP). En DSR, solo el nodo de destino responde con el mensaje RREP de respuesta de ruta al nodo fuente, a diferencia de AODV, donde cada nodo intermedio respondería con el mensaje RREP de respuesta de ruta. Y el propósito del mantenimiento de la ruta de la siguiente fase, es evitar la inundación de mensajes RREP y usarse para acortar los nodos entre el origen y el destino.

2.14.1.2. Protocolos Proactivos

También llamada protocolos de enrutamiento inducidos por tablas, las que mantienen tablas de enrutamiento para la red completa al pasar la información de red de nodo a nodo y las rutas están predefinidas antes de su uso e incluso cuando no hay flujo de tráfico (Capella, 2010). El algoritmo más usado es el siguiente:

-Enrutamiento de estado de enlace optimizado (OLSR)

El enrutamiento de estado de enlace optimizado (OLSR) pertenece a la categoría de protocolos de enrutamiento proactivo y utiliza la práctica centrada en la tabla. El principal inconveniente de OLSR es que tiene una sobrecarga masiva. Para

compensar este retraso, se utilizan relés multipunto (MPR, Multipoint Relays) para superar la gran sobrecarga. Para la transmisión de datos, cada nodo utiliza tres nodos adjuntos como MPR. No se requiere información de control coherente ya que cada nodo la envía alternativamente.

2.14.1.3. Protocolos de Enrutamiento Híbrido

Los protocolos de enrutamiento híbrido tienen los méritos de los protocolos de enrutamiento proactivo y reactivo al descuidar sus deméritos.

2.15 Protocolos de enrutamiento basados en organización de red

Los siguientes protocolos se basan en la organización de la red de sensores inalámbricos.

2.15.1 Topología Plana

La topología plana maneja todos los nodos por igual. Además, esta topología es principalmente para redes homogéneas donde todos los nodos tienen las mismas características y tienen la misma funcionalidad. Algunos ejemplos son:

- Enrutamiento basado en gradiente (GBR, Gradient-based routing).
- Puma
- Enrutamiento de difusión anisotrópico restringido (CADR, Constrained Anisotropic Diffusion Routing)
- Enrutamiento de rumores (RR, Rumor Routing)

2.15.2 Enrutamiento basado en la Jerarquía

Muchas de las redes heterogéneas aplican protocolos de enrutamiento jerárquico, donde algunos nodos son más avanzados y potentes que los otros, pero no siempre es así, a veces en los protocolos jerárquicos (agrupamiento) los nodos se agrupan y el cabezal del grupo está asignado a cada uno, que luego de la agregación de datos de todos los nodos, se comunica con el nodo base. El esquema de agrupamiento es más eficiente en energía y más fácil de manejar. Como ejemplos están:

- Umbral sensible a la red de sensores de eficiencia energética (TEEN, Threshold sensitive to the energy efficiency sensor network)
- Umbral adaptativo sensible a la energía eficiente red de sensores (APTEEN, Adaptive threshold sensitive to energy efficient sensor network)

- Jerarquía de agrupamiento adaptativo de baja energía (LEACH)
- La reunión de bajo consumo en sistemas de información de sensores (PEGASIS, Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)
- Enrutamiento de arquitectura de red virtual (VGA, Video Graphics Array)
- Protocolo de autoorganización (SOP, Self Organizing Protocol)
- Fidelidad adaptativa geográfica (GAF, Geographic Adaptive Fidelity)

2.15.3 Enrutamiento basado en la Ubicación (geocéntrico)

En el enrutamiento basado en la ubicación, los nodos tienen la capacidad de colocar su ubicación actual, utilizando varios protocolos de localización. La información de ubicación ayuda a mejorar el procedimiento de enrutamiento y también permite que las redes de sensores brinden algunos servicios adicionales. Como ejemplos están:

- Velocidad
- Enrutamiento geográfico y consciente de la energía (GEAR, Geographic and Energy Aware Routing)
- Duración, lapso.

2.16 Operación basada en Protocolos de Enrutamiento

Según la base operativa, los protocolos de enrutamiento se clasifican en:

- Protocolos de enrutamiento multirruta
- Enrutamiento basado en consultas
- Enrutamiento basado en negociación
- Enrutamiento basado en QoS
- Enrutamiento coherente

2.16.1 Protocolo de Enrutamiento de Múltiples Rutas

Estos protocolos proveen múltiples rutas para que los datos lleguen al destino, lo cual proporciona un equilibrio de carga, bajo retraso y mejor rendimiento de la red. Asimismo, proporciona una ruta alternativa, en caso de exista falla de cualquier ruta. Las redes densas son más interesadas en redes de múltiples rutas. Para mantener activas las rutas, se debe enviar algún tipo de mensaje periódico después de algunos intervalos específicos. Por lo tanto, el enrutamiento de rutas múltiples no es más eficiente en términos de energía. Los protocolos de enrutamiento de múltiples rutas son los siguientes:

- Ruta múltiple y velocidad múltiple (Velocidad MMS, Multimedia Messaging Service)
- Protocolos de sensor para información a través de negociación (SPIN)

2.16.2. Protocolo de Enrutamiento basado en Consultas

Este tipo de protocolos de enrutamiento son principalmente iniciados por el receptor. Los nodos del sensor solo enviarán datos en respuesta a consultas generadas por el nodo de destino, el cual envía una consulta de interés para recibir información a través de la red y el nodo objetivo detecta la información y la envía de vuelta al nodo que ha iniciado la solicitud (Capella, 2010).

A continuación, se señala algunos ejemplos:

- Protocolos de sensor para información a través de negociación (SPIN)
- Difusión dirigida (DD)
- Puma

2.16.3. Protocolos de Enrutamiento basados en Negociación

En estos tipos de protocolos, para conservar el nivel de transmisión de datos redundantes al mínimo, los nodos sensores negocian con los otros nodos y comparten su información con los nodos vecinos sobre los recursos disponibles y las decisiones de transmisión de datos se toman después del proceso de negociación. Algunos ejemplos son:

- Protocolos de sensor para información a través de negociación (SPIN)
- Enrutamiento por asignación secuencial (SAR, Sequential Assignment Routing)
- Difusión dirigida (DD)

2.16.4. Protocolos de Enrutamiento basados en QoS

Estos protocolos se utilizan para obtener una buena calidad de servicio. Los protocolos conscientes de QoS intentan descubrir la ruta desde la fuente hasta el sumidero, que satisfaga el nivel de métricas relacionadas con una buena QoS como rendimiento, entrega de datos, energía y retraso, como así también haciendo un uso óptimo de los recursos de la red (Zamora, Philco, & Estupiñan, 2019).

Algunos ejemplos son:

- Enrutamiento por asignación secuencial (SAR)
- Velocidad
- Ruta múltiple y Velocidad múltiple (Velocidad MMS).

2.16.5. Protocolo Coherente de Enrutamiento de Procesamiento de Datos

En un protocolo de enrutamiento de procesamiento de datos coherentes, los nodos realizan un procesamiento mínimo (sellado de tiempo, compresión de datos, etc.) en los datos antes de transmitirlos hacia los otros nodos sensores o agregadores, los cuales realizan la incorporación de datos de diferentes nodos y luego, pasa al nodo sumidero.

2.17 Desempeño de protocolos en redes móviles

Se indica a continuación los protocolos que se utilizan para redes móviles ad-hoc:

2.17.1 Protocolos proactivos:

En este tipo de protocolo de enrutamiento, cada nodo en una red mantiene una o más tablas de enrutamiento que se actualizan regularmente. Cada nodo de la red envía un mensaje de difusión (tipo broadcast) a toda la red si hay un cambio en la topología de la red. Sin embargo, incurre en costos mayormente de consumo de energía adicional debido al procesamiento de información actualizada y como resultado el rendimiento de la red puede verse afectado, pero proporciona la información real sobre la disponibilidad de la red.

Se detallan algunos ejemplos de protocolos proactivos:

El protocolo de vector de distancia (DV, Distance-Vector), el de vector de distancia secuenciada de destino (DSDV, Destination Sequenced Distance Vector), el de enrutamiento inalámbrico, el de enrutamiento de estado de ojo de pez (Fisheye State Routing, FSR) propuesta por Kleinrock y Stevens, para reducir la sobrecarga de enrutamiento. El principio básico de esta técnica es la propiedad de los ojos de un pez que pueden capturar información de los píxeles con mayor precisión cerca del punto focal de su ojo. Esta precisión disminuye con un aumento en la distancia desde el centro del punto focal (Vega, 2015).

