



POSGRADOS

MAESTRÍA EN TELEMÁTICA

RPC-SO-01-NO.025-2021

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

DESARROLLO DE UNA RED HÍBRIDA
LORAMESH-LORAWAN PARA AMPLIAR
LA COBERTURA DE LA RED LO-
RAWAN

AUTOR:

DANIEL EDUARDO ALMEIDA CORREA

DIRECTOR:

JUAN PAUL INGA ORTEGA

CUENCA – ECUADOR
2025



Autor:**Daniel Eduardo Almeida Correa**

Ingeniero en Telecomunicaciones

Candidato a Magíster en Telemática por la
Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

dalmeidac@est.ups.edu.ec

Dirigido por:**Juan Paul Inga Ortega**

Ingeniero Electrónico

Magíster en Gestión de las Telecomunicaciones

Docente Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

jinga@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2025 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

DANIEL EDUARDO ALMEIDA CORREA

Desarrollo de una red híbrida LORAMESH-LORAWAN para ampliar la cobertura de la red
LORAWAN

Dedicatoria

Dedico el presente trabajo a mis padres, familia y amigos que me han apoyado continuamente durante la elaboración de este trabajo de titulación.

Agradecimientos

Agradezco al grupo de Investigación de telecomunicaciones y telemática GITEL por haberme apoyado en el desarrollo e implementación del presente trabajo de titulación y haberme brindado también apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Agradezco principalmente a los profesores Juan Inga, Esteban Ordóñez y Mónica Huerta por estar siempre pendientes de mis avances y apoyo continuo a nivel profesional y personal.

Índice general

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Índice General	iv
Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	vi
Resumen	vii
Abstract	ix
1 Introducción	1
2 Determinación del Problema	7
3 Marco Teórico Referencial	9
3.1 Introducción al Internet de las Cosas (IoT)	9
3.2 Redes de sensores inalámbricos	9
3.2.1 Ventajas de las WSN y sensores inalámbricos:	11
3.2.2 Desafíos:	11
3.2.3 Topologías y Protocolos en WSN	14
3.3 LoRa y LoRaWAN	23
3.3.1 Lora	23
3.3.2 LoRaWAN	23
3.3.3 Aplicaciones de LoRa y Requerimientos de múltiples saltos	26
3.3.4 Consideraciones para el diseño de una red multi-hop LoRa	27
4 Materiales y Metodología	30
4.1 Materiales	30
4.2 Metodología	32

4.2.1	Enfoque Metodológico	32
4.2.2	Fases del Desarrollo	33
4.2.3	Matriz de Pesos	36
4.2.4	Algoritmo de Dijkstra	37
4.2.5	Creación de la cabecera	38
4.2.6	Obtención de Rutas	38
4.2.7	Construcción de la Tabla de Enrutamiento	38
5	Resultados y discusión	45
5.1	Resultados	45
6	Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros	50
6.1	Conclusiones	50
6.2	Recomendaciones	50
6.3	Trabajos Futuros	51
	Referencias	52

Índice de figuras

3.1 Partes de un Nodo Sensor fuente: elaboración Propia fundamentado en Teja, 2024.	14
3.2 Clasificación de los protocolos de enrutamiento en WSN Abdullah et al., 2014	16
3.3 Comparación de tecnologías de comunicaciones inalámbricas usadas para aplicaciones en el Internet de las Cosas	21
3.4 Características Claves de las redes LPWAN	21
3.5 LoRaWAN Dispositivo Clase A	24
3.6 LoRaWAN Dispositivo Clase B	24
3.7 LoRaWAN Dispositivo Clase C	25
3.8 LoRa y LoRaWAN	25
4.1 Matrices del protocolo de enrutamiento	36
4.2 Cabecera del protocolo de enrutamiento	39
4.3 Diagrama de flujo del protocolo de enrutamiento en el nodo LoRa	40
4.4 Diagrama de flujo del protocolo de enrutamiento en el Mini-Gateway	40
4.5 Módulos de la RED híbrida LoRa-LoRaWAN	41
4.6 Separación de las capas ocupadas del Modelo OSI	42
4.7 PDR Discovery Storm.	43
4.8 Ubicación de nodos	44
5.1 PDR: Discovery Storm	45
5.2 PDR en 0dBm	46
5.3 PDR en 7dBm	46
5.4 PDR en 14dBm	47

Índice de cuadros

4.1	Comparación de módulos ESP32 con LoRa y otras características	31
4.2	Comparación de gateways LoRaWAN: SenseCAP M2 vs Milesight UG67	31
4.3	Configuración de LoRa para los módulos REYAX RYLR998	43
4.4	Configuración de LoRaWAN para el módulo Heltec Wireless Stick V3	43
4.5	Coordenadas de los nodos en orden numérico	44
5.1	Comparación del número de mensajes con rutas de más de un salto	47
5.2	Distribución del tamaño de la cabecera y cálculo del número máximo de nodos	48
5.3	Distribución del tamaño de la cabecera y cálculo del número máximo de nodos con payload por nodo	49

Resumen

El presente trabajo desarrolla una red híbrida LoRaMesh-LoRaWAN con el objetivo de extender la cobertura de redes LoRaWAN tradicionales en entornos desafiantes y de difícil acceso. Útil en aplicaciones como la agricultura, donde muchas veces el terreno a cubrir es extenso. La topología estrella de LoRaWAN presenta limitaciones en cuanto a escalabilidad y cobertura. Su implementación se dificulta en ciertas aplicaciones de IoT, especialmente en áreas rurales y urbanas con obstáculos físicos.

Así, este trabajo se enfoca en una propuesta basada en el algoritmo de Dijkstra para calcular rutas óptimas en donde se combina anuncios periódicos de vecindad y la construcción de una matriz de adyacencia para representar la topología de la red. Además, se menciona el uso de múltiples saltos y un mini gateway que actúa como intermediario entre los nodos LoRa y el gateway principal usando LoRaWAN. Es decir se trata de una propuesta de implementación de un protocolo de enrutamiento proactivo basado en el estado de los enlaces, donde los nodos intercambian información periódica sobre sus vecinos para construir una visión global de la red. Dichas características corresponden a un protocolo de enrutamiento de estado de enlace (OLSR), aunque con algunas adaptaciones específicas al caso de uso.

Además, las rutas son seleccionadas en función de la calidad del enlace, que se calcula en función de los parámetros de mensajes LoRa: RSSI, SNR y la carga de batería de los nodos.

Las pruebas realizadas evaluaron la efectividad de la red híbrida en términos de tasa de entrega de paquetes y muestra que existe una tasa de pérdida de paquetes promedio de 50%. Los resultados muestran que la solución permite ampliar la cobertura y fiabilidad de la comunicación en comparación con una implementación estándar de LoRaWAN. Se identificaron áreas de optimización para futuras mejoras, como la reducción de paquetes duplicados y el análisis del rendimiento en escenarios de mayor escala.

Palabras clave: LoRa, LoRaWAN, Redes de Malla, Internet de las Cosas IoT, Algoritmo de Dijkstra, Redes Híbridas, Enrutamiento.

Abstract

This work develops a hybrid LoRaMesh-LoRaWAN network with the objective of extending the coverage of traditional LoRaWAN networks in challenging and difficult-to-access environments. This would be useful in applications such as agriculture, where the terrain to be covered is often extensive. The LoRaWAN star topology has limitations in terms of scalability and coverage. Its implementation is difficult in certain IoT applications, especially in rural and urban areas with physical obstacles.

Thus, this paper focuses on a proposal based on Dijkstra's algorithm to compute optimal routes where periodic neighborhood advertisements and constructing an adjacency matrix are combined to represent the network topology. In addition, multiple hops and a mini gateway that acts as an intermediary between the LoRa nodes and the main gateway using LoRaWAN are mentioned. In other words, this is a proposed implementation of a proactive routing protocol based on a link-state, where nodes exchange periodic information about their neighbors to build a global view of the network. Such features correspond to an Optimized link state routing protocol (OLSR), albeit with some use-case-specific adaptations. In addition, the routes are selected based on the link quality, which is calculated based on the LoRa message parameters: RSSI, SNR, and the battery load of the nodes.

The tests evaluated the hybrid network's effectiveness in terms of packet delivery rate and showed an average packet loss rate of 50%. The results show that the solution allows for extended communication coverage and reliability compared to a standard LoRaWAN implementation. Optimization areas for future improvements were identified, such as duplicate packet reduction and performance analysis in larger-scale scenarios.

Keywords: LoRa, LoRaWAN, Mesh Networks, Internet of Things IoT, Dijkstra Algorithm, Hybrid Networks, Routing.

1. Introducción

En 2009, en Francia, Nicolas Sornin, Olivier Seller y François Sforza crearon una empresa conocida como Cycleo cuyo objetivo fue incorporar comunicación inalámbrica en la industria de la medición, específicamente en medidores de agua, gas y electricidad. Inicialmente, utilizaron una tecnología llamada Espectro Ensanchado por Señales Chirp (*CSS*, del inglés *Chirp Spread Spectrum*), ampliamente empleada tanto en la aviación, como en el transporte marítimo Slats, 2020.

La transmisión usando *CSS*, modula y codifica el paquete de datos. los representa como símbolos en ondas de radio usando pulsos tipo chirp Thiasiriphet y Teich, 2021. Esta modulación genera una señal con forma de onda cambiante que varía aumentando o disminuyendo linealmente con el tiempo thethingsNetwork, s.f.

CSS se caracteriza por su gran flexibilidad para ofrecer compensaciones entre la sensibilidad de recepción y el rendimiento, adaptándose a diversas necesidades.

Uno de los parámetros más importantes es el factor de propagación (*SF*, del inglés *Spread Factor*) es el parámetro más importante en la modulación *CSS* porque modifica el tiempo de símbolo y, por tanto, la tasa de transmisión. El aumento del *SF* puede extender significativamente el rango de comunicación, pero tiene como costo la reducción de la tasa de bit.

El ancho de banda (*BW*, del inglés *Band With*) es otro parámetro ajustable. Al aumentar, él *BW* mejora la velocidad de comunicación y, al mismo tiempo, proporciona una mejor inmunidad al ingreso de ruido de banda estrecha Kim et al., 2019.

Por otra parte, en 2012, cuando la empresa Semtech, que manejaba servicios de computación en la nube, así también, proyectos IoT y semiconductores de alta eficiencia “Semtech Corporation | Company Overview | Semtech”, s.f., convencida de las capacidades de largo alcance y bajo consumo de potencia de *CSS*, compra Cycleo con la finalidad de ampliar su cartera de productos y ofrecer soluciones de comunicación inalámbrica más completas a sus clientes Slats, 2020. Semtech colabora con Nicolas, Olivier y François, propulsores para el uso de *CSS*, con el objeto de mejorar la tecnología y resultando en tecnología de comunicación Largo Alcance (*LoRa*, del inglés *Long Range*).

Así es el surgimiento de **LoRa**, la cual es una modulación que permite el despliegue de comunicaciones inalámbricas especialmente pensada para ser utilizada en redes de área amplia de baja potencia (**LPWAN**, del inglés *Low Power Wide Area Network*). Sus principales características son largo alcance y bajo consumo de energía. Además, **LoRa** usa un esquema de modulación de espectro ensanchado patentado, pero ahora abierto al público, que surge de **CSS**. Intercambia la velocidad de transmisión de datos por el incremento en la sensibilidad dentro de un ancho de banda de canal fijo Semtech, 2015. Al utilizar el principio de **CSS**, la hace altamente atractiva para aplicaciones que exigen una comunicación entre grandes distancias, enfatizando un mínimo consumo de energía Nguyen et al., 2019. Entonces, **LoRa** está diseñada para permitir conexiones inalámbricas de baja tasa de bits en distancias considerablemente extensas.

En la actualidad, **LoRa** es utilizada como tecnología de acceso para permitir la interconexión de dispositivos utilizados en el Internet de las Cosas (**IoT**, del inglés *Internet of things*) debido sus características principales: Largo alcance, soporte para transmitir datos sobre varios Km de distancia, bajo consumo de energía, y además una **baja tasa de transmisión** Sole et al., 2022 y su fuerte resistencia a interferencias Marchese et al., 2019. Es importante destacar que esta baja tasa de transmisión hace que **LoRa** no sea la elección adecuada para aplicaciones que requieran transmisiones de alta velocidad, como llamadas en tiempo real y streaming de video. En tales casos, donde la velocidad de transferencia de datos es crítica, otras tecnologías de comunicación pueden ser más apropiadas. No obstante, para un surtido grupo de aplicaciones de IoT, como la vigilancia ambiental, la gestión de activos o la telemetría generada en distintas aplicaciones, la destreza de transmisión de datos de manera eficiente y fiable a una baja tasa de transmisión es altamente ventajosa, debido a su adaptabilidad a las necesidades únicas de dichas aplicaciones. Estas características hacen que **LoRa** sea una tecnología versátil y confiable para el intercambio de datos de los nodos en el Internet de las Cosas.