Esta propiedad se traduce en el enrutamiento en redes inalámbricas ad hoc, en que un nodo mantiene información precisa acerca de los nodos en su topología local, y

no la información de manera precisa, acerca de los nodos que se encuentran más lejos, la exactitud de la información de la red disminuye al aumentar la distancia. Cada nodo mantiene un mapa de topología local de las rutas más cortas que se intercambia periódicamente entre los nodos. Este enfoque hace de FSR un protocolo jerárquico implícito, cada nodo mantiene tabla de sus vecinos, tabla de la topología, tabla del próximo salto y una tabla de distancia (Vega, 2015).

2.17.2 Protocolos reactivos:

En este tipo de protocolo de enrutamiento, cada nodo en una red descubre o mantiene una ruta en función de la demanda. Inunda un mensaje de control mediante difusión global durante el descubrimiento de una ruta y cuando lo logra, se utiliza el ancho de banda para la transmisión de datos. La principal ventaja es que este protocolo necesita menos información de venta, pero las desventajas son que produce enormes paquetes de control debido al descubrimiento de rutas durante los cambios de topología que ocurren con frecuencia en MANET (Mobile ad hoc network) e incurre en una latencia más alta. Los ejemplos de este tipo de protocolo son el enrutamiento de origen dinámico (DSR), el enrutamiento ad-hoc bajo demanda (AODV) y los protocolos de enrutamiento basado en asociatividad (ABR, Associative-Based Routing).

2.18 Protocolo de vector de distancia (DV):

Es un protocolo proactivo que funciona según los principios del vector de distancia, donde cada nodo en una red mantiene una tabla de distancia que contiene la distancia más corta y la dirección del enrutador del próximo salto. Inicialmente, cada nodo conoce solo la distancia con los nodos que están conectados directamente y un vector de distancia se inicializa con esa distancia. Originalmente la distancia a todos los demás nodos que no están conectados directamente se inicializa al infinito. Cuando se produce un cambio en la red, cada nodo actualiza sus vecinos conectados directamente al vector de distancia de menor costo. Este proceso continúa hasta la convergencia.

Las ventajas del protocolo vector distancia son:

- 1) No es necesaria la transmisión global
- 2) Retardo de adquisición de ruta corta ya que toda la información para cada nodo está disponible en la tabla de enrutamiento.

Las desventajas son:

- 1) Tiempo de convergencia largo que puede causar problemas de conteo hasta el infinito para redes grandes
- 2) No disponibilidad de rutas alternativas.

2.18.1 Protocolo de enrutamiento inalámbrico (WRP, Wireless Routing Protocol):

Es una versión mejorada del protocolo de vector distancia que elimina los problemas de conteo hasta el infinito y, por lo tanto, disminuye el tiempo de convergencia. Tiene algunas desventajas también, requiere mayor memoria y procesamiento. Tampoco es adecuado para grandes redes con movilidad. Sin embargo, en WRP, cada nodo en una red mantiene las siguientes cuatro tablas:

- 1) Tabla de costo de enlace: cada nodo contiene información de costo e identificación de los nodos conectados directamente.
- 2) Tabla de distancia: cada nodo contiene información de los nodos que no están conectados directamente.
- 3) Tabla de enrutamiento: contiene la distancia más corta y la información actualizada de todos los nodos de destino.
- 4) Lista de retransmisión de mensajes (MRL, Message Relay List): cada nodo en una red envía un mensaje de saludo a sus vecinos y les informa que está activo y espera el acuse de recibo (ACK) de sus vecinos. Si obtiene algún ACK de algún vecino dentro de un cierto tiempo, entonces mantiene esta información en la lista MRL. La próxima vez enviará un mensaje de actualización solo a los nodos que no respondieron al mensaje de saludo.

2.18.2 Procedimientos del protocolo de enrutamiento DSR

Es un protocolo reactivo que crea una ruta bajo demanda utilizando el protocolo de enrutamiento de origen y consta de dos procedimientos: descubrimiento y mantenimiento de ruta.

Descubrimiento de ruta:

Como es un protocolo de enrutamiento bajo demanda, busca la ruta durante la transmisión de un paquete. En la primera fase, el nodo de transmisión busca en su

caché de ruta para ver si existe un destino válido y, de ser así, comienza a transmitir al nodo de destino y el proceso de descubrimiento de ruta termina aquí. Si no hay una dirección de destino, el nodo transmite el paquete de solicitud de ruta para llegar al destino. Cuando el nodo de destino obtiene este paquete, devuelve la ruta aprendida al nodo de origen.

Mantenimiento de ruta:

Es un proceso de transmisión de un mensaje por un nodo a todos los demás que informan a la red o la falla del nodo en una red. Proporciona una detección temprana de falla de nodo o enlace ya que las redes inalámbricas utilizan el reconocimiento de salto a salto.

Las ventajas de este protocolo son:

- 1) Consciente de la existencia de rutas alternativas que ayudan a encontrar otra en caso de falla de nodo o enlace.
- 2) Evita los bucles de enrutamiento
- 3) Menos gastos generales de mantenimiento, ya que es un protocolo de enrutamiento bajo demanda.

Por otro lado, las desventajas son:

- 1) Retraso de adquisición de ruta larga para el descubrimiento de una que puede no ser aceptable en situaciones como el campo de batalla.
- 2) No es adecuado para una gran cantidad de nodos donde la velocidad puede sufrir.
- 3) Produjo una gran sobrecarga de mensajes durante las horas de mayor actividad.

2.18.3 Procedimientos del protocolo de enrutamiento AODV:

AODV es un protocolo de enrutamiento tradicional para MANET. Utiliza un enfoque distribuido, es decir, solo realiza un seguimiento de los nodos vecinos y no establece una serie de rutas para llegar al destino. También utiliza el descubrimiento de rutas y el mecanismo de mantenimiento de rutas como DSR.

Descubrimiento de ruta:

Un nodo de origen envía un mensaje de difusión a sus vecinos, si no hay una ruta disponible para el destino deseado que contenga la dirección de origen y su número de secuencia, la dirección de destino y su número de secuencia, la ID de difusión y

el conteo de saltos. Se utilizan dos punteros como el hacia adelante y hacia atrás durante el descubrimiento de la ruta. Los punteros de reenvío realizan un seguimiento de los nodos intermedios mientras el mensaje se reenvía al nodo de destino. Finalmente, cuando el mensaje de solicitud de ruta llega al nodo de destino, se envía el mensaje de respuesta a la fuente a través de los nodos intermedios y el puntero hacia atrás realiza un seguimiento de los nodos. La característica principal de AODV que lo distingue de DSR, es el número de secuencia de destino que se utiliza para verificar la ruta actualizada al destino.

Mantenimiento de ruta:

Hay tres tipos de mensajes intercambiados entre origen y destino: de error de ruta, de saludo y de tiempo de espera. El primero garantiza que el mensaje se transmitirá a todos los nodos porque si se observa un enlace fallido, propagará este mensaje a sus nodos ascendentes solo hacia el nodo fuente. El mensaje 'hola' asegura los punteros hacia adelante y hacia atrás desde la caducidad. El mensaje de tiempo de espera garantiza la eliminación del enlace cuando no hay actividad durante un cierto período de tiempo entre el origen y el nodo de destino.

2.19 Red WSN con calidad de detección

La eficiencia energética, es una métrica QoSensing (Quality of Sensing) importante e indirecta, se mejora con la ayuda de algoritmos de enrutamiento. Al recibir métricas de desempeño de red a intervalos de tiempo regulares, el nodo sumidero puede percibir la QoSensing global de la red (Palacios, Philco, & Bastidas, 2019).

La QoS en WSN se puede monitorear utilizando métricas tradicionales como retraso, pérdida o ancho de banda, recopiladas de todos los nodos individuales en la red, cada uno analizado individualmente. Sin embargo, estas métricas no son suficientes para medir el QoSensing de WSN o incluso para evaluar su desempeño global de manera eficiente.

En el capítulo 3, se detallan modelos de enrutamiento y las diversas formas de datos que pueden manejarse en una red WSN.

CAPÍTULO 3: MODELO DE ENRUTAMIENTO EN WSN

Para estudiar el enrutamiento de paquetes dentro de una red WSN, es preciso utilizar un direccionamiento conveniente de los nodos. En este sentido, el uso de direccionamiento basado en direcciones IP no es buen procedimiento para ser aprovechada en WSN, dado el eminente costo ‘alto’ que introduce su uso, debido a la extensión de las mismas. Por ejemplo, en este caso, cada paquete lleva información de dirección de origen y de destino del paquete, con un tamaño de 4 o de 8 Bytes para cada dirección IPv4 o IPv6, respectivamente.

La alternativa más utilizada en WSN para direccionamiento es el uso de la dirección MAC de los nodos (o de parte de ella), la cual es una dirección única dada por el fabricante del transceptor de radio. Sin embargo, se pueden definir dos enfoques diferentes respecto al direccionamiento de los nodos, y a su capacidad de enrutar paquetes, los cuales están basados en las características del hardware de los nodos (Riva, 2015).

3.1 Nodos con recursos muy limitados:

No utilizan protocolos de enrutamiento ni información de rutas, debido a la demanda de procesamiento, memoria, etc., que esto requiere. En su lugar, estos nodos utilizan protocolos simples de diseminación o de retransmisión de datos, como por ejemplo inundación controlada (controlled flooding), búsqueda por expansión por anillos (Expanding Ring Search, ERS), o basados en decisiones probabilísticas, como por ejemplo caminata aleatoria (random walk), o rumoreo (gossip). La retransmisión de un paquete no implica necesariamente el enrutamiento del mismo, sino que debe existir cierta información extra en un nodo para determinar a qué nodo vecino enviar dicho paquete, para que luego de múltiples retransmisiones el mismo llegue a su destino (Riva, 2015). Véase figura 3.1.

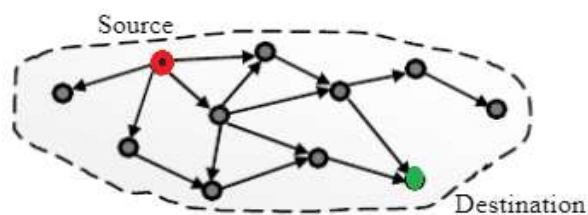


Figura 3. 1 Operación de Flooding en una WSN

Fuente: (Sharma, Bala, & Ajay, 2010)

El algoritmo de inundación consiste en enviar los datos a todos los nodos dentro del rango, esto es, si un nodo necesita enviar datos, lo hace a todos sus vecinos, estos patrones se repiten hasta que la información llegue a su destino. Existen variantes de este algoritmo:

- Cada nodo se comporta como transmisor y receptor.
- Cada nodo de las redes envía los datos a todos sus vecinos, excepto a la fuente.

Aunque el algoritmo de inundación debe ser más complejo que eso. Se deben tomar algunas precauciones para evitar la duplicación de los paquetes o bucles (lazos) infinitos que permitan que los paquetes expiren eventualmente. También debe evitar colisiones.

3.2 Nodos con mayores capacidades

Utilizan protocolos de enrutamiento tradicionales, por ejemplo, basados en direcciones IP, como los utilizados en las redes de área local (Local Area Networks, LAN). Es decir, utilizan técnicas de enrutamiento basadas en direcciones, conocidas como address-centric o address-based. En este caso, cada nodo posee una identificación única y una tabla de enrutamiento en memoria, con información de nodos vecinos, y a través de cual se puede llegar con un paquete a un nodo de destino distante. Cada nodo intermedio utiliza su información local para encontrar el mejor camino hacia este destino, bajo un cierto criterio. En este contexto, criterios comúnmente utilizados en redes de datos pueden ser: enrutar paquetes por el camino más corto, el de menor tráfico, el de mayor capacidad, el de menor latencia, etc.

Cada nodo posee su propio conocimiento local de la red. Sin embargo, como se describió anteriormente, debido a la dinámica de las redes de comunicaciones en lo que respecta a cambios de topología (movilidad de nodos, falla, inclusión de más nodos, etc.), se deben actualizar dichas tablas cada cierta cantidad de tiempo con el estado actual de la red. Para este fin, se pueden utilizar esquemas proactivos, en los que cada nodo inyecta mensajes cada cierto tiempo para obtener información actualizada de la red y actualizar su tabla, lo cual demanda elevados costos de comunicación, o esquemas reactivos, en los cuales se inicia este proceso de actualización cuando un nodo quiere reportar datos (Riva, 2015).

Bajo este enfoque, se pudo considerar al enrutamiento de paquetes basado en gradientes de información y al procesamiento de datos dentro de la red, a medida

que estos son retransmitidos de un nodo a otro, con lo cual se puede reducir el uso de la comunicación. De este modo, se comprobó que es más eficiente en estas redes aplicar estrategias de enrutamiento basadas en datos, conocidas como data-centric o data-based. Véase figura 3.2

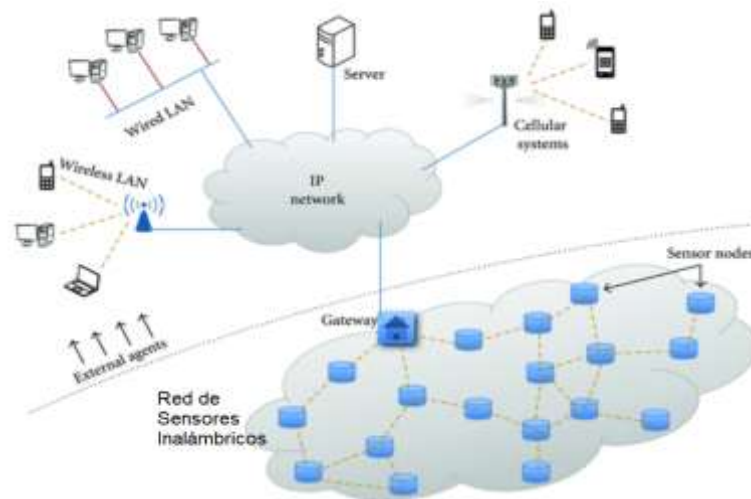


Figura 3. 2 Esquema Red WSN con direccionamiento IP

Fuente: (Maharrey, Lim, & Gao, 2012)

En la figura 3.2 se define a los agentes externos, como un host basado en IP que no forma parte de WSN. Un nodo agente externo es una computadora completa con una pila completa de redes TCP/IP y puede acceder a Internet o a la red IP. El nodo de puerta de enlace (gateway/sink) está en el límite de WSN y dirige el tráfico entrante y saliente. Tiene capacidad de red de pila IP y sensor DD. Cualquier interés o suscripción de un host basado en IP, se procesa a través del nodo de puerta de enlace, se traduce al interés de WSN y se difunde utilizando el protocolo DD. Los datos devueltos por los nodos del sensor también son procesados y reenviados por el nodo de puerta de enlace a los hosts basados en IP

En DD, cuando un nodo sensor tiene la capacidad de producir datos con nombre, especifica el nombre de estos datos con nombre al algoritmo de enrutamiento DD central. Cuando el núcleo DD recibe un interés por los datos con nombre que se han registrado previamente, se invoca una función de devolución de llamada para manejar la producción de datos correspondientes a este interés con nombre. Por otro lado, cuando el núcleo DD dentro del nodo del sensor recibe un interés con nombre por los datos con una designación que no se ha registrado previamente, el núcleo DD reenviará el mensaje de interés a sus vecinos o lo soltará por completo. Cuando un nodo está interesado en algunos datos, envía un interés por ellos. Este nodo se

conoce como sumidero o sink. Los intereses se difunden por toda la red y los gradientes. se establecen a lo largo del camino inverso de viaje de los intereses.

Se define el concepto de formación de gradientes de interés en la red, y la capacidad de un nodo para decidir si retransmite o no el interés a un grupo de nodos vecinos.

En este sentido, se pueden definir tres alternativas:

1. Transmitir lo más simple, el interés a todos los nodos, siendo equivalente a inundar la red, en caso de ausencia de información acerca de que nodos son probables candidatos a satisfacer dicho interés,
2. Realizar enrutamiento geográfico en caso de conocer la posición exacta de los nodos,
3. En caso de una red estática, un nodo puede utilizar datos en memoria, basado en escucha activa de respuestas previas de nodos vecinos, para dirigir los intereses (Riva, 2015).