El uso de una baja tasa de transmisión en la tecnología **LoRa** es especialmente atractivo para su aplicación en el Internet de las Cosas (**IoT**) por varias razones clave. En primer lugar, esta característica contribuye significativamente a la eficiencia energética, lo que es fundamental para dispositivos IoT que a menudo funcionan con baterías de larga duración. La transmisión de datos a una baja tasa requiere menos energía en comparación con tecnologías de alta velocidad, lo que prolonga la duración de las baterías y reduce la necesidad para su reemplazo o recarga frecuente.

Además, a medida que disminuye el ancho de banda, aumenta la sensibilidad del receptor, por esta razón es posible transmitir paquetes a mayor distancia con la misma potencia de señal. Esto significa que la potencia de la señal requerida disminuye para una transmisión a la misma distancia. Al ser el ancho de banda directamente proporcional a la tasa de transmisión

del chirp, el uso de un ancho de banda más bajo significa un aumento en el tiempo de transmisión. Asimismo, aumentar el valor de SNR (SNR, del inglés *Signal to Noise ratio*) Kim et al., 2019 mejora el rendimiento de LoRa. Dos parámetros, el SF y la tasa de codificación (CR, del inglés *Code Rate*), afectan la cantidad del vínculo señal a ruido.

Para el despliegue exitoso de aplicaciones que utilizan LoRa, la Alianza LoRa ha demostrado ser un facilitador invaluable.

Gracias a la Alianza LoRa, se ha logrado crear un ecosistema sólido que impulsa la innovación y la interoperabilidad, permitiendo que estas aplicaciones prosperen en diversos sectores. Su compromiso con la estandarización y las directrices ha allanado el camino para una implementación más amplia y efectiva de LoRa, lo que ha llevado a un crecimiento significativo en la aceptación de esta modulación en todo el mundo thethingsNetwork, s.f.

La Alianza LoRa es una asociación sin fines de lucro dedicada al desarrollo del protocolo de comunicación LoRaWAN, así como a garantizar la interoperabilidad de sus productos y tecnologías asociadas. También promueve el uso y adopción de esta tecnología thethingsNetwork, s.f.

El 7 de diciembre de 2021, la Alianza anuncia que LoRaWAN es oficialmente aprobada como estándar por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, del inglés *International Telecommunications Union*). Este estándar es titulado Recomendación ITU-T Y.4480-“Protocolo de baja potencia para redes inalámbricas de área amplia” “LoRaWAN® Formally Recognized as ITU International Standard for Low Power Wide Area Networking - LoRa Alliance®”, s.f. A medida que avanza 2023, la LoRa Alliance ha atraído alrededor de 500 miembros en todo el mundo, consolidando su posición como una fuerza impulsora en el crecimiento y la adopción global de LoRaWAN thethingsNetwork, s.f.

La diferencia entre LoRa y LoRaWAN está en que la primera se encarga de la capa tangible o física que permite la generación y captura de señales usadas en el envío de datos mientras que la segunda, LoRaWAN, se encarga de la gestión de en la segunda capa, en la que se enlazan los datos; se puede decir que LoRaWAN actúa como protocolo de la capa 2 y 3 según el modelo OSI BECOLVE, 2022, INCIBE, 2023.

Entonces, según lo que antes se indicó, la modulación LoRa constituye el nivel físico de la red que fue desarrollada por Semtech. LoRa opera sobre las que no requieren licencia de operación, como las bandas Industriales, Científicas y Médicas (ISM, del inglés *Industrial, Scientific and Medical*), con las principales siendo EU-433, CN-470, EU-868, US-915, AU-915 y KR-923 “Regional Parameters | The Things Network”, s.f. Por lo tanto, LoRaWAN es considerado un protocolo de comunicación desarrollado por la Alianza LoRa y opera en la capa de red, llegando a manejar la tecnología LoRa como base Kim et al., 2019. En el protocolo LoRaWAN se distinguen tipos de nodos según su funcionamiento, enfocado en las transmisiones: Clase A, Clase B y Clase C.

La rápida adopción de la tecnología LoRa ha generado un creciente interés en desarrollar configuraciones de red que ofrezcan una infraestructura de recolección de datos confiable. Se buscan características clave como la robustez, eficiencia en el uso de la energía con larga duración de las baterías, seguridad de datos, anticolidión de paquetes y administración de información, aprovechando el largo alcance que esta tecnología permite Basili et al., 2021.

Así, es posible encontrar casos de aplicación como el presentado en Kim et al., 2019, donde se propone un Campus de energía inteligente que busca optimizar el uso de los recursos energéticos en el campus. Esto se logra mediante el uso de dispositivos LoRa ubicados en áreas donde Wi-Fi no permite alcanzar a controlar y monitorear dispositivos debido a su limitada cobertura.

Entonces, al determinar si diversos lugares tales como aulas o áreas remotas del campus universitario están ocupados o vacíos, el uso de LoRa para el envío de datos permitiría lograr una gestión eficiente del control de la iluminación, ahorrando energía en espacios desocupados. En Chanwattana-pong et al., 2021, se centran en mejorar la productividad de la producción agrícola al aprovechar la eficacia y el bajo costo de los nodos inalámbricos con sensores para recolectar información relacionada con los cultivos. Estos nodos cuentan con sensores de humedad del suelo, temperatura, humedad, gotas de lluvia e intensidad de luz, y tienen capacidad de conexión mediante LoRa y Wi-Fi. Esta integración de tecnologías en un solo nodo sensor posibilita un monitoreo eficiente de diversas variables ambientales en la red agrícola, lo que resulta en una gestión más precisa y eficaz de los recursos agrícolas.

En las redes LoRaWAN tradicionales como es el caso de los ejemplos anteriores, la topología de red es estrella, lo que implica que el protocolo solo permite un salto de comunicación entre los dispositivos finales y el dispositivo que opera como puerta de enlace (en inglés *gateway*) entre el dispositivo LoRa y el acceso a internet con LoRaWAN Lalle et al., 2021. Además, se debe mencionar que las aplicaciones en donde se da uso a LoRa son similares o tienen el mismo contexto que las aplicaciones basadas en LoRaWAN. Sin embargo, aprovechar la gestión de la capa de enlace de datos de LoRaWAN, permite brindar seguridad a través de encriptación en el proceso de comunicación entre los nodos sensores y el servidor de red.

No obstante, se identifica problemas de acceso en diversas aplicaciones, sobre todo por limitaciones debidas al radio de cobertura a pesar de lograr alcanzar conectividad a varios Km. Por ejemplo, en el caso del Campus de Energía Inteligente propuesto por Kim et al., 2019, uno de los problemas planteados es la posibilidad de que el gateway LoRa no se comunique con un nodo ubicado en la esquina más alejada del campus. Esto se debe a factores como la topología irregular del terreno y las interrupciones a la línea de vista que también pueden incidir en la calidad de la propagación de las ondas de

radio usadas por LoRa Lalle et al., 2021. En consecuencia, estos factores reducen el alcance entre los nodos sensores y el equipo *gateway*. También, la cobertura de una red LoRaWAN en una ciudad puede verse obstaculizada por el entorno de propagación, donde los sensores a veces se colocan bajo tierra o en lugares con fuerte atenuación electromagnética Dias y Grilo, 2020. Entonces, la idea de agregar más puertas de enlace LoRaWAN para mejorar la cobertura y evitar pérdida de paquetes no resulta una solución adecuada debido a varias razones, incluida la necesidad de alimentación de corriente alterna (CA) limitada, costos elevados de implementación y ubicación de las puertas de enlace Lalle et al., 2021, Dias y Grilo, 2020.

Como alternativa para mejorar la cobertura, en muchos escenarios el uso de un enfoque multi-hop puede resultar atractivo. Este enfoque puede garantizar la conectividad de los dispositivos, proporcionando nuevas rutas en caso de fallas en la red.

Sin embargo, la elección entre enrutamiento y uso de nodos repetidores debe considerarse cuidadosamente para optimizar la cobertura y la eficiencia energética en la red LoRaWAN Rodrigues Cotrim et al., 2022. En los siguientes párrafos se expanden algunos de los casos de aplicación de soluciones multi-hop ensayados.

En Dias y Grilo, 2020, se presenta una extensión de LoRaWAN que permite la transmisión multi-salto de datos desde los nodos de sensores hasta una estación base. Dicho trabajo incluye una descripción detallada de la implementación del protocolo de comunicación y los mecanismos utilizados. En este sentido, la propuesta está en usar varios nodos que actúen como repetidores entre el *gateway* principal que da acceso a internet a la red y los nodos sensores. Sin embargo, los nodos sensores (finales) pueden llegar a generar un alto número de datos que no es posible manejar para los nodos repetidores, generándose un cuello de botella en el flujo de datos. Por tanto, propone varias mejoras que podrían ser consideradas en futuros trabajos, tales como Dias y Grilo, 2020:

- Identificar la topología que permita reducir el cuello de botella en el flujo de datos y así de soporte a la red para manejar un mayor número de nodos.
- Analizar el consumo de energía de los nodos que funcionan con una fuente de energía externa.
- Agregar capacidad de enlace descendente para permitir la confirmación de recepción de paquetes, la configuración de nodos y el control de actuadores.
- Integrar un mecanismo de control de potencia de transmisión (TPC).
- Por último, considerar métricas diferentes al número de saltos para establecer rutas multi-salto.

En Basili et al., 2021 presentan el dispositivo de retransmisión que denominan *Relay-Gtw* en una red LoRaWAN para darle capacidad multi-hop. Este dispositivo actúa como un intermediario, capaz de recibir datos de múltiples sensores debido a sus capacidades de hardware y fuente de energía fija que en teoría resuelve el cuello de botella identificado en el trabajo antes analizado. Los resultados de las pruebas realizadas en un campus universitario muestran que esta solución de retransmisión es efectiva para extender la red y proporcionar conectividad en áreas remotas, con un aumento del 50 % en la entrega de paquetes en comparación con la transmisión directa utilizando SF7. Además, la implementación de *Relay-Gtw* cambia la topología de la red hacia un enfoque multi-hop sin la complejidad de utilizar protocolos de enrutamiento y obteniendo una topología jerárquica. Para futuros trabajos señalan la necesidad de investigar más sobre la sincronización y el control de los dispositivos de *Relay-Gtw* en la red LoRaWAN multi-hop.

Los autores de Centelles et al., 2024 proponen un protocolo de enrutamiento de vector de distancia minimalista para abordar desafíos en redes de malla LoRa. Este protocolo busca resolver problemas de escalabilidad limitada, alto consumo de energía y complejidad de algoritmos de enrutamiento existentes. La propuesta ofrece una solución simple, eficiente y escalable para redes LoRa, especialmente apta para dispositivos de bajo consumo.

LoRaMesher es una biblioteca presentada en el trabajo de investigación realizado Sole et al., 2022. Usa un protocolo de enrutamiento de vector distancia implementada en C++ y está diseñada para su inclusión en el código que se ejecuta en nodos LoRa utilizados en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Estos nodos suelen consistir en microcontroladores integrados con capacidades de comunicación inalámbrica que utilizan radios LoRa para la transmisión de datos. La función principal de LoRaMesher es permitir que un nodo LoRa se integre en una red de malla LoRa, facilitando la transmisión, enrutamiento y recepción de paquetes LoRa entre los diferentes nodos que componen la red.

Esta biblioteca se distingue por su disponibilidad como código fuente abierto y su valor fundamental radica en su capacidad para abrir nuevas oportunidades en el ámbito de las aplicaciones de IoT que requieren redes de malla LoRa. Estas aplicaciones encuentran en LoRaMesher la herramienta esencial para desarrollar redes de malla LoRa y aprovechar al máximo la conectividad y comunicación entre los nodos en diversos escenarios de Internet de las Cosas. En esencia, LoRaMesher proporciona a los desarrolladores de IoT las herramientas necesarias para crear y desplegar eficazmente redes de malla LoRa, lo que amplía significativamente las posibilidades de aplicaciones IoT interconectadas y descentralizadas.

En trabajos futuros proponen realizar una evaluación más exhaustiva de la biblioteca LoRaMesher en diferentes escenarios; además, de la comparación con otras bibliotecas similares. También sugieren que se realice una implementación de la biblioteca en un entorno de red real.