Sin embargo, DD no es un esquema basado en pregunta/respuesta, sino que el interés, incluyendo una notificación de evento de bajo *rate*, es propagado en la red, y cada nodo almacena este requerimiento. Solo en casos de que se produzca un evento, cada nodo que lo detecta analiza si tiene un interés predefinido por ese tipo de información en una tabla local, y si es así, comienza el proceso de reporte de datos hacia el nodo sink. En este sentido, el nodo envía sus datos a los vecinos por el cual recibió el interés. Basado en una estrategia de reducción en las demoras de las respuestas o incremento de la tasa de transferencia de datos, se refuerzan ciertos caminos entre el nodo que detecta el evento y el sink. Sin embargo, en caso de que se refuercen varios caminos, el nodo sink aplica una estrategia de refuerzo negativo para limitar el envío de datos por caminos más desfavorables o de mayor latencia (Riva, 2015).

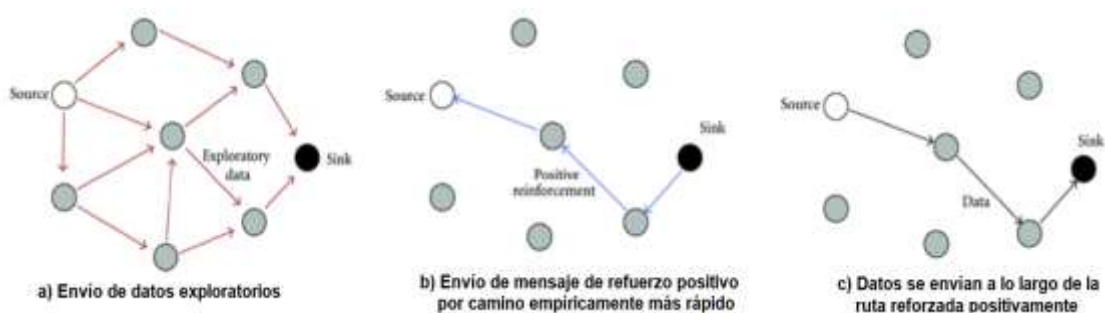


Figura 3. 3 Esquema de datos de difusión dirigida

Fuente: (Maharrey, Lim, & Gao, 2012)

Los nodos intermedios también pueden implementar reglas de refuerzo. Esto es útil para posibilitar reparaciones locales de caminos con fallas o degradados, producidos como consecuencia de fallas en nodos, y factores externos que afectan a la comunicación (obstáculos, fading, etc.).

Así la literatura científica elige a DD como protocolo de red centrado en datos en WSN en este documento por varias razones.

- DD hace que el enrutamiento de los datos detectados dentro del WSN sea más eficiente en comparación con el uso de TCP / IP en los nodos del sensor. La responsabilidad de pasar los intereses desde el nodo de la puerta de enlace a los nodos de sensores individuales, y el posterior paso de los datos de los nodos de los sensores de regreso al nodo de la puerta de enlace, se le asigna a DD. Esto hace que la tarea de enrutamiento dentro de la red sea muy simple, conveniente y eficiente.
- DD mantiene las tablas de enrutamiento dentro del nodo de puerta de enlace bastante pequeñas. En el nodo de puerta de enlace, solo es necesario realizar un seguimiento de intereses únicos (suscripciones) y cualquier dirección IP y número de puerto de hosts basados en IP interesados en los datos proporcionados por WSN.
- Debido a que los nodos de sensores individuales no se nombran en una red DD, no existe una sobrecarga en el seguimiento o la asignación de ID únicas de los nodos de sensores ni se desperdicia energía del nodo de sensor en la transmisión de información de identificación de punto final con cada paquete transmitido.

Un ejemplo del primer caso considera el problema de como direccionar requerimientos en aplicaciones de detección de eventos. Para ello se utiliza el gradiente de los datos censados para direccionar la búsqueda. Un ejemplo del segundo caso considera el caso de como los paquetes reportados por un nodo pueden encontrar rápidamente algunos de los nodos sink existentes en la red. Para ello se considera que cada paquete tiene asociada una temperatura, y que estos paquetes son retransmitidos en forma direccionada siguiendo gradientes de temperatura hacia alguno de los sinks, posiblemente el más cercano, considerados como fuentes de calor.

En este contexto, el tipo de dato que pueden ser utilizado por cada nodo para el enrutamiento basado en gradientes, puede ser clasificado entre: dato del estado del nodo, por ejemplo, su energía remanente, su distancia al sink, etc., dato sensado que es de la aplicación, por ejemplo, valor de temperatura obtenido en una aplicación definida para encontrar la temperatura máxima censada en la red. Dato sensado que no es de la aplicación, por ejemplo, el valor de la presión atmosférica obtenida por cada nodo sensor en una red desplegada en la ladera de una montaña, y cuyo nodo sink se encuentra en la base de la misma, para censar algún parámetro de interés diferente a la presión.

3.3 Estrategias de enrutamiento en WSN

Hasta la actualidad, se han propuesto una gran cantidad de protocolos de enrutamiento para WSN. Sin embargo, cada uno de ellos es más adecuado para un tipo de aplicación concreta. Existen varios trabajos que clasifican el gran abanico de protocolos de enrutamiento en función de ciertas características importantes, por ejemplo:

- Centrado en datos o direcciones: normalmente el primero es el más utilizado en WSN.
- Jerárquico o plano: ciertos nodos pueden tener mayores funcionalidades que otros, o todos los nodos tener las mismas.
- Por único o múltiples caminos: relacionado a como son direccionados los paquetes entre los nodos.
- Basado o no en localización: muchos protocolos requieren de información de la localización de los nodos, la cual es utilizada para calcular la distancia entre nodos.
- Con QoS o no: relacionado con la demora introducida por el protocolo de enrutamiento. Con QoS la red debe satisfacer ciertas métricas de calidad de servicio, como retardo, 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.
- Envío de datos basado en requerimientos, en tiempo o en eventos.
- Posibilidad de agregar datos o no.

3.4 Modelos de Reporte de Datos

El reporte de datos es una tarea enmarcada dentro del enrutamiento de paquetes, y es realizada de forma conjunta por la totalidad o por parte de los nodos que conforman la red. En general, se definen cuatro modelos de reporte de datos, cada uno de ellos más adecuado para cada tipo de aplicación, pueden ser: basados en eventos (event-driven), basados en tiempo (time-driven, continuous, periodic), basados en requerimientos o bajo demanda (query-drive, on-demand), híbridos (Riva, 2015).

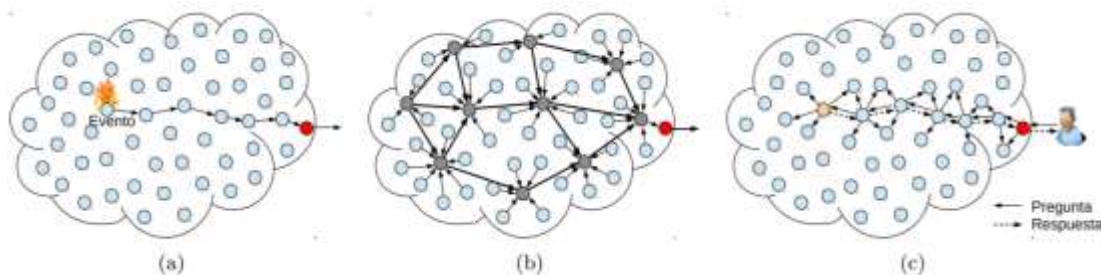


Figura 3. 4 (a) Basados en eventos (b), en tiempo (c), en requerimientos

Fuente: (Zamora, Philco, & Estupiñan, 2019)

3.4.1 Modelo basado en eventos

En este modelo, los nodos reportan los datos al sink cuando detectan un evento, basado por ejemplo en un valor sensado que supera un cierto umbral pre-definido (por ejemplo, la detección de fuego basado en temperatura). Este modelo es adecuado para la detección de eventos (explosiones, incendios, etc.), localización, y seguimiento de objetos móviles (vehículos, animales, personas, etc.) sobre un área específica. Cuando un evento es detectado en la red, los nodos sensores próximos al mismo generan datos y los envían al nodo sink. Una de las características de este modelo es su requerimiento de tiempo-real, por lo que uno de los objetivos es minimizar la latencia de envío de datos (Riva, 2015).