2. Determinación del Problema

La topología estrella de la Red LoRaWAN presenta diferentes limitaciones para los dispositivos finales cuando buscan transmitir su información dentro de la red. Existen dificultades referentes a comunicación, escalabilidad y cobertura. Dentro de los problemas existentes en las redes LoRaWAN actuales se incluyen los siguientes:

- **Cobertura Limitada en entornos desafiantes** En áreas urbanas que tiene edificios y casas, zonas industriales con estructuras metálicas, o zonas geográficamente accidentadas como colinas, montañas y valles, Se generan interferencias y atenuación en las señales LoRa, Esto provoca una reducción en el alcance teórico de la tecnología, y también deja zonas muertas desde las que los dispositivos no pueden alcanzar el gateway directamente.
- **Escalabilidad y congestión en la Red** En redes con miles de dispositivos la topología estrella provoca congestión en los canales de comunicación, Esto aumenta la colisión de paquetes y la pérdida de datos, LoRaWAN por medio de Aloha puro intenta mitigar la colisión de paquetes, pero no es suficiente para satisfacer la demanda creciente de conexión a la red desde los dispositivos finales.
- **Consumo energético desigual** Los nodos más alejados del gateway deben transmitir a mayor potencia para mantener la conexión, Estos nodos agotan sus baterías más rápido que los nodos más cercanos al gateway, reduciendo así la vida útil de la red,
- **Limitaciones de LoRaWAN para múltiples saltos:** El protocolo LoRaWAN no tiene soporte nativo para enrutamiento múltiples saltos, ya que está diseñado para permitir la comunicación directa desde los nodos hacia el gateway. Esto según la aplicación y el caso de uso, obliga a la comunidad a crear soluciones personalizadas fuera del estándar.

El potencial de la red LoRaWAN para impulsar aplicaciones de distinta índole es innegable, para lograrlo, es necesario superar el desafío de la limitada cobertura actual en áreas urbanas y entornos geográficamente complejos. Por lo tanto, la propuesta de crear una red híbrida LoRaMesh-LoRaWAN,

donde los nodos de borde actúen como retransmisores de datos encapsulados provenientes de la red LoRa-Mesh en formato LoRaWAN para alcanzar el gateway, se presenta como una solución efectiva.

3. Marco Teórico Referencial

En el presente capítulo se abordan las bases teóricas necesarias para comprender las tecnologías y protocolos involucrados en la solución propuesta para el proyecto. En primer lugar, se abordan los principios fundamentales de las tecnologías empleadas en el trabajo.

A continuación, se describen las características y arquitecturas de estas tecnologías. Finalmente, se busca establecer un punto de partida sólido para el análisis posterior y la discusión de los resultados obtenidos.

3.1 Introducción al Internet de las Cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*) se refiere a millones de dispositivos o cosas conectados a Internet, tienen la capacidad de interactuar con su entorno por medio de sensores que convierten magnitudes físicas (como temperatura, humedad o movimiento) en señales eléctricas, y actuadores, que pueden realizar acciones físicas en respuesta a estas mediciones (por ejemplo, activar sistemas de riego, controlar la iluminación o ajustar la climatización).

Esta conexión de dispositivos abre una extensa gama de posibilidades para diversas aplicaciones basadas en el monitoreo de variables y automatización de procesos. Contribuyendo así al aumento de la eficiencia en diversos sectores y aplicaciones que van desde soluciones para ciudades inteligentes hasta aplicaciones para la agricultura de precisión Syed et al., 2021, Mrabet et al., 2020. Esto convierte al IoT en uno de los actores líderes que apoya al desarrollo de la tecnología Islam et al., 2023.

Para dar soporte al IoT, la conectividad es un aspecto fundamental que permite el intercambio eficiente de datos entre dispositivos. Para lograr una excelente conectividad, aparece en escena el concepto de redes de sensores inalámbricos (WSN, del inglés *Wireless Sensor Network*).

3.2 Redes de sensores inalámbricos

Las WSN están formadas por pequeños dispositivos, conocidos como cosas, sensores, nodos o dispositivos finales, que trabajan juntos para recopilar

y transmitir datos del entorno, desempeñan un rol crucial en una amplia gama de aplicaciones dentro de las cuales se encuentran el monitoreo ambiental, la atención médica, la agricultura y la automatización industrial, aplicaciones militares entre otras Daousis et al., 2024.

Las WSN están presentes en una gran variedad de escenarios, es debido a este motivo, que se han desarrollado múltiples protocolos y estándares para satisfacer los requisitos específicos de cada aplicación, ya que un solo protocolo de comunicación (o enrutamiento) no es suficiente para todas las situaciones Ahmad et al., 2024.

Los protocolos de enrutamiento son esenciales para la operación de las WSN, ya que descubren y mantienen las rutas de comunicación entre los nodos. La selección de un protocolo adecuado depende de diversos factores como: la eficiencia energética, número de dispositivos, tiempo de vida del mensaje, entre otros, en especial se debe considerar los requisitos específicos de la aplicación. La clasificación de estos protocolos se considera un área activa de investigación Abdullah et al., 2014, Bensaleh et al., 2020.

Al trabajar con WSN, es importante considerar que, en lo que respecta a la velocidad de transmisión de datos en un enlace de comunicación, no es necesario utilizar altas tasas de transmisión. Esto se debe a la naturaleza de las variables que se monitorean y a los actuadores empleados, que generalmente no demandan un gran ancho de banda.

No obstante, la búsqueda por incrementar el número de dispositivos conectados en una red IoT y la reducción de latencia a través del incremento de las tasas de transmisión son aspectos de mejora continua.

La creciente demanda de tecnologías de comunicación inalámbrica de corto y largo alcance, orientadas a un uso eficiente de la energía, ha llevado al desarrollo de diversas soluciones. En este contexto, las WSN se destacan como una tecnología valiosa y ampliamente utilizada en el Internet de las Cosas IoT.

En este contexto, las redes de área amplia de bajo consumo de potencia (LPWAN, del inglés Low Power Wide Area Network) se presentan como una solución prometedora para la conectividad de dispositivos IoT, ya que combinan un bajo consumo de energía con un amplio alcance, lo que las convierte en una opción eficiente y adecuada para diversos escenarios y aplicaciones Sharma y Kaur, 2021, Ghahroudi et al., 2023.

Las WSN, para aplicaciones como servicios basados en la ubicación, rastreo de activos, la gestión de desastres y la agricultura de precisión, dependen de la localización precisa de los nodos sensores para garantizar una operación eficiente Ahmad et al., 2024. No obstante, las WSN se enfrentan dificultades como la seguridad y el consumo de energía, lo cual pueden tener un impacto en la eficiencia de la red, especialmente en el contexto de IoT Faris et al., 2023, Kandris et al., 2020

3.2.1 Ventajas de las WSN y sensores inalámbricos:

- **Escalabilidad:** Las **WSN** permiten el despliegue de sensores que pueden ir desde unos pocos a varios de cientos o miles de nodos en función de la aplicación. Es importante utilizar la cantidad necesaria de sensores que permitan generar una visión completa del entorno Abdullah et al., 2014.
- **Densidad de red:** Una alta densidad de sensores en la red permite una cobertura más amplia y una mayor precisión en la recolección de datos. Esto es esencial para aplicaciones que requieren monitoreo detallado, ya que aumenta la resiliencia de la red y mejora la calidad de la información recopilada. Una mayor densidad de nodos facilita la localización precisa de activos y la implementación de servicios basados en la ubicación Ahmad et al., 2024.
- **Recursos:** La optimización del consumo de energía es crucial en las redes de sensores inalámbricos, donde los nodos a menudo dependen de baterías de corta duración. Para prolongar la vida útil de la red es necesario implementar algoritmos que permitan la gestión inteligente de recursos limitados. Estos algoritmos pueden incluir técnicas de compresión de datos, enrutamiento y programación de sueño, que minimizan el uso de energía al reducir la cantidad de datos transmitidos y el tiempo en que los nodos están activos. La implementación de estas estrategias no solo mejora la eficiencia operativa de la red, sino que también permite un monitoreo continuo y confiable en aplicaciones críticas, como la agricultura de precisión, monitoreo en tiempo real, entre otras Meyer et al., 2010a, Kandris et al., 2020.
- **Costos:** En las **WSN** la implementación y mantenimiento de la red va a depender de la aplicación. Los costos asociados a los sensores son altamente variables y dependen directamente de sus características. En el mercado se pueden encontrar sensores especializados, con mayor rango, precisión o capacidad de procesamiento, estos tienden a ser más costosos. Por otra parte, se pueden encontrar también sensores de bajo costo para aplicaciones básicas. Es importante considerar el tipo de sensor requerido para cada aplicación específica, ya que un sensor excesivamente costoso puede incrementar significativamente el presupuesto total del proyecto, mientras que un sensor de baja calidad podría comprometer la precisión y fiabilidad de los datos obtenidos Rawat et al., 2014, Albeyboni y Ali, 2023.

3.2.2 Desafíos:

- **Conservación de energía** La limitada capacidad de las baterías de los nodos obliga a implementar estrategias eficientes para conservar ener-

gía y prolongar la vida útil de la red.

- **Comunicaciones de baja calidad** En condiciones ambientales adversas, la calidad de la comunicación puede verse comprometida, lo que dificulta la transmisión efectiva de datos entre nodos.
- **Operaciones en ambientes hostiles** Las redes de sensores deben contar con protocolos robustos que garanticen su funcionalidad y continuidad operativa ante posibles fallos en entornos difíciles.
- **Conectividad en redes dinámicas y móviles** La movilidad de los nodos y la naturaleza cambiante de las redes presentan retos en el mantenimiento de la conectividad y la comunicación entre ellos, especialmente debido al efecto doppler.
- **Recursos computacionales y de almacenamiento en los nodos** Las limitaciones en el poder de procesamiento y la capacidad de almacenamiento de los nodos requieren el uso de algoritmos y protocolos optimizados que se adapten a estas limitaciones.
- **Gestión eficiente del ancho de banda y la congestión de la red** La congestión de la red y el uso limitado del ancho de banda demandan soluciones que optimicen la transmisión de datos y minimicen la latencia.
- **Seguridad y privacidad** La protección de los datos transmitidos y la privacidad de la información son desafíos críticos, ya que las redes son susceptibles a ataques maliciosos y vulnerabilidades.
- **Escalabilidad y gestión de la red** A medida que el número de nodos aumenta, se presentan desafíos en la escalabilidad de la red y vuelve necesaria una gestión eficiente para mantener el rendimiento y la funcionalidad.

Para resaltar los aspectos fundamentales de un nodo en una red de sensores, es crucial abordar desafíos como la conservación de energía, la comunicación inalámbrica en condiciones adversas y la capacidad de operar de manera efectiva en entornos hostiles, para garantizar una red resiliente y eficiente Faris et al., 2023.

En una WSN, un nodo sensor se compone de cuatro partes clave que se muestran en la tabla a continuación. En primer lugar, la fuente de alimentación, generalmente consiste en una batería, que puede recargarse mediante un panel solar o ser completamente autónoma, aunque esta última opción suele tener una duración más limitada.

Luego, la unidad de sensado, que consta de un sensor y un módulo de conversión analógica a digital (ADC, del inglés Analog to Digital converter).

La tercera parte es la unidad de procesamiento, que puede ser un microcontrolador o un microprocesador, cada uno con su memoria de acceso aleatorio (RAM, del inglés Random Access Memory).

Finalmente, la unidad de comunicación inalámbrica se encarga de establecer conexiones y facilitar la transmisión de datos entre el nodo sensor y otros dispositivos dentro de la red. Estas partes son fundamentales para el diseño y funcionamiento efectivo de los nodos en las redes de sensores. A continuación, se muestra un resumen de las partes principales de un nodo sensor y su función específica Sharma y Kaur, 2021, Ahmad et al., 2024:

Descripción de las partes principales de un nodo en una red de sensores	
Fuente de alimentación:	Una batería que puede ser recargada mediante un panel solar o completamente autónoma.
Unidad de sensado:	Consta de un sensor y un módulo de conversión analógica a digital (ADC).
Unidad de procesamiento:	Puede ser un microcontrolador o un microprocesador, cada uno con su memoria de acceso aleatorio (RAM).
Unidad de comunicación inalámbrica:	Se encarga de establecer conexiones y facilitar la transmisión de datos entre el nodo sensor y otros dispositivos dentro de la red.

Estas partes son fundamentales para el diseño y funcionamiento efectivo de los nodos en las redes de sensores. A continuación, se presenta la imagen 3.1 que ilustra un nodo sensor típico, destacando sus componentes principales Teja, 2024, Meyer et al., 2010b:

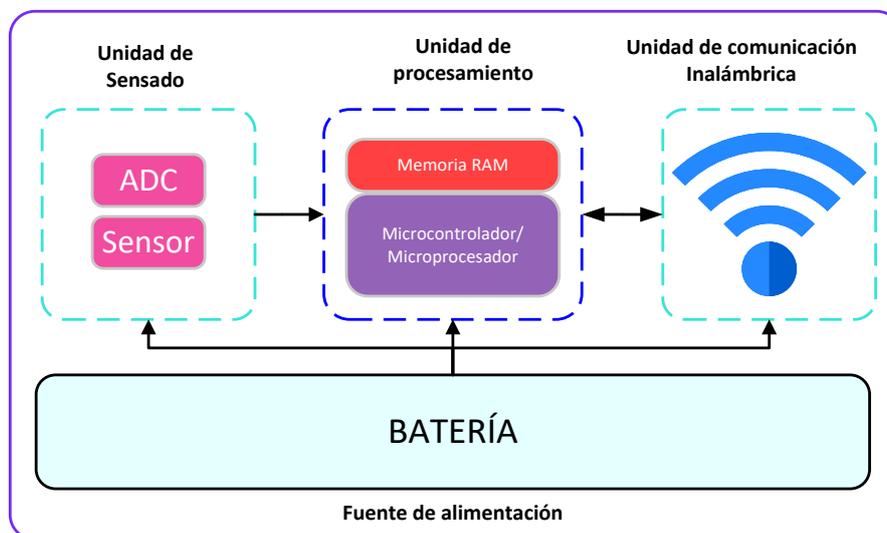


Figura 3.1: Partes de un Nodo Sensor fuente: elaboración Propia fundamentado en Teja, 2024.

3.2.3 Topologías y Protocolos en WSN

La topología de una red de sensores inalámbrica **WSN** se refiere a la disposición y posicionamiento de los nodos sensores pertenecientes a la red. Esta organización puede adoptar diversas configuraciones, entre las cuales se encuentran: bus, árbol, estrella, malla, híbrida, estrella-malla, anillo, circular y rejilla Heydarishahreza et al., 2020. Cada una de estas topologías ofrece ventajas y desventajas específicas que influyen en el rendimiento y la eficiencia de la red.

Topologías de Red

- **Topología de Bus** En la topología de Bus, un nodo envía el mensaje a través de toda la red, aunque el mensaje llega a todos los demás nodos, únicamente el nodo objetivo recibe, acepta y procesa el mensaje Heydarishahreza et al., s.f., Chang et al., 2020.
- **Topología de árbol** En la topología de árbol, la red utiliza un concentrador central, llamado nodo raíz, como el principal enrutador de comunicación. En la jerarquía de la red, el concentrador central está por debajo del nodo raíz, formando una red en forma de estrella. Las rutas de comunicación pueden ser de un solo salto o de múltiples saltos Heydarishahreza et al., s.f.

- **Topología estrella** En la topología en estrella de punto simple a multipunto, todos los nodos están conectados a un enrutador central de comunicación, sin conexión directa entre ellos. Cada nodo se denomina “cliente” y el concentrador central es el “servidor” o también llamado “receptor” Heydarishahreza et al., [s.f.](#)
- **Topología malla** En la topología de malla. el mensaje puede elegir entre varias rutas diferentes desde el origen hasta el destino. En una malla completa, todos los nodos están conectados directamente entre sí, mientras que en una malla parcial, algunos nodos están conectados de forma indirecta. Es importante señalar que, en contraste con la topología en anillo, aunque existen dos rutas disponibles, únicamente se puede elegir una de ellas Heydarishahreza et al., [s.f.](#)
- **Topología de rejilla** En la topología de rejilla, la red de sensores se divide en cuadrículas o rejillas del mismo tamaño, sin superposiciones. En cada cuadrícula, puede haber uno y solamente un nodo en estado activo. Para alargar la vida útil de la red, los nodos en las rejillas funcionan por turnos. Entre todos los nodos de una rejilla, se elige uno como “cabeza de rejilla”, esta se encarga de reenviar la información de enrutamiento y transmitir los paquetes de datos Heydarishahreza et al., [s.f.](#)
- **Topología híbrida estrella-malla** En la topología híbrida estrella-malla, los nodos sensores con menor energía no están autorizados a retransmitir mensajes, lo que reduce el consumo de energía al mínimo. Este tipo de red es robusta y adaptable. El estándar de comunicación Zigbee utiliza esta topología de red Heydarishahreza et al., [s.f.](#)
- **Topología de anillo** En la topología de anillo, cada nodo está conectado a solo dos vecinos, lo que limita sus opciones de comunicación. Todos los mensajes se transmiten a través del anillo en una única dirección, ya sea en sentido horario o antihorario. La falla de cualquier nodo interrumpe la continuidad del lazo, lo que provoca que toda la red colapse Heydarishahreza et al., [s.f.](#)
- **Topología de circular** En la topología circular, el campo de sensado se organiza alrededor de un nodo de sincronización central. La red circular se despliega de manera uniforme, lo que implica que los nodos circundantes están distribuidos a distancias similares entre sí, evitando tanto áreas de alta concentración como zonas con escasa cobertura. Estos nodos son responsables de detectar eventos en su entorno y transmitir los datos al nodo central de sincronización. La selección de los nodos sensores se lleva a cabo de forma aleatoria, considerando la distancia al nodo central y el rango de transmisión de cada nodo. La información puede viajar a través de un solo salto o múltiples saltos

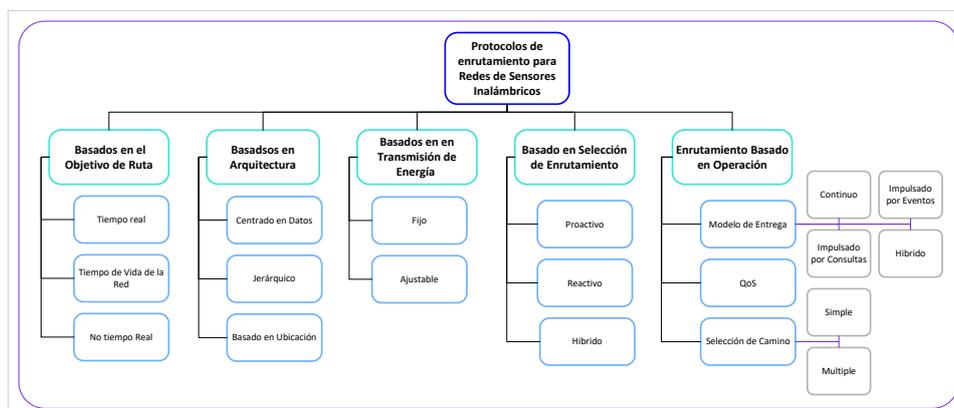


Figura 3.2: Clasificación de los protocolos de enrutamiento en WSN Abdullah et al., 2014

hasta ser recibida por el nodo central de sincronización Heydarishahreza et al., s.f.

Clasificación de los protocolos de enrutamiento en WSN

Los **protocolos de enrutamiento** son un conjunto de reglas y mecanismos que determinan cómo es el flujo de datos a través de la WSN. Estos protocolos son esenciales para establecer rutas de comunicación eficientes entre los nodos que permitan asegurar la transmisión de datos, son especialmente necesarios en entornos donde los nodos pueden ser móviles o tener limitaciones de energía Saidarao y Sekhar, 2017.

Al seleccionar un protocolo de enrutamiento, es fundamental primero considerar la aplicación, después se debe considerar diversos factores como la capacidad de cómputo de los nodos finales, la fuente de alimentación, la capacidad de la red, la latencia o tiempo de envío del mensaje, entre otros aspectos relevantes.

Es importante considerar que algunos protocolos de enrutamiento pueden generar una sobrecarga excesiva en la red, lo que afecta el rendimiento general. Además, la agregación de datos y el uso de múltiples saltos en los nodos de repetidores pueden introducir latencias significativas en la transmisión de información, lo que los hace inapropiados para redes con restricciones energéticas Saidarao y Sekhar, 2017, Heydarishahreza et al., s.f.

Los protocolos de enrutamiento en las WSN se deben seleccionar de acuerdo a los requisitos específicos de la aplicación. Según Abdullah et al., 2014 pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **Basados en objetivos de ruta:** Esta clasificación considera que únicamente es necesario garantizar la entrega exitosa de los mensajes entre

el origen y el destino. Dependiendo de si la aplicación es crítica o no, según el objetivo de ruta se clasifican en:

- **Tiempo Real:** Seleccionadas para aplicaciones donde la entrega rápida y oportuna de datos es crucial, como el monitoreo de signos vitales en pacientes o aplicaciones militares
- **No en tiempo Real:** En este caso, la entrega de mensajes no es tan crítica. Se puede encontrar presente en aplicaciones de agricultura, monitoreo de calidad de aire en las ciudades, Seguimiento de vida silvestre.
- **Tiempo de vida de la red:** El objetivo para este caso es maximizar la duración de la red. Se pueden encontrar en aplicaciones como monitoreo de glaciares y zonas remotas, supervisión estructural de edificios y puentes, monitoreo de volcanes y zonas geológicas

Algunos ejemplos de estos protocolos son: SPIN, LEACH, PEGASIS, entre otros Abdullah et al., 2014.

- **Basados en arquitectura:**

Los protocolos de enrutamiento basados en arquitectura de la red se clasifican en tres subcategorías según la organización de la red, con el objetivo de mejorar el flujo de datos, así como el uso de recursos disponibles para la operación de la red. Las tres categorías se muestran en la siguiente lista:

- **Centradas en datos:** En el enrutamiento centrado en datos, el nodo sink envía consultas a ciertas regiones y espera que lleguen la información de los dispositivos finales o nodos localizados en las regiones seleccionadas. Ya que los datos se solicitan a través de consultas, es necesario especificar las características de información de los datos con base en sus atributos. La principal idea de los protocolos centrados en datos es combinar los datos que llegan de diferentes fuentes en ruta agregándolos dentro de la red, eliminando la redundancia y minimizando el número de transmisiones. Esto permite el ahorrar la energía de la red y prolongar su tiempo de vida. Contrario al enrutamiento tradicional de extremo a extremo, el enrutamiento centrado en datos permite que información múltiples fuentes sea enviada a un único destino. Esto permite la consolidación de datos redundantes en la [WSN](#).
- **Jerárquica:**
El objetivo principal del enrutamiento jerárquico es mantener eficiente el consumo de energía de los nodos sensores, haciéndolos parte de una comunicación multi salto. Para esto se agrupan los

sensores en diferentes agrupaciones denominadas clústers. En los clústeres se realiza la agregación y fusión de datos para disminuir el número de mensajes que se transmiten al nodo sink o de sincronización. La formación del clúster se basa en la energía de reserva disponible en los sensores y la proximidad de estos hacia la cabecera del clúster o cluster-head. Este enfoque permite una mayor escalabilidad de la red, pero la necesidad de agrupar los sensores y el reemplazo del cluster-head, que es necesario para evitar la rápida disminución de energía de este nodo, generan una sobrecarga en la señalización de la red.

El enrutamiento jerárquico se caracteriza porque el mensaje de un nodo transmisor es enviado a un nodo que tiene una mayor jerarquía. Algunos de los protocolos jerárquicos son Leach, Teen, Apteen, Pegasus, Hierarchical-Pegasus, Hpar y TDD.

- **Basadas en ubicación:** En esta arquitectura de red, los nodos sensores son dispersados aleatoriamente en el área geográfica de interés. Se conoce la posición geográfica del lugar donde fueron desplegados y aunque en su mayoría se localizan utilizando GPS, no se pueden descartar otros métodos de localización. El utilizar GPS impone un requerimiento de cómputo adicional en el nodo sensor, por esta razón se requiere utilizar sensores que no tengan recursos de hardware y software muy limitados. La distancia entre los nodos es estimada por la fuerza de la señal recibida y la coordinación de la red se calcula con él intercambiando información entre los nodos vecinos. Este tipo de protocolo no requiere esquema de direccionamiento. Algunos protocolos pertenecientes a esta categoría son Mecn, MEcn, GAF, Gear, Geographic Routing in Lossy WSNs and speed.
- **Basados en transmisión de energía:** Los protocolos de enrutamiento basados en transmisión de energía se centran en optimizar el consumo energético de la red mediante el control de la potencia de transmisión. Este es uno de los factores principales que determina el consumo de energía en las comunicaciones inalámbricas. La gestión de potencia permite establecer enlaces de comunicación más confiables, minimizar el consumo energético y reducir interferencias. Esto permite contribuir de manera significativa a la optimización y duración de la vida útil de la [WSN](#).