3.4.2 Modelo basado en tiempo

En este modelo, los nodos recolectan datos del entorno a intervalos de tiempo periódicos predefinidos, y los envían al nodo sink. En el modelo anterior, el envío de datos es usualmente iniciado por aquellos nodos sensores próximos al evento detectado, en cambio en este modelo, utilizado mayormente para monitoreo de magnitudes físicas continuas (como humedad y temperatura ambiente), los datos

son enviados al sink por todos o una gran parte de los nodos que conforman la red. En este caso, la agregación de datos durante el reporte de los mismos hacia el nodo sink es clave, lo que permite reducir la cantidad de paquetes transmitidos, y por lo tanto el uso de energía. Ello se basa en que los datos recolectados por los nodos sensores pueden ser redundantes, estar correlacionados y/o ser inconsistentes (Riva, 2015).

3.4.3 Modelo basado en requerimientos

En este modelo, basado en un esquema de pregunta/respuesta, el usuario decide cuando quiere obtener datos de la red. Para ello, el mismo inyecta una solicitud o requerimiento a la red, a través del nodo sink, indicando su interés por cierto tipo de datos o información provista por los nodos, y luego espera a que la red se los reporte. Este modelo es más adecuado para calcular funciones estadísticas de los datos obtenidos por los nodos de una magnitud física en las que no se requiere conocer todos los valores. Los nodos sensores pueden enviar datos relevantes hacia el sink, para computar la función deseada de manera centralizada o pueden computar la función en forma distribuida y colaborativa mientras los datos son reportados hacia el nodo sink. Como las WSN son redes poco fiables, debido a que los nodos son propensos a fallar, otros nodos pueden ser agregados en cualquier momento, los cuales pueden cambiar sus posiciones geográficas, etc., este modelo puede ser más eficiente que los anteriores, debido a que en cada diseminación de interés se muestrea el estado de la red.

3.4.4 Modelo híbrido

Se utilizan combinaciones de los modelos anteriores para optimizar alguna métrica, por ejemplo, reducir el tiempo hasta que el usuario obtiene los datos o disminuir el costo de comunicación. Un ejemplo de modelo híbrido es Rumor Routing, un mecanismo basado en agentes que combina un modelo fundamentado en requerimientos con uno en eventos. El objetivo de este mecanismo es enrutar los requerimientos hacia aquellos nodos que han detectado un evento particular e iniciado la notificación del mismo. En este sentido, los autores buscan un compromiso lógico entre enrutar requerimientos o notificaciones de eventos (Riva, 2015).

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE SIMULACIÓN DE RED WSN

A continuación, se describen modelos experimentales, diseño, resultados y análisis para comparar el rendimiento de dos protocolos de enrutamiento: DSR y AODV.

4.1 NS-3

Los requisitos que se deben instalar y configurar para que el simulador NS-3 efectúe operaciones simuladas, inicia con las extensiones y librerías como GCC (GNU Compiler Collection), una colección de compilador del GNU (GNU Not Unix) integrado en Ubuntu. G++ es una extensión de un compilador de C++, se emplea el comando “sudo apt-get install” para descargar las librerías y extensiones que necesita el simulador, “archivo .ta” para instalar el simulador NS-3 a través de la página web NSNAM por el comando wget, <http://www.nsnam.org/releases/ns3.25.tar.bz2>, ya que es una herramienta de línea de comandos para recuperar objetos de la web.



```
egpc@egpc-Lenovo-ideapad-320-152NB-Touch: ~/NS-3/ns-allinone-3.25
egpc@egpc-Lenovo-ideapad-320-152NB-Touch:~$ sudo apt-get install gcc g++
egpc@egpc-Lenovo-ideapad-320-152NB-Touch:~$ wget http://www.nsnam.org/releases/ns-allinone-3.25.tar.bz2
--2019-01-14 16:42:26-- https://www.nsnam.org/releases/ns-allinone-3.25.tar.bz2
Resolviendo www.nsnam.org (www.nsnam.org)... 243.215.76.161
Conectando con www.nsnam.org (www.nsnam.org)[243.215.76.161]:443... conectado.
Petición HTTP enviada, esperando respuesta... 200 OK
Longitud: 25224418 (24M) [application/x-bzip2]
Grabando a: "ns-allinone-3.25.tar.bz2"
ns-allinone-3.25.tar.bz2 100%(=====) 24,88M 983KB/s 1n 26s
2019-01-14 16:42:54 (945 KB/s) - "ns-allinone-3.25.tar.bz2" guardado [25224418/25224418]
egpc@egpc-Lenovo-ideapad-320-152NB-Touch:~/NS-3$ tar xjf ns-allinone-3.25.tar.bz2
tar: (child): ns-allinone-3.25.tar.bz2: No se pudo efectuar open: No existe el archivo o el directorio
tar: (child): Error is not recoverable: exiting now
tar: Child returned status 2
tar: Error is not recoverable: exiting now
egpc@egpc-Lenovo-ideapad-320-152NB-Touch:~/NS-3$ tar xjf ns-allinone-3.25.tar.bz2
egpc@egpc-Lenovo-ideapad-320-152NB-Touch:~/NS-3$ cd ns-allinone-3.25
egpc@egpc-Lenovo-ideapad-320-152NB-Touch:~/NS-3/ns-allinone-3.25$
```

Figura 4. 1 Instalación de NS-3

Fuente: La autora

4.1.1 Diseño experimental

El simulador de eventos discretos NS-3 se utilizó para comparar los resultados de dos protocolos. Los experimentos de simulación se ejecutaron en dos computadores de escritorio con 8 Megabyte de memoria RAM, procesador corei7 última generación.

Se detallan tres métricas de desempeño para escenarios de la simulación.

1. Retraso medio de extremo a extremo: tiempo promedio que tarda un paquete en viajar desde el origen hasta el destino, incluido el retraso de adquisición de ruta.
2. Tasa de entrega de paquetes: relación entre los paquetes entregados con éxito al destino y el número total de paquetes transmitidos por el nodo de origen.
3. Sobrecarga por transmisión: número total de paquetes de control generados para el enrutamiento.

La densidad del nodo, su movilidad y el tráfico, son los tres parámetros de control utilizados para esta simulación. El retraso medio de extremo a extremo, la velocidad de entrega de paquetes y la sobrecarga de enrutamiento se midieron para la movilidad de los nodos en el experimento 1 y la densidad de nodos para tres niveles diferentes de carga de tráfico en el experimento 2. Se utilizó un generador de velocidad de bits constante para generar paquetes de tamaño fijo. Se utilizaron tres tipos diferentes de carga de tráfico para la simulación:

- 1) Carga de tráfico baja: un paquete transmitido cada 10 segundos.
- 2) Carga de tráfico media: un paquete por segundo.
- 3) Carga de tráfico alta: un paquete cada 0.1 segundo.

Los siguientes son los parámetros que se usaron para configurar el archivo de entrada en la simulación:

- 1) Tamaño del terreno: 1000m²
- 2) Rango de transmisión de señal de radio: 175 m
- 3) Ancho de banda del enlace: 2 Mbps
- 4) Tiempo de simulación: 120 s
- 5) Tamaño del paquete: 1460 bytes
- 6) Colocación de nodos: punto de camino aleatorio
- 7) Modelo de propagación: espacio libre
- 8) Protocolo de capa de transporte: UDP (User Datagram Protocol)
- 9) Protocolo de capa MAC: IEEE 802.11
- 10) Protocolo de enrutamiento: AODV y DSR

- 11) Número de nodos: 200, 300 y 500 respectivamente
- 12) Número de nodos emisores de paquetes: 80 (seleccionados al azar)
- 13) Número de nodos receptores de paquetes: 80 (seleccionados al azar)
- 14) Velocidad del nodo: 25 km/h
- 15) Tiempo de pausa: 0s, 120s, 300s, 400s y 500s respectivamente.

A continuación, se puede ver en la tabla 4.1 el resumen de los parámetros de simulación principales con sus respectivos valores.