Los protocolos en esta categoría se clasifican en dos tipos según su estrategia de control de energía:

- **Potencia de transmisión fija:** Los nodos mantienen un nivel constante de potencia de transmisión durante toda su operación,

esto simplifica la implementación, pero limita la adaptabilidad de la red.

- **Potencia de transmisión ajustable:** Permite modificar de manera dinámica los niveles de transmisión según las condiciones y necesidades de la red. Esto permite optimizar el consumo energético de la [WSN](#) en tiempo real.

Entre los protocolos que utilizan estas estrategias de transmisión se incluyen SPIN, Directed Diffusion, Rumor Routing, LEACH, GAF, GEAR, GBR, CADR, MCFA, PEGASIS, TTDD, ACQUIRE, TEEN, APTEEN y SPEED, todos ellos se destacan por su enfoque en la eficiencia energética.

- **Basados en selección de enrutamiento:** Este enfoque se basa en el método utilizado para calcular la ruta a partir de la información adquirida por los nodos. Analiza cómo el nodo de origen establece la comunicación con el nodo de destino, dividiendo los protocolos en tres categorías principales: proactivos, reactivos e híbridos.
 - **Protocolos de enrutamiento proactivo:** También son conocidos como protocolos basados en tablas o protocolos de enrutamiento de estado de enlace. Estos protocolos mantienen información actualizada sobre las rutas a otros nodos de la red en todo momento, incluso sin necesidad de solicitud por parte de la red. Cada nodo almacena la información del enrutamiento hacia todos los demás nodos. Esta información generalmente se organiza en tablas y se actualiza periódicamente para reflejar los cambios en la topología de la red. En redes grandes, estos protocolos son menos eficientes, ya que requieren mantener entradas para cada nodo, lo que incrementa el uso de memoria y ancho de banda Heydarishahreza et al., [2020](#).
 - **Protocolos de enrutamiento reactivos** También son conocidos como protocolos de enrutamiento bajo demanda. En este tipo de protocolos de enrutamiento, el nodo busca una ruta solo cuando es necesario, es decir, cuando un nodo desea enviar datos, busca la ruta hacia el nodo de destino y establece la conexión Heydarishahreza et al., [2020](#).
 - **Protocolo de enrutamiento híbrido**
Este protocolo de enrutamiento es la combinación de los enfoques de protocolos proactivos y reactivos Abdullah et al., [2014](#). Esta estrategia de enrutamiento es aplicada en redes con un gran número de dispositivos.

Se utiliza técnicas de agrupamiento que hacen la red estable y escalable. La red se divide en varios clústeres y estos son mantenidos dinámicamente incluso cuando un nodo se agrega o sale del clúster. Este modo de enrutamiento usa una estrategia proactiva cuando se necesita enrutamiento entre clústeres y estrategia reactiva cuando el enrutamiento se necesita dentro del clúster Heydarishahreza et al., 2020, Bhatia, 2016.

- **Basados en operación:** Esta clasificación se enfoca en cómo los protocolos gestionan el flujo de datos dentro de la red. Se divide en los siguientes tipos principales:
 - **Selección de caminos:** Determina la ruta óptima que deben seguir los datos desde el nodo de origen hasta el nodo destino. En esta clasificación se encuentran las rutas simples y múltiples.
 - **Modelos de entrega:** Definen cómo los datos son transmitidos entre nodos, considerando factores como confiabilidad y eficiencia.
 - **Calidad de servicio (QoS):** Garantiza que se cumplan los requisitos específicos de la red, como ancho de banda, latencia y pérdida de paquetes.

Los diferentes protocolos de enrutamiento utilizados en WSN siempre se eligen en función de la aplicación y las necesidades específicas. Las WSN tienen limitaciones en cuanto al rango de operación, alcance, energía y escalabilidad. Para atacar estas limitaciones se ha llegado a optar por el uso de las redes LPWAN. En la figura 3.3 se muestra la comparación de distintas tecnologías de comunicación inalámbricas. Se muestran las agrupaciones de las redes utilizadas para redes de área personal (PAN, del inglés *Personal Area Network*), redes de área local (LAN del inglés, *Local Area Network*), redes de área amplia y bajo consumo de potencia (LPWAN, del inglés *Low Power Wide Area Network*, redes celulares, y comunicaciones satelitales. En el eje x se aprecia la distancia aproximada de rango de cobertura de las redes, y en el eje y se aprecia la velocidad a la que se transmiten los datos (DR, del inglés *Data rate*)

A continuación en la figura 3.4 se muestran las principales características de las redes LPWAN Chilamkurthy et al., 2022, Egli, 2015:

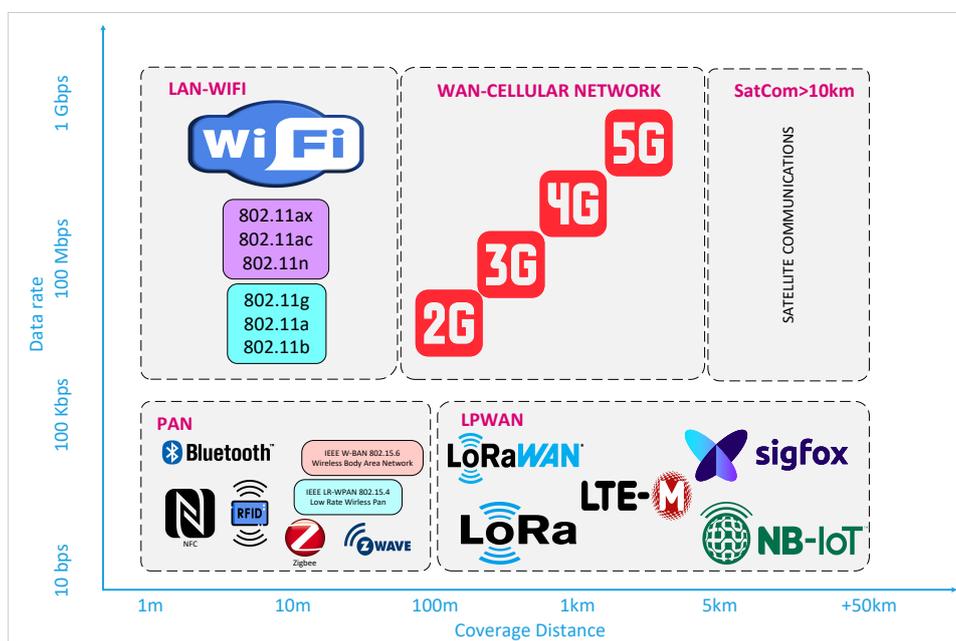


Figura 3.3: Comparación de tecnologías de comunicaciones inalámbricas usadas para aplicaciones en el Internet de las Cosas



Figura 3.4: Características Claves de las redes LPWAN

En Las redes **LPWAN** se destacan las siguientes características:

- **Amplia Cobertura** Tienen un gran rango de cobertura, pueden abarcar entre 2-5 km en áreas urbanas, y extenderse hasta 40 km en campo abierto. Además poseen una muy buena penetración en interiores y considerable alcance bajo tierra.
- **Bajo consumo de energía** Los dispositivos que se emplean en las redes **LPWAN** se caracterizan por tener una larga vida útil debido al bajo consumo de energía que tienen. La batería de estos dispositivos puede llegar a durar varios años.
- **Bajo costo** Los dispositivos necesarios para desplegar redes **LPWAN** pueden ser extremadamente económicos. Cuando se habla de dispositivos finales, se encuentran precios desde los 15 dólares, hasta gateways para interiores que van desde los 90 dólares. Los gateways para exteriores son más costosos y pueden encontrarse en el mercado desde los 450 dólares.
- **Calidad de servicio** La latencia de transmisión no es uno de los requisitos principales para las **LPWAN** debido a que las aplicaciones **IoT** no suelen verse afectadas por la latencia debido a la naturaleza de estas. Pero es necesario siempre considerar la aplicación.
- **Manejo de Interferencias** Una característica importante de las redes **LPWAN** es su alta resistencia a entornos ruidosos o congestionados al momento de transmitir la señal de datos.
- **Escalabilidad** Las redes **LPWAN** pueden ofrecer servicio a miles de dispositivos con un solo gateway, esto significa que agregar más gateways les permite crecer rápidamente y aceptar transmisiones de muchos más dispositivos finales.

Como se ve en la 3.3 las redes **LPWAN** tienen mayor rango de cobertura en comparación de las redes **PAN**, **LAN**, y las redes celulares. Pero en contraparte, la velocidad de transmisión de datos es mucho menor. Dentro de las redes **LPWAN** los principales exponentes y más utilizados actualmente son **LoRaWAN**, **Sigfox** y **NB-IoT**. Aunque **Sigfox** y **NB-IoT** disponen de un modelo de suscripción parecido a la utilizada en la telefonía celular, **LoRaWAN** se puede utilizar sin necesidad de suscripciones.

La selección entre **Sigfox**, **NB-IoT** y **LoRaWAN** es un tema interesante debido al enfoque de estas redes. La inversión inicial para una persona puede ser mucho menor al utilizar **Sigfox** o **NB-IoT**, ya que los proveedores de servicio se encargan de tener los gateways en funcionamiento. Para desarrollar una solución es necesario invertir únicamente en los dispositivos finales.

Esta situación cambia al momento de brindar servicio en lugares sin cobertura. **LoRaWAN** se vuelve una excelente opción, debido a la facilidad de implementación que esta ofrece.

Se necesita adquirir un gateway, realizar la configuración y emplazarlo en un lugar adecuado.

De esta forma se puede levantar una red privada y brindar servicio a varios dispositivos finales. Aunque la inversión inicial es elevada debido a la necesidad del gateway, esta inversión se recupera al momento de vender el servicio.

La existencia de plataformas como la red de las cosas (**TTN**, del inglés *The Things Network*), una red **LoRaWAN** global compartida, y Chirpstack, una plataforma de código abierto que permite desplegar redes **LoRaWAN** privadas, han apoyado para que **LoRaWAN** sea una de las redes **LPWAN** más utilizadas

3.3 LoRa y LoRaWAN

3.3.1 Lora

LoRa Es una técnica de modulación desarrollada por Semtech, opera en la capa física (Capa 1) del modelo OSI, Dasiga et al., 2020 que permite asegurar una comunicación bidireccional entre los dispositivos y está basada en la técnica de modulación chirrido de espectro ensanchado (**CSS**, del inglés *Chirp Spread Spectrum*).

Esto permite generar una señal para comunicaciones inalámbricas con las siguientes características: Tiene bajos niveles de ruido, además, **LoRa** tiene una alta resistencia a interferencias mediante el uso de técnicas de espectro ensanchado y modificación del **SF** hacia uno mayor, por ejemplo del **SF** 7 al **SF** 12, esto mejora la resistencia a interferencias, pero disminuye la velocidad de transmisión de datos.

Adicionalmente, **LoRa** presenta una señal difícilmente distinguible del ruido de fondo para receptores que desconocen su **CR** o el **SF** utilizado, lo que la hace prácticamente inmune a interferencias, ya que un potencial atacante necesitaría bloquear toda la banda de operación Kais et al., 2018, Chilamkurthy et al., 2022.

3.3.2 LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de acceso al medio que opera en las capas de enlace de datos (Capa 2) y de red (Capa 3) del modelo **OSI**, basado en **LoRa** y diseñado para gestionar las comunicaciones en redes inalámbricas de largo alcance. Su función principal es definir la arquitectura de red, estableciendo cómo los dispositivos se comunican, estructuran y transmiten datos en una red **LoRa** Dasiga et al., 2020.

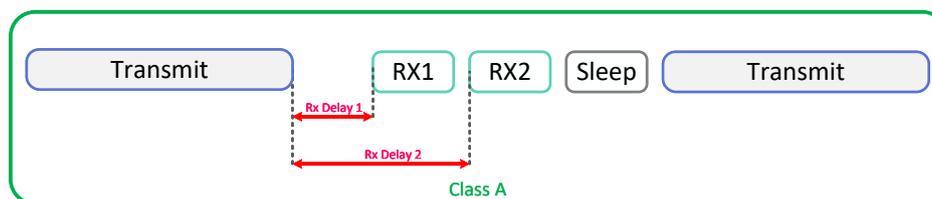


Figura 3.5: LoRaWAN Dispositivo Clase A

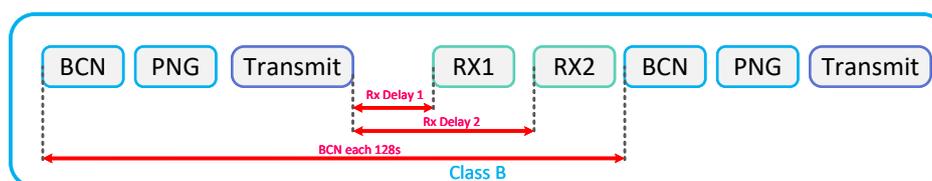


Figura 3.6: LoRaWAN Dispositivo Clase B

Una red LoRaWAN tiene tres clases de dispositivos Clase A, Clase B y Clase C, estos se clasifican según su patrón de operación y consumo de energía. Esta clasificación permite seleccionar el tipo de dispositivo que mejor se adecue a las diferentes aplicaciones y necesidades.

En la figura 3.5 se muestra el funcionamiento de los dispositivos LoRaWAN clase A: pueden transmitir en cualquier momento, pero tienen únicamente dos ventanas para recibir un enlace descendente, el resto del tiempo pueden estar en modo de ahorro de energía. Esto limita la comunicación de enlace descendente, pero permite que la batería dure mucho más tiempo.

En los dispositivos clase B como se ve en la figura 3.6, se pueden agendar ráfagas de sincronización llamadas beacon, que permiten tener más ventanas de recepción de mensajes de enlace descendentes que los dispositivos clase A, el funcionamiento es el siguiente: una vez que llega una ráfaga de sincronización, se abre un ping slot, que permite recibir mensajes desde el servidor de red, luego se efectúa la transmisión y el dispositivo se comporta como un dispositivo clase A, luego se repite el ciclo. consume más energía que los dispositivos clase A, pero se gana un comportamiento cercano al tiempo Real.

En la figura 3.7 se muestra el funcionamiento de un dispositivo LoRaWAN clase C. El funcionamiento de este dispositivo consiste en estar a la escucha de enlaces descendentes todo el tiempo, excepto cuando se realiza una transmisión. Este comportamiento hace que consuma mucha energía, lo que hace necesario que estos dispositivos estén con una fuente fija de alimentación que le permita mantener su funcionamiento. Son adecuados para aplicaciones que requieran comunicación en tiempo real.

En la figura 3.8 se explica como se relacionan [LoRa](#) y [LoRaWAN](#). [LoRa](#)



Figura 3.7: LoRaWAN Dispositivo Clase C

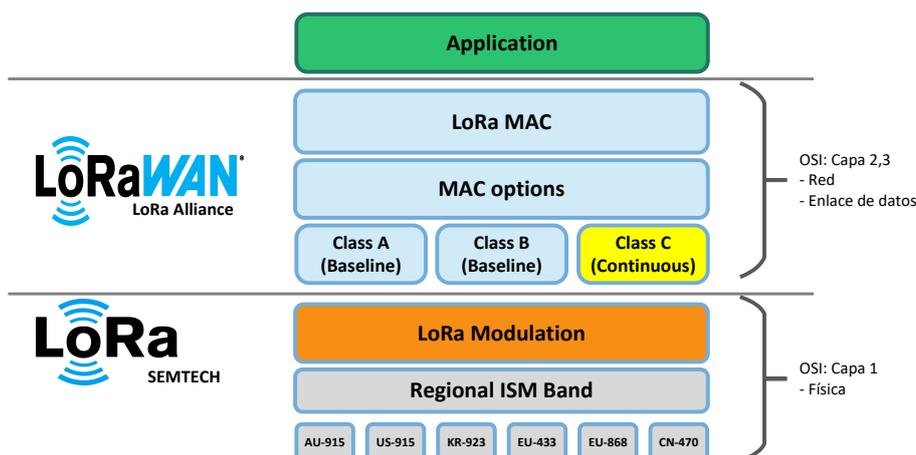


Figura 3.8: LoRa y LoRaWAN

WAN funciona sobre LoRa, que es la capa física. Por otro lado, LoRaWAN es el protocolo de acceso al medio que maneja y gestiona los mensajes que se reciben y se envían entre los dispositivos finales y el servidor de red, por medio del gateway. Existen varios parámetros regionales que se deben elegir en función de la regulación del país donde se despliega la red LoRaWAN. Una vez manejados los mensajes, se pueden enviar al servidor de aplicación para su manejo y entrega al usuario final.

Al utilizar tecnologías como Zigbee, Wi-Fi, 6-Low pan, Wireless Hat, y Bluetooth Low Energy para WSN el rango de coberturas alcanzable es limitado. Se puede cubrir áreas desde 10 m hasta los 1.5 km Daousis et al., 2024. Muy útiles para aplicaciones que necesiten alta velocidad de transmisión de datos, por el contrario, cuando se requiere un rango más extenso es necesario ver otras tecnologías más adecuadas. Es por esta razón que en aplicaciones que requieren cobertura más extensa, por encima de los 2 km, LoRa se vuelve una opción interesante, debido a que su rango de operación. En las peores condiciones puede llegar a 1 km, y en óptimas condiciones puede cubrir por sobre los 20 km. Para aplicaciones de sensado en áreas remotas y de difícil acceso.

3.3.3 Aplicaciones de LoRa y Requerimientos de múltiples saltos

LoRa se ha convertido en una tecnología de radio muy popular en el IoT, debido a esta popularidad, han iniciado un gran número de casos de uso y aplicaciones que se ven beneficiadas por las características de comunicación que ofrece. En Sole et al., 2022 muestran una librería llamada LoRaMesh, que se ejecuta en nodos LoRa para formar una red de malla entre estos nodos. Implementa un protocolo de enrutamiento de vector distancia. LoRaMesh habilita dos nodos para comunicar paquetes entre ellos, mientras otros nodos en la red operan como enrutadores. Esta librería habilita la posibilidad de crear aplicaciones distribuidas donde únicamente se necesitan nodos IoT para soportar esta malla.

Dias y Grilo, 2020 expresa que las Redes LoRaWAN en una ciudad se ve muy obstaculizada por el duro entorno de propagación para las señales inalámbricas. Los sensores algunas veces son ubicados en lugares bajo tierra que provoca una fuerte atenuación electromagnética.

Si el servicio de LoRaWAN es a través de un operador de red, instalar más gateways con la finalidad de mejorar la cobertura y reducir puntos ciegos de red, para pocos usuarios, no es una opción debido al incremento de costos. En otros casos puede existir una conexión débil o inexistente. Como solución se presenta una opción de múltiples saltos compatible con LoRaWAN que pueda actuar como una extensión para los gateways que están desplegados. Los nodos finales envían sus datos a nodos intermedios, que los retransmiten hacia el gateway, seleccionando la ruta al usar una versión simplificada del algoritmo de enrutamiento por vector de distancia secuenciado por destino (DSDV, del inglés *destination-sequenced distance vector routing*). Al implementar este protocolo de enrutamiento, en conjunto evaluaron el rendimiento de una topología lineal con cuello de botella por medio de la métrica de tasa de recepción de paquetes (PRR, del inglés *Packet Reception Rate*). Donde observaron que no variaba mucho la PRR entre los dos enfoques de enrutamiento. Finalmente, implementaron un mecanismo de múltiple acceso al medio llamado "escuchar antes de hablar", que mejora significativamente la probabilidad de colisión de paquetes al reducir estas colisiones.

Filipinas es uno de los países que más se ve afectado por desastres naturales en el mundo MacAraeg et al., 2020. Es susceptible a daño a la propiedad e infraestructura causados por desastres naturales. Durante este tiempo, la mayoría de las redes e infraestructura de comunicación en el área afectada se vuelven inutilizables. Por esta razón en el trabajo desarrollado en MacAraeg et al., 2020 presentan una red de malla basada en la tecnología LoRa como una herramienta viable para comunicación de emergencia. El protocolo de enrutamiento utilizado para habilitar la red de malla LoRa es una versión modificada del protocolo de enrutamiento basado en vector de dis-

tancia bajo demanda en redes ad-hoc (**AODV**, del inglés *ad-hoc on-demand distance vector*) . Este protocolo de enrutamiento usa el indicador de fuerza de la señal recibida como métrica de enrutamiento (**RSSI**, del inglés *Received Signal Strength Indicator*) como métrica de enrutamiento. EL rendimiento del sistema propuesto se evalúa en función de la tasa de entrega de paquetes (**PDR**, del inglés *Packet Delivery Rate*).

3.3.4 Consideraciones para el diseño de una red multi-hop LoRa

LoRaWAN permite realizar una conexión muy simple entre los dispositivos finales y el gateway debido a la topología estrella que manejan conjunto con su esquema de control de acceso al medio; sin embargo, tiene algunas limitaciones.

Para conectarse a una red **LoRaWAN**, cada dispositivo final necesita alcanzar al menos a un gateway. Desafortunadamente, aunque el rango de comunicación **LoRa** en teoría es capaz de alcanzar conexiones por sobre los 10 km, en aplicaciones en el mundo real es mucho menor debido a la atenuación y distorsión de la señal, debido a factores ambientales y, en entornos urbanos donde existen áreas densamente cubiertas por casas, edificios y otras edificaciones, afectan fuertemente la calidad del enlace Tian et al., 2023.

Aunque se puede agregar simplemente un gateway más cerca de los dispositivos finales que no tienen cobertura o muestran conectividad poco confiable, esto incrementa drásticamente los costos de implementación a unos cientos de dólares por gateways. El despliegue de gateways no es posible en escenarios de desastres y tampoco en áreas remotas, donde no existe la conexión a internet y además tampoco se cuenta con una fuente de energía constante. Como alternativa para intentar establecer la conexión suele intentarse con **SF** de valores altos como 11 o 12, a costa de duración más larga del mensaje en el aire, o usando una mayor potencia de transmisión. Pero estos dos enfoques resultan en un alto consumo de energía, y aun así puede no ser suficiente para asegurar la conexión con un gateway. Incrementar el rango de comunicación de los dispositivos finales genera un aumento de colisiones de paquetes, debido a la cantidad de mensajes que llegan desde diferentes dispositivos hacia un mismo gateway. Esto se debe a la naturaleza de la red **LoRaWAN** de utilizar ALOHA puro como método de acceso a la red, y la naturaleza de un solo salto en todo el rango de cobertura que permite **LoRa**. Esto provoca que la red **LoRaWAN** sea susceptible a transmisiones de otros dispositivos que operan en la misma red, generándose interferencias Tian et al., 2023.

Para ayudar a la escalabilidad de la **LoRaWAN** y abordar estas limitaciones, la propuesta de múltiples saltos es atractiva. Habilitar la formación de redes de malla permitiría que dispositivos finales **LoRa** cercanos al gateway puedan usarse para retransmitir información a una o más puertas de enla-

ce que son inalcanzables para dispositivos finales que no pueden alcanzar a comunicarse directamente con estas Tian et al., 2023.

Una debilidad crítica en redes multi-hop LoRa está relacionada con el manejo del ciclo de trabajo. Los intervalos de despertar de los nodos retransmisores deben considerarse durante el diseño de cualquier aproximación de enrutamiento porque dejar los nodos de retransmisión en modo activo como un gateway normal no es eficiente en términos de la vida útil de la red Lalle et al., 2021.

El paquete LoRaWAN tiene al menos 13 bytes en su cabecera. Dependiendo de la región y el SF la cantidad de carga útil utilizable para mensajes puede variar. La carga útil puede estar entre 59 y 230 bytes. El SF afecta directamente este valor, mientras más alto es, se gana distancia de cobertura, pero la cantidad de bytes utilizables para la carga útil disminuye. Esto impone una grave limitación a los datos que pueden contener LoRaWAN. encabezados de paquetes y aún dejar un gran espacio para la carga útil de la aplicación Lalle et al., 2021

También existe una restricción en las ventanas de recepción. De hecho, ya sea en clase A, B o C, cada nodo después de la transmisión debe abrir ventanas de recepción para los datos de enlace descendente provenientes del servidor de red. Para redes de gran escala, el proceso de enrutamiento puede tardar demasiado. La respuesta del servidor llegará muy tarde y el dispositivo final cerrará las ventanas de recepción, lo que aumentará las pérdidas de paquetes. Por lo tanto, para funcionar correctamente, cualquier método de enrutamiento debe cumplir con los requisitos mencionados anteriormente del protocolo LoRaWAN para ser considerado en una implementación real Lalle et al., 2021.

Ejemplos de Protocolos de Enrutamiento A continuación se muestra una lista con ejemplos de algunos de los protocolos de enrutamiento utilizados en comunicaciones inalámbricas.