Tabla 4. 1 Resumen de parámetros de simulación

Parámetros de simulación	Valores
No. de nodos	200, 300, 500
Tiempo de simulación	120 s
Área de simulación	1000 m ²
Velocidad de datos de nodos	11 Mbps
Tráfico	UDP (alta carga)
Protocolos de enrutamiento	DSR, AODV

Fuente: La autora

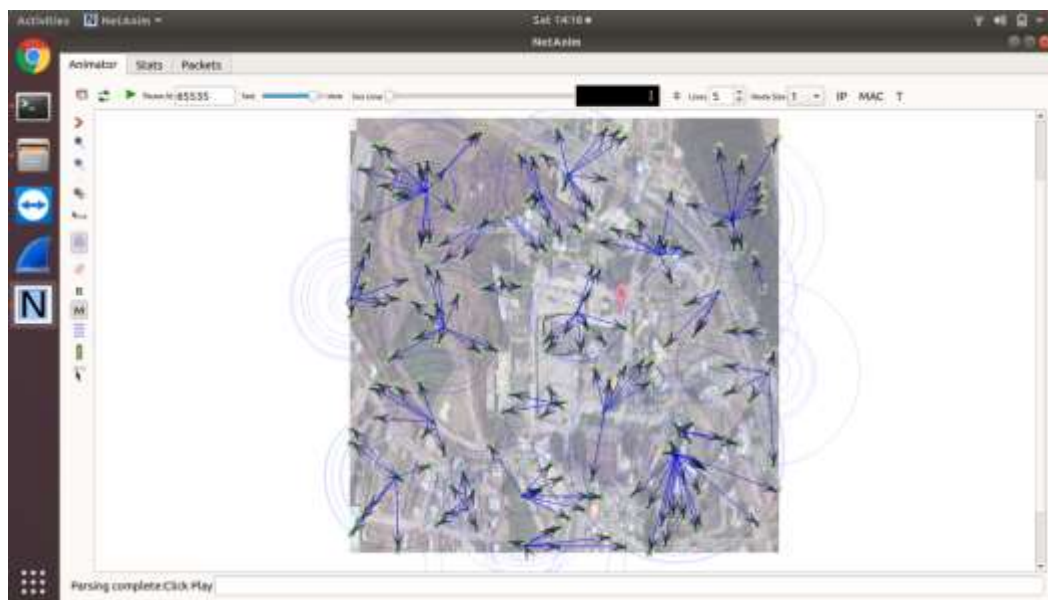


Figura 4. 2. Simulación con 200 Nodos.

Fuente: La autora

4.2 Resultados obtenidos

En la tabla 4.2 se muestra el número de paquetes de control observados para cinco niveles diferentes de movilidad de nodo y tres niveles diferentes de densidad de

nodo en diferentes cargas de tráfico. La mitad izquierda de la Tabla 4.2 bajo el encabezado de columna "Movilidad de nodo" muestra que DSR produjo el mayor número de paquetes, 220 en movilidad de nodo bajo carga de tráfico baja. También muestra que AODV produjo el mayor número de paquetes, 1521 y 5952, bajo cargas de tráfico medio y alto, respectivamente, debido a la alta sobrecarga de mensajes. La relación de los paquetes de control generados en la movilidad perpetua del nodo bajo cargas de tráfico bajas, medias y altas en AODV se calculó como 111.54%, 395.04% y 468.29% respectivamente. Para DSR fue de 110%, 220.58% y 161.95% en movilidad de nodo perpetuo bajo cargas de tráfico bajas, medias y altas, respectivamente. Muestra que DSR es menos vulnerable a la movilidad de nodos en términos de sobrecarga de enrutamiento.

Tabla 4. 2 Número de paquetes de control en movilidad y densidad de nodo

Carga	Protocolo	Movilidad del nodo					Densidad del nodo		
		Continuo	Alto	Medio	Bajo	Cero	Alto	Medio	Bajo
Baja	AODV	174	171	162	156	156	399	307	192
	DSR	220	220	215	200	200	249	210	200
Medio	AODV	1521	857	652	522	385	1159	993	853
	DSR	986	808	510	498	447	885	679	338
Alta	AODV	5952	4759	4747	2963	1271	5139	3473	1318
	DSR	1009	885	679	638	623	1109	988	468

Fuente: La autora

La figura 4.3 muestra el número de paquetes de control generados en diferentes nodos con movilidad bajo una alta carga de tráfico. La tasa de los paquetes de control de la carga de tráfico se incrementa de baja a alta en la movilidad de nodo continuo, se obtuvo 34.20 veces (174 en baja y 5952 en alta), pero fue de 4.59 veces (220 en baja y 1009 en alta) en DSR. Estos resultados muestran que no es adecuado para la escalabilidad de la red en términos de sobrecarga de mensajes.

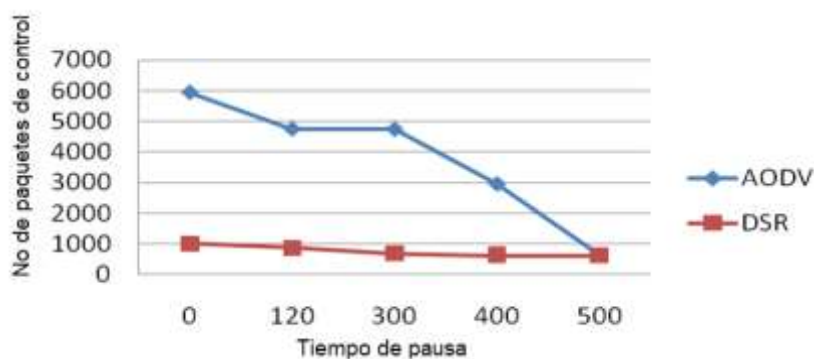


Figura 4. 3 Paquetes de control en movilidad de nodos con alta carga de tráfico

Fuente: La autora

La tabla 4.3 muestra la tasa porcentual de entrega de paquetes en la movilidad y densidad del nodo bajo cargas de tráfico bajas, medias y altas. En la mitad izquierda de la tabla 4.3, se observa que la tasa más baja y más alta de entrega de paquetes para DSR fue 1.96% y 10.34% y para AODV fue 3.51% y 9.13% ya que AODV no mantiene la secuencia completa de rutas entre nodos intermedios, por lo que puede haber posibilidad de paquetes perdidos.

Tabla 4. 3 Tasa de entrega de paquetes (%)

Carga	Protocolo	Movilidad del nodo					Densidad del nodo		
		Continuo	Alto	Medio	Bajo	Cero	Alto	Medio	Bajo
Baja	AODV	5.18	3.51	4.12	4.49	4.32	4.63	6.88	3.87
	DSR	2.59	2.59	2.09	1.96	1.96	6.1	1.38	1.96
Medio	AODV	4.48	5.10	10.23	7.47	4.73	5.65	5.45	5.18
	DSR	6.71	5.89	5.84	5.86	5.95	5.46	7.03	7.96
Alto	AODV	7.42	7.62	8.83	8.88	9.13	8.30	8.33	8.14
	DSR	8.84	9.09	9.23	9.92	10.34	6.91	6.70	6.23

Fuente: La autora

La figura 4.4 muestra la tasa de entrega de paquetes para cinco niveles diferentes de movilidad de nodos con alta carga de tráfico. La velocidad de entrega de paquetes depende de varios factores: el número de paquetes que se enviarán, el tamaño del paquete, el tiempo de inicio y finalización durante la simulación y el tiempo entre partidas del generador de velocidad de bits constante (BER, Bit Error Rate). Si se elige que se envíe un pequeño número de paquetes de menor tamaño con una mayor diferencia entre el tiempo de inicio y finalización durante la simulación y un gran tiempo entre partidas, la fuente entrega todos o la mayoría de los paquetes al destino, independientemente de los protocolos de enrutamiento.

Estos factores también afectan en gran medida la cantidad de paquetes de control que se generarán.

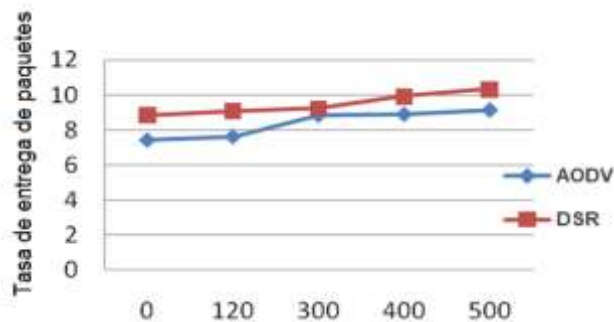


Figura 4. 4 Tasa de entrega de paquetes en movilidad de nodos con alta carga de tráfico

Fuente: La autora

La figura 4.5 muestra la proporción porcentual de la tasa de entrega de paquetes en movilidad perpetua a movilidad cero. Mostró que la tasa de eliminación de paquetes se vio menos afectada en AODV en comparación con DSR para aumentar la carga de tráfico.