1. **RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks):** Un protocolo diseñado específicamente para redes de baja potencia y con alta tasa de pérdida de paquetes. Utiliza un enfoque basado en el gráfico de un árbol, donde se eligen rutas óptimas para la comunicación en función de la calidad de la conexión.
2. **AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector):** Este protocolo permite el establecimiento de rutas bajo demanda, lo que significa que las rutas se crean solo cuando es necesario, reduciendo así el consumo de energía y el tráfico de control en la red.
3. **LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy):** Este protocolo utiliza una técnica de agrupamiento en la que los nodos se

agrupan en clústeres y un nodo líder de clúster se encarga de enviar datos al nodo base. Esto optimiza el uso de energía al reducir la distancia de transmisión.

Importancia Los protocolos de enrutamiento son fundamentales para garantizar una **transmisión eficiente de datos** y para minimizar el **consumo de energía** en redes de sensores. Al seleccionar rutas óptimas, estos protocolos mejoran la **vida útil de la red** y reducen la **latencia** en la comunicación. Además, permiten la **adaptabilidad** ante cambios en la topología de la red, lo que es crítico en entornos dinámicos y en aplicaciones de IoT.

4. Materiales y Metodología

4.1 Materiales

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizaron distintos equipos de hardware y plataformas de software. A continuación, se presenta la lista de las tecnologías utilizadas.

Componentes del Sistema

Hardware

- Gateway LoRaWAN Milesight UG67
- Gateway LoRaWAN Seeed Studio Xiao Sensecap M2
- Heltec Wireless Stick V3
- Heltec Wifi Lora (V3)
- Heltec Wireless Stick Lite V3
- Seeed Studio Xiao ESP32C6
- Módulo LoRa Reiyax RYLR998
- Infraestructura como Servicio en AWS EC2 T3 Large (8 Gb de Ram 20 GB de almacenamiento)

Software

- Servidor de Red LoRaWAN ChirpStack
- Plataforma IoT ThingsBoard Community Edition
- Serial Interface Pro

La tabla 4.1 muestra una comparación entre los ESP32 ocupados para el proyecto, haciendo énfasis en su procesador y la comunicación LoRa, debido a que este trabajo se enfoca en la comunicación de mensajes de una malla LoRa con LoRaWAN.

Los gateways [LoRaWAN](#) utilizados se muestran en la tabla 4.2, destacándose la frecuencia de operación LoRaWAN, el precio y su posible ubicación recomendada.

Característica	Heltec Wireless Stick V3	Heltec WiFi LoRa (V3)	Heltec Wireless Stick Lite V3	Seed Studio Xiao ESP32C6
Procesador	ESP32-S3 (Dual-core LX7)	ESP32 (Dual-core LX6)	ESP32-S3 (Dual-core LX7)	ESP32-C6 (RISC-V)
Frecuencia	240 MHz	240 MHz	240 MHz	160 MHz + NPU
Módulo LoRa	SX1262	SX1276	SX1262	No incluye
Conectividad	WiFi 4, BT 5, LoRa	WiFi 4, BT 4.2, LoRa	WiFi 4, BT 5, LoRa	WiFi 6, BT 5.3, Zigbee, Thread
Frecuencia LoRa	868/915 MHz	433/868/915 MHz	868/915 MHz	-
Potencia TX LoRa	22 dBm	20 dBm	22 dBm	-
Memoria RAM	512 KB SRAM + 384 KB ROM	520 KB SRAM + 448 KB ROM	512 KB SRAM + 384 KB ROM	320 KB SRAM
Memoria Flash	16 MB + 8 MB PSRAM	8 MB	8 MB + 2 MB PSRAM	8 MB
Pantalla OLED integrada	Si	Si	No	No
Número de pines GPIO	19	21	19	11
Interfaces	USB-C, antena PCB/IPEX	Micro-USB, antena PCB/IPEX	USB-C, antena PCB/IPEX	USB-C, soporte antena externa
Voltaje de operación	2.2V - 3.6V	2.7V - 3.6V	2.2V - 3.6V	2.7V - 3.6V
Precio (aprox.)	\$15-35 USD	\$25-45 USD	\$20-35USD	-

Cuadro 4.1: Comparación de módulos ESP32 con LoRa y otras características

Característica	Seed Studio SenseCAP M2	Milesight UG67
Procesador	Dual-core ARM Cortex-A7	Dual-core ARM Cortex-A7
Módulo LoRa	SX1302 (8 canales)	SX1302 (8 canales)
Bandas LoRaWAN	868/915 MHz	863 – 928 MHz (EU/US/AS)
Conectividad principal	LTE Cat-M1, WiFi, Ethernet	LTE Cat-1/4, WiFi, Ethernet
Interfaces	USB, PoE, antena SMA	USB-C, PoE, RS485, antena SMA
Alimentación	PoE (802.3af) o 12 – 24V DC	PoE (802.3af) o 12 – 24V DC
Temperatura operación	-40°C a 75°C	-40°C a 70°C
Resistencia	IP65	IP67
Ubicación de uso	Interiores	Exteriores
Integración	Helium, TTN, AWS IoT	TTN, ChirpStack, Azure IoT
Software	SenseCAP Portal	Milesight IoT Cloud
Precio (aprox.)	\$99 – \$250 USD	\$500 – \$1400 USD

Cuadro 4.2: Comparación de gateways LoRaWAN: SenseCAP M2 vs Milesight UG67

En este trabajo se utilizó 7 módulos ESP32C6 y 1 Módulo Heltec Wireless Stick conectados con el módulo LoRa REYAX RYLR998, para la parte de la malla LoRa. En la siguiente lista se muestran las características del dispositivo LoRa REYAX utilizado.

ReiyaX RYLR998: Características Principales

- **Tecnología de comunicación:** LoRa (Long Range) con protocolo propietario.
- **Frecuencias soportadas:** 915 MHz .
- **Alcance máximo:** Hasta **15 km** en áreas abiertas (dependiendo de antena y entorno).
- **Potencia de transmisión:** Ajustable hasta **22 dBm** (100 mW).
- **Sensibilidad de recepción:** -130 dBm (en SF12, BW 125 kHz).
- **Interfaz de comunicación:** UART (TTL) con comandos AT para configuración.
- **Voltaje de operación:** 2.1V - 3.6V (ideal para dispositivos alimentados por baterías).
- **Consumo de energía:**
 - Modo activo (TX/RX): **120 mA** (máximo).
 - Modo sleep: **1.5 µA** (ultra bajo consumo).
- **Antena:** Conector IPEX o antena PCB integrada (opcional).
- **Dimensiones:** Compacto (16 mm x 16 mm x 3 mm).
- **Protocolos compatibles:** LoRaWAN (Clase A/C) y modo punto a punto (P2P).
- **Certificaciones:** FCC, CE, RoHS.
- **Aplicaciones típicas:** IoT industrial, agricultura inteligente, monitoreo remoto, telemetría.
- **Precio aproximado:** \$18-25 USD (según distribuidor).

4.2 Metodología

4.2.1 Enfoque Metodológico

Se adoptó un modelo secuencial en cascada para el desarrollo de la red híbrida LoRaMesh-LoRaWAN, estructurado en fases interdependientes. Esta elección se justifica por:

- **Tipo de aplicación:** El protocolo está pensado para operar en aplicaciones de agricultura, donde la red tendrá pocos nodos presentes y la capacidad de conexión requiere grandes distancias, además de cada nodo necesita bajo consumo de energía.
- **Dependencias tecnológicas:** Necesidad de interconectar cada capa: física, enlace de datos, y capa de red.

- **Naturaleza del sistema:** El protocolo debe permitir la integración entre los componentes de hardware y software utilizados para la parte de la malla LoRa, y las plataformas existentes de LoRaWAN, como el servidor de red ChirpStack.

4.2.2 Fases del Desarrollo

1. Especificación de Requisitos

- **Objetivo:** Diseñar e implementar una red híbrida **LoRa Mesh LoRaWAN** para la transmisión de variables presentes en la agricultura, como la temperatura y humedad del suelo y el ambiente, en extensos territorios, mayores a 5km, estableciendo parámetros de diseño como cobertura efectiva de comunicación por nodo > 1 km en zona rural, intervalo de transmisión por dispositivo > 5 minutos, eficiencia energética.
- **Justificación técnica:** El desarrollo de una red Híbrida **LoRa - LoRaWAN** permite extender la cobertura base de **LoRaWAN**, sin necesidad de desplegar una infraestructura de comunicación costosa al utilizar dispositivos de bajo costo.

El protocolo de enrutamiento tiene como objetivo ser utilizado para el monitoreo de variables no críticas de la agricultura, por esta razón la confirmación y retransmisión de mensajes de (*acknowledgment*) no es tan importante en este protocolo. El intervalo de envío de datos puede ser mayor a 1 minuto, ya que las variables a monitorizar no tienen cambios drásticos en cortos periodos de tiempo Yang et al., 2021, por ejemplo: la temperatura y humedad del suelo y del ambiente.

- **Actividades:**
 - 1. Análisis de la tecnología **LoRa** y **LoRaWAN**.
 - Parámetros clave para garantizar la viabilidad del sistema, LoRa cumple los requerimientos:
 - * **Cobertura mínima:** 1 km² en entorno rural.
 - * **Autonomía energética:** 6 meses de operación continua.
 - * **Frecuencia de envío de datos:** No inferior a 1 minuto.
 - * **Fiabilidad de transmisión:** No requiere confirmación de mensajes por el tipo de aplicación.
 - *
 - Identificación de limitaciones hardware para el protocolo:
 - * **Microcontrolador:** El ESP32-C6 no presenta limitaciones.
 - * **Memoria RAM:** 512KB SRAM

- * **Memoria Flash:** 4MB.
- * **Microcontrolador:** Heltec Wireless Stick V3 con SP3 no presenta limitaciones.
- * **Memoria RAM:** 512KB SRAM
- * **Memoria Flash:** 4MB.

2. Diseño de la arquitectura de red

- **Objetivo:** Establecer la Jerarquía de la malla LoRa y LoRaWAN
 - 1) LoRaWAN en estrella y 2) LoRa en configuración malla.
 - Esquema de enrutamiento elegido:
 - * Una red de malla LoRa para comunicar sensores que no pueden realizar comunicación directa con LoRaWAN. Debido a interferencias en la línea de vista, electromagnéticas, atenuación de la señal debido a la vegetación. También influyen las condiciones ambientales, dispersión y refracción de la señal debido a terrenos accidentados, donde colinas y valles pueden afectar la propagación de la señal. Presentes en terrenos agrícolas, en las montañas, por ejemplo.
 - * LoRaWAN para comunicación directa con el servidor en la nube de los datos que llegan desde la red de malla lora, con dispositivos finales en el alcance de la red.

3. Diseño del Protocolo de Enrutamiento

- **Objetivo:** Desarrollar un protocolo de enrutamiento que permita integrar la red de malla LoRa con la red LoRaWAN.
- **Estructura jerárquica del protocolo:**
 - **Nivel inferior:** La red de malla LoRa permite que los dispositivos alejados del Gateway LoRaWAN se comuniquen con un dispositivo que tenga comunicación cobertura del gateway en este protocolo se denomina MiniGateway. El MiniGateway Tiene la capacidad de comunicación tanto LoRa, como LoRaWAN.
 - **Nivel superior:** La red LoRAWAN recibe los datos que llegan de la red de malla LoRa y los envía por LoRaWAN al servidor en la nube.
 - **Algoritmo de enrutamiento seleccionado:** El algoritmo de enrutamiento seleccionado es Dijkstra, ya que cumple con permitir el envío de datos entre todos los nodos de la malla LoRa eligiendo el camino que menos peso tenga, en este caso la mejor calidad de enlace.

Para implementar el protocolo de enrutamiento, primero se considera la necesidad de calcular la calidad de un enlace LoRa, para esto se ocupa la ecuación 4.4, que toma en cuenta el SNR, el RSSI y el porcentaje de carga de la batería. Estos valores de SNR y RSSI fueron tomados en consideración de los valores límites para el módulo LoRa REYAX RYLR998 dadas por el fabricante.

Las ecuaciones 4.1 y 4.2 normalizan los valores del SNR y del RSSI en un rango de 0 a 100. En estas ecuaciones se considera que mientras más altos y positivos son los valores de SNR y de RSSI, mejor será la calidad del enlace, en comparación valores bajos generan una menor calidad de enlace.

La normalización en ambas ecuaciones acotan el valor del SNR y RSSI en un rango válido y esperado para los módulos LoRa. Si los valores están dentro del rango, desplazamos hacia la derecha con la suma para evitar valores con signos negativos, convirtiendo el rango original de $[-129, 10]$ a $[0, 139]$ en el caso del RSSI, luego se divide para 139 para normalizar.

La asignación de pesos fue según la importancia que se decidió darle a cada parámetro para este protocolo.

$$\text{RSSI}_{\text{norm}} = \frac{(\max(-129, \min(10, \text{RSSI})) + 129) \times 100}{139} \quad (4.1)$$

$$\text{SNR}_{\text{norm}} = \frac{(\max(-20, \min(10, \text{SNR})) + 20) \times 100}{30} \quad (4.2)$$

$$\text{Batería}_{\text{norm}} = \text{Batería} \times 100 \quad (4.3)$$

$$Q = \frac{(\text{RSSI}_{\text{norm}} \times w_{\text{RSSI}}) + (\text{SNR}_{\text{norm}} \times w_{\text{SNR}}) + (\text{Batería}_{\text{norm}} \times w_{\text{bat}})}{100} \quad (4.4)$$

$$LQ = Q \times 70 \quad (4.5)$$

Donde:

- $\text{RSSI} \in [-129, 10]$ dBm
- $\text{SNR} \in [-20, 10]$ dB
- $\text{Batería} \in [0, 100]\%$
- Pesos utilizados:
 - $w_{\text{RSSI}} = 20$
 - $w_{\text{SNR}} = 40$
 - $w_{\text{bat}} = 40$

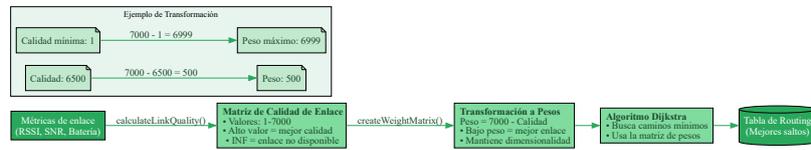


Figura 4.1: Matrices del protocolo de enrutamiento

Con la calidad del enlace calculada, se utiliza el algoritmo de Dijkstra en función de los nodos esperados de la red de malla LoRa para encontrar las rutas entre ellos.

Cálculo del Camino Más Corto con Dijkstra

En este protocolo de enrutamiento, el algoritmo de Dijkstra se utiliza para calcular el camino más corto entre nodos en la red. A continuación se describe la construcción de la **matriz de pesos**, la ejecución del **algoritmo de Dijkstra** y la reconstrucción de rutas óptimas.

Cálculo del Camino Más Corto con Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra se utiliza para encontrar el camino más corto entre nodos que pertenecen a la red. A continuación se muestra la construcción de la **matriz de pesos**, la ejecución del algoritmo de Dijkstra y la reconstrucción de rutas óptimas.

4.2.3 Matriz de Pesos

La matriz de pesos W se obtiene a partir de la **matriz de calidad del enlace** Q , se utiliza para transformar los valores de calidad de enlace, que mientras más altos es mejor el enlace, en costos para el algoritmo de Dijkstra, mientras más bajo es el costo del enlace, es más corto el camino. Se define de la siguiente manera:

$$W_{ij} = \begin{cases} \infty, & \text{si } i = j \text{ (misma estación)} \\ \infty, & \text{si } Q_{ij} = 0 \text{ o } Q_{ij} = \infty \text{ (sin conexión)} \\ 7000 - Q_{ij}, & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (4.6)$$

Donde:

- W_{ij} es el peso del enlace entre los nodos i y j .
- Q_{ij} es la calidad del enlace entre los nodos i y j .
- Se usa $7000 - Q_{ij}$ para que enlaces de mejor calidad tengan menor peso.

La figura 4.1, muestra la interacción de la calidad del enlace y la matriz de pesos.

4.2.4 Algoritmo de Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra quiere encontrar la ruta más corta desde un nodo fuente s hacia el resto de nodos pertenecientes a la red. En cada iteración del algoritmo se actualizan las distancias mínimas entre los nodos.

Inicialización

El algoritmo comienza definiendo dos estructuras clave:

- $d(v)$: Distancia mínima estimada desde el nodo fuente s hasta cada nodo v .
- $P(v)$: Nodo previo en el camino más corto hacia v .

Inicialmente, cada nodo comienza con una distancia infinita, excepto el nodo fuente s , que tiene una distancia de cero:

$$d(s) = 0, \quad d(v) = \infty \quad \forall v \neq s \quad (4.7)$$

El vector de nodos previos se inicializa en nulo, ya que aún no hay caminos determinados:

$$P(v) = \text{null}, \quad \forall v \quad (4.8)$$

Selección del nodo mínimo no visitado

El nodo con la menor distancia estimada desde el nodo fuente se denomina u : En cada iteración, se elige el nodo **no visitado** con la menor distancia estimada desde el nodo fuente.

$$u = \arg \min_{v \notin V_{\text{visitados}}} d(v) \quad (4.9)$$

Donde:

- u es el nodo actualmente seleccionado, es decir, el nodo con la menor distancia conocida hasta ahora.
- v representa cualquier otro nodo en la red.
- $V_{\text{visitados}}$ es el conjunto de nodos ya procesados.

Si no hay más nodos alcanzables, el algoritmo finaliza.

Actualización de distancias

Después de seleccionar el nodo u , se recorren todos sus nodos vecinos v y se actualizan sus distancias si se encuentra un camino más corto:

$$d(v) = \min(d(v), d(u) + W_{uv}) \quad (4.10)$$

Donde:

- W_{uv} es el peso del enlace entre u y v .
- Si el nuevo camino a v a través de u es más corto, se actualiza $d(v)$.

Si la distancia de v es actualizada, también se actualiza su nodo anterior en el camino más corto:

$$P(v) = u \quad (4.11)$$

Esto significa que la ruta más eficiente para llegar a v pasa ahora por u .

4.2.5 Creación de la cabecera

Para el protocolo de enrutamiento, se crea una cabecera pensada en el envío de datos referente de hasta máximo 8 nodos. Consta de 88 bytes que almacenan principalmente la ruta que debe seguir, el mensaje de tipo DATA, el valor del porcentaje de batería de los nodos, Valores de SNR y RSSI de cada enlace cuando llegan a un nodo, entre otros. La figura 4.2 Muestra la estructura de cabecera del protocolo de enrutamiento.

4.2.6 Obtención de Rutas

Cuando se ha completado el cálculo de distancias, se reconstruye la ruta desde el origen s hasta un destino, d recorriendo los nodos previos:

$$\text{ruta}(d) = \{d, P(d), P(P(d)), \dots, s\} \quad (4.12)$$

El peso total del camino es la suma de los pesos de los enlaces en la ruta:

$$C_{\text{ruta}} = \sum_{i=0}^{n-1} W_{\text{ruta}[i], \text{ruta}[i+1]} \quad (4.13)$$

4.2.7 Construcción de la Tabla de Enrutamiento

Para cada nodo destino d , se determina el siguiente salto $\text{NextHop}(d)$ basado en la ruta obtenida:

$$\text{NextHop}(d) = P(d) \quad (4.14)$$

Header
sourceNodeID: uint8_t
destinationNodeID: uint8_t
routingPath[MAX_NODES]: uint8_t
batteryPercentage[MAX_NODES]: uint8_t
batteryLevel[MAX_NODES]: uint16_t
snr[MAX_NODES]: int16_t
rssi[MAX_NODES]: int16_t
messageType: uint8_t
messageID: uint16_t
hopCounter: uint8_t
retransmissionsCount: uint8_t
routeQuality: uint8_t
linkQuality[MAX_NODES]: uint16_t

Figura 4.2: Cabecera del protocolo de enrutamiento

En este punto, para poder realizar el envío de los mensajes, se carga la ruta completa en la cabecera del mensaje, y se envía al nodo final, para este algoritmo de enrutamiento, todos los mensajes se envían al MiniGateway, que es el encargado de recibir la información que llega por LoRa y encapsularla en formato LoRaWAN. En las figuras 4.3 y 4.4 se presenta el algoritmo que sigue el protocolo de enrutamiento. Consta principalmente del proceso de 3 tipos de mensajes, discovery, routes y data. Los mensajes de tipo Discovery y route actualizan la tabla de enrutamiento en función de las rutas que llegan al nodo. Los mensajes tipo data se preguntan si es el nodo final o no, si es el nodo final procede a enviarse los mensajes a LoRaWAN, sino, se realiza el reenvío de los mensajes al siguiente salto. La ruta completa de los mensajes tipo data son conocidos desde que parte el paquete de datos desde el nodo fuente.

3. Implementación

Para la implementación de la Red, se utilizaron dos tipos de nodos:

- MiniGateway: Se encarga de comunicar los mensajes de la red LoRa hacia LoRaWAN, esta conformado por un Modulo Heltec Wireless Stick V3, con un módulo LoRa REYAX RYLR998.
- Nodo LoRA: Se encarga de recibir los mensajes de otros nodos LoRa, y esta formado por UN ESP32C6 de SeedeStudio Xiao con un módulo LoRa REYAX RYLR998.

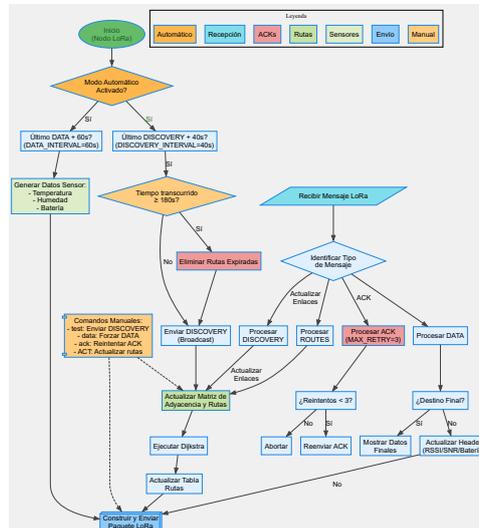


Figura 4.3: Diagrama de flujo del protocolo de enrutamiento en el nodo LoRa

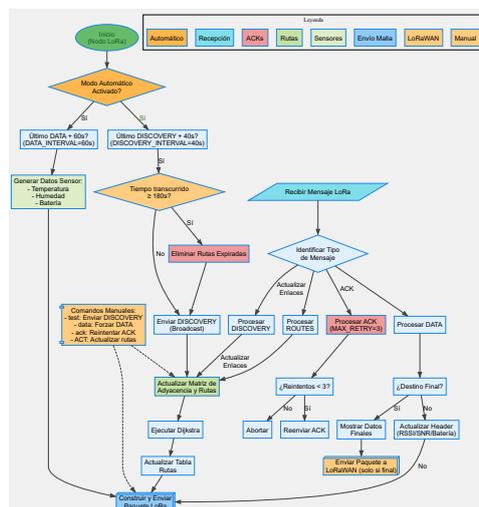


Figura 4.4: Diagrama de flujo del protocolo de enrutamiento en el MiniGateway

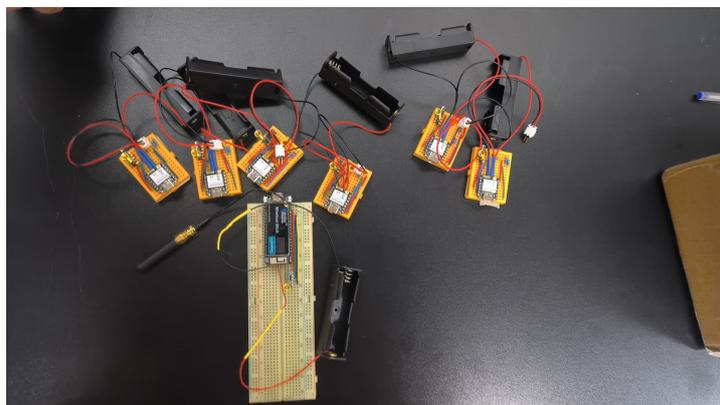


Figura 4.5: Módulos de la RED híbrida LoRa-LoRaWAN

En la figura 4.5 se presentan los módulos físicos, en la parte superior se observan los nodos LoRa, y en la parte inferior el MiniGateway. El enfoque del Minigateaway es que al integrarle un módulo dedicado únicamente a LoRa, pueda recibir los datos de la malla LoRa sin afectar el proceso de LoRaWAN.

Capas de comunicación en la red

Para entender completamente como funciona este protocolo de comunicación, voy a mostrar las 3 capas que y como se ocupan, definiéndolas claramente.

- **Capa Física:** En esta capa se presenta la modulación que utilizan los nodos para transmitir sus mensajes, esta es LoRa
- **Capa de enlace de datos:** Los módulos LoRa REYAX RYLR998 utilizan un formato de paquetes y direccionamiento propietario de la empresa REYAX. Esta especifica cómo construir y recibir mensajes LoRa (por ejemplo