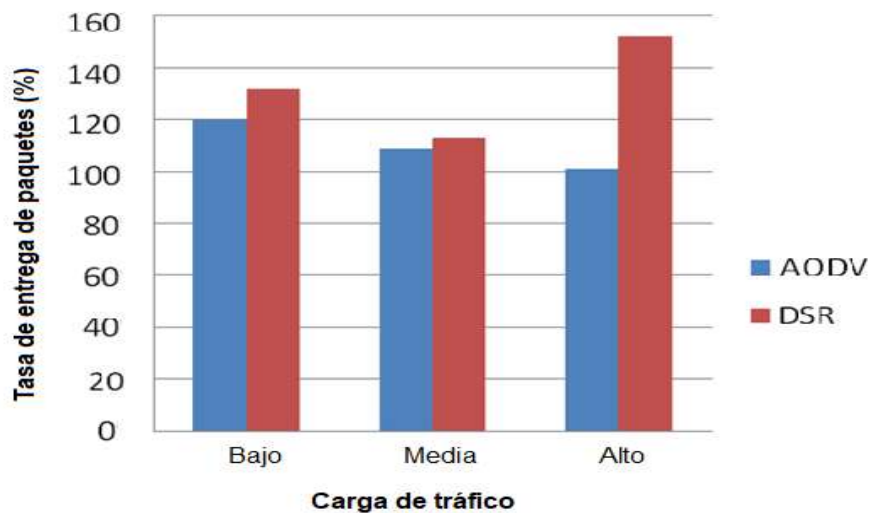


Figura 4. 5 Tasa de entrega de paquetes con 3 niveles de carga

Fuente: La autora

La tabla 4.4 muestra el retraso medio de extremo a extremo en segundos para cinco niveles de movilidad de nodo para AODV y DSR. Este último protocolo resultó en el mayor retraso de extremo a extremo, excepto por la alta movilidad del nodo. AODV tardó más de 5 veces de retraso de extremo a extremo en comparación con DSR en perpetuo en un alto nivel de movilidad de nodo.

Tabla 4. 4 Retraso de extremo a extremo (segundos) para la movilidad y densidad del nodo

Carga	Protocolo	Movilidad del nodo					Densidad del nodo		
		Continuo	Alto	Medio	Bajo	Cero	Alto	Medio	Bajo
Bajo	AODV	0.39	0.21	0.33	0.18	0.11	0.44	0.24	0.12
	DSR	0.57	0.51	0.32	0.29	0.28	0.62	0.48	0.39
Medio	AODV	0.18	0.06	0.08	0.04	0.03	0.10	0.70	0.60
	DSR	0.73	0.35	0.37	0.33	0.41	0.45	0.42	0.40
Alto	AODV	3.67	4.07	4.58	3.98	2.87	3.97	2.28	1.74
	DSR	0.68	0.79	0.33	0.30	0.07	0.75	0.49	0.21

Fuente: La autora

4.3 Indicador de Calidad de Servicio QoS

El concepto de QoS en WSN, es diferente al de una red de área local inalámbrica WLAN (Wireless Local Area Network), el usuario final no requiere toda la información de la red debido a que la información de nodos vecinos está sensiblemente correlacionada, haciendo que exista redundancia. El QoS se basa entonces en dos aspectos: buen desempeño y bajo consumo (Zamora, Philco, & Estupiñan, 2019). Los protocolos deben disponer de esquemas mínimos de QoS, que garanticen un retardo acorde con las especificaciones de la aplicación y una tasa de entrega aceptable, no poniendo en riesgo otros aspectos.

En los resultados obtenidos por la simulación, el tamaño de la ruta afecta el nivel de desempeño en la red y el retraso de extremo a extremo, que es importante para aplicaciones críticas de WSN. Los retrasos se producen cuando la comunicación o paquetes no llegan al nodo destino de forma correcta, la redundancia de paquetes son aspectos en los que los nodos están sobrecargados con tráfico y deben resolverse para mejorar los parámetros de QoS.

Cabe señalar que el equilibrio de carga, la longitud de la ruta y la interferencia pueden estar en conflicto entre sí. Por ejemplo, mejorar el enrutamiento del equilibrio de carga conduce a un aumento en la longitud de la ruta, así como evitar interferencias puede afectar el equilibrio de carga y aumentar la longitud de la ruta. Según resultados obtenidos en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 el protocolo AODV alcanza mejor QoS en cuanto a paquetes perdidos, flujo, y retraso extremo a extremo.

Conclusiones

1. Se ha caracterizado las redes WSN cuando los nodos se dispersan geográficamente y pueden estar configurados de acuerdo a: organización de la red, operación de protocolo y por descubrimiento de rutas. En la actualidad los investigadores encuentran mejoras a protocolos de enrutamientos, incluso potencian el aspecto de heterogeneidad, movilidad e interoperabilidad. La forma de operación de los protocolos reactivos, se enfoca en enrutamiento vector-distancia o enlace-estado y sus aplicaciones con nodos fijos y con movilidad en coberturas medianamente densas.
2. Se concluye que cada uno de los modelos de enrutamiento de una WSN es más adecuado para cada tipo de aplicación, pueden ser: basados en eventos en tiempo, en requerimientos o bajo demanda. En el modelo basado en tiempo, la agregación de datos durante el reporte de los mismos hacia el nodo sink es clave para reducir la cantidad de paquetes transmitidos y por lo tanto el uso de energía. El modelo basado en requerimiento, es adecuado para calcular funciones estadísticas de los datos obtenidos por los nodos de una magnitud física en las que no se requiere conocer todos los valores.
3. Las métricas de desempeño de una WSN con 300 y 500 sensores con criterio QoS, toma como referencias parámetros como retardo de paquetes, pérdida de paquetes transmitidos, throughput, consumo energético de nodos en su proceso de detección entre otros aspectos más. En las pruebas se emplea el Simulador NS-3, con dos protocolos de enrutamiento DSR (proactivo) y AODV (reactivo), este último busca las rutas solo cuando se establece comunicación entre nodos, lo que evita costosas actualizaciones de la tabla de enrutamiento e intercambios de rutas que quizás nunca se utilicen. Los resultados obtenidos muestran que el protocolo AODV tiene aceptable desempeño frente a DSR cuando operan desde 80 hasta 250 nodos. A mayor cantidad de nodos, la redundancia de paquetes enviados a nodos de destino provoca retardos, la tasa de paquetes recibidos se ve afectada y la carga de tráfico se afecta también.
4. La conclusión del objetivo general, establece como aportación la cantidad considerable de nodos en la detección de una variable de interés que asegura calidad de comunicación entre los nodos de la red, manteniendo niveles aceptables de consumo energético. Las aplicaciones de monitoreo de variables

de interés de salto a salto de la comunicación en estas redes inalámbrica basado en el modelo de reporte de datos, aseguran la efectividad en la calidad de la red cuando el protocolo de enrutamiento es de tipo reactivo. La QoS implica satisfacer una cierta métrica o una combinación de varias métricas de calidad, los resultados demuestran que después de nodo 250 la red se vuelve inestable. Hay más paquetes perdidos, se consume energía por retransmisiones entre nodos.

Recomendaciones

Se recomienda desarrollar escenarios de simulación en topología malla y árbol utilizando protocolos de enrutamiento para nodos móviles.

Los profesionales e investigadores deben conocer sobre actualizaciones del simulador NS-3, de manera que el usuario maneje adecuadamente los módulos y librerías mientras realiza simulaciones.

Se recomienda recursos de hardware y software modernos (servidor o GPU), pues las simulaciones con densidad de nodos altas y los ambientes de predicción y gráficas suelen tardar muchas horas.

Los procesadores gráficos o GPU son tendencia para desarrollo de ambientes de simulación para miles de nodos y en topologías *cluster tree*.

El uso de programación paralela es trabajo a futuro, así como el diseño de algoritmos en aprendizaje de máquina para que sea eficiente en cuanto a censado, procesamiento y comunicación entre nodos de una WSN.

Bibliografía

- Akyildiz, Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cay, E. (2002). *Wireless sensor networks: A survey*.
- Alvarado, G. (2013). *Simulación de una red inalámbrica de sensores en Industrias de gas y petróleo*. Obtenido de Tesis Maestría. ESPOL: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/95909/D-84248.pdf>
- Cama, A., Acosta, M., Piñeres, G., Caicedo, J., & Zamora, R. (2016). *Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia*. Obtenido de ngeniare. Rev. chil. ing. vol.24 no.4 Arica oct. 2016: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052016000400005
- Capella, J. (2010). *Redes inalámbricas de sensores: una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos*. Obtenido de Tesis Doctoral Universidad de Valencia: <https://pdfs.semanticscholar.org/c4cc/bc4e7d8492dfa350ed75faff9e01659607d.pdf>
- CORDIS. (2013). *Tecnología inalámbrica mejorada aplicada a sensores e implantes corporales*. Obtenido de <https://cordis.europa.eu/news/rcn/35905/es>
- Electronicshub. (2019). *Conceptos básicos de las redes inalámbricas de sensores (WSN). Clasificación, topologías y aplicaciones*. Obtenido de <https://www.electronicshub.org/wireless-sensor-networks-wsn/>
- Maharrey, B., Lim, A., & Gao, C. (2012). *Interconexión entre redes IP y redes inalámbricas de sensores*. Obtenido de <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2012/567687>
- Maroto, S. (2010). *Desarrollo de aplicaciones WSN*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8592/PFC%20-%20DESARROLLO%20DE%20APLICACIONES%20BASADAS%20EN%20WSN.pdf>

- Montoya, A., & Ovalle, D. (2012). *PERFORMANCE EVALUATION OF WIRELESS SENSOR NETWORKS IMPROVED WITH MOBILE AGENTS*. Obtenido de Rev.EIA.Esc.Ing.Antioq no.17 Envigado Jan./June 2012: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372012000100012
- 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>
- Palacios, E., Philco, O., & Bastidas, T. (2019). *Analyzing And Improving Quality Of Sensing In Wireless Sensor Network*. Obtenido de IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON): DOI: 10.1109/CHILECON47746.2019.8987604
- Park, M. (2016). *IEEE 802.11ah: Sub-1-GHz license-exempt operation for the internet of things*. Obtenido de DOI: 10.1109/MCOM.2015.7263359
- Philco, O. (2019). *Protocolos de Enrutamiento de WSN*.
- 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>
- Ravi. (2019). *Basics of Wireless Sensor Networks (WSN) | Classification, Topologies, Applications*. Obtenido de <https://www.electronicshub.org/wireless-sensor-networks-wsn/>
- Riva, G. (2015). *Protocolos para el Procesamiento Distribuido de Funciones de Umbral en Red de Sensores Inalámbricos*. Obtenido de Tesis doctoral. Universidad Nacional de Córdoba: <https://www.google.com/search?q=las+ubicaciones+de+los+nodos+de+sensores+no+est%C3%A1n+disponibles+a+priori.+Sin+embargo,+los+nodos+sensores+deben+trabajar+de+manera+din%C3%A1mica.+El+esquema>

+din%C3%A1mico+es+m%C3%A1s+escalable+y+flexible,+pero+requiere+d

Saldaña, D. (2012). *Modelo de Detección y Seguimiento de Anomalías en Entornos Monitoreados por Agentes Robóticos Inteligentes*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <http://bdigital.unal.edu.co/8441/1/1037580679.2012.pdf>

Shabbir, N., & Rizwan, S. (2017). *Protocolos de enrutamiento para redes de sensores inalámbricos (WSN)*. Obtenido de Redes inalámbricas de sensores - Perspectivas e innovaciones, Philip Sallis, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.70208. : <https://www.intechopen.com/books/wireless-sensor-networks-insights-and-innovations/routing-protocols-for-wireless-sensor-networks-wsns->

Sharma, G., Bala, S., & Ajay, V. (2010). *Comparison of Flooding and Directed Diffusion for Wireless Sensor Network*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/224112677_Comparison_of_Flooding_and_Directed_Diffusion_for_Wireless_Sensor_Network

Tara, S., & Raj, J. (2017). *A Survey of Protocols and Standards for Internet of Things*. Obtenido de eprint: Advanced Computing and Communications, Vol. 1, No. 1, March 2017.

Vázquez, G. (2014). *Implementación de una red inalámbrica de sensores con dispositivos Libelium*. Obtenido de Universidad Autónoma Metropolitana: <http://148.206.53.84/tesiuami/UAMI17347.pdf>

Vega, E. (2015). *Desarrollo de protocolo de enrutamiento híbrido basado en onas para redes MANET*. Obtenido de Tesis de Maestría. Universidad de Sevilla: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70542/fichero/Proyecto+Fin+de+Master.pdf>

Villalba, Á. (2015). *Aplicación de una red inalámbrica de sensores para detección de presencia y conteo*. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90408/fichero/Aplicaci%C3%B3n+de+una+red+inal%C3%A1mbrica+de+sensores+para+detecci%C3%B3n+de+presencia+y+conteo.Final.pdf>

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>

GLOSARIO

ACK: Acknowledgement

AODV: Ad-hoc On-demand Distance Vector protocol

DSDV: Destination-Sequenced Distance-Vector

DSR: Dynamic Source Routing protocol

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT: Internet of Things

IP: Internet Protocol

ISM: Industrial, Scientific and Medical radio band

LAN: Local Area Network

LEACH: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

M2M: Machine to Machine

MAC: Media Access Control

MPR: Multipoint Relays)

OLSR: Optimized Link State Routing Protocol

PAN: Personal Area Network

PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems

QoS: Quality of Service

RERR: Route Error

RF: Radio Frequency

RREP: Route Reply

RREQ: Route Request

SDN: Software Defined Networking

SOA: Service Oriented Architecture

SPIN: (Sensor Protocols for Information via Negotiation,

TDMA: Time Division Multiple Access

TEEN: Threshold Sensitive to The Energy Efficiency Sensor Network

TSCH: Time Synchronized Channel Hopping

WLAN: Wireless Local Area Network

WSN: Wireless Sensor Networks

ZDO: ZigBee Device Object


DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Cindy Elizabeth Sisalema Rivera**, con C.C: # **0926020173** autor/a de la Tesis de Maestría titulada: **Incidencia del consumo energético en la calidad de servicio QoS de una red del estándar IEEE 802.15.4**, previo a la obtención del título de **Magíster en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

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

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

Guayaquil, a los 13 días del mes de julio del 2020



Nombre: **Cindy Elizabeth Sisalema Rivera**
C.C: **0926020173**



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



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



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

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA		
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN		
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Incidencia del consumo energético en la calidad de servicio QoS de una red del estándar IEEE 802.15.4	
AUTOR(ES)	Cindy Elizabeth Sisalema Rivera	
REVISOR(ES)/TUTOR	MSc. Edgar Quezada Calle; MSc. Luis Córdova Rivadeneira / MSc. Manuel Romero Paz	
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	
FACULTAD:	Sistema de Posgrado	
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones	
TITULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones	
FECHA DE PUBLICACIÓN:	Guayaquil, a los 13 días del mes de julio del 2020	No. DE PÁGINAS: 85
ÁREAS TEMÁTICAS:	Ecosistema IoT, Red de Sensores Inalámbricos, Elementos de WSN, Topologías de Red, Protocolos WSN, Redes Inalámbricas	
PALABRAS CLAVES/ KEY-WORDS:	WSN, IEEE 802.15.4, QoS, AODV, Enrutamiento, Algoritmos	
RESUMEN/ABSTRACT: Se estudia la incidencia del consumo energético de nodos típicos de una red de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network, WSN) y la calidad de servicio (Quality of Service, QoS) de una red del estándar IEEE 802.15.4. El modelo de comunicación adecuado debe garantizar la QoS necesaria (por ejemplo, la consistencia temporal y espacial de los datos de los sensores distribuidos para una correcta cooperación y coordinación de los nodos). La metodología empleada es bibliográfica por la recolección de fuentes científicas para elaborar un estado del arte actualizado del desempeño de las redes de sensores inalámbricos con calidad de servicio, también es pre-experimental por el manejo de un simulador para evaluar dos protocolos de enrutamiento tipo reactivo (DSR y AODV), enrutamiento vector-distancia o enrutamiento enlace-estado para aplicaciones en coberturas medianamente densas (redes de 300 y 500 nodos), cantidad promedio de sensores en el monitoreo de variables de interés para sectores de una ciudad. El resultado o aportación es la valoración de consumo energético y su efecto en métricas de desempeño de la QoS manipulando dos protocolos de enrutamiento reactivos. El simulador utilizado es NS-3.		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO AUTORES:	Teléfono: +593-961400015	E-mail: csisalema@outlook.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Romero Paz Manuel de Jesús	
	Teléfono: +593-994606932	
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec	

SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA	
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):	
Nº. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):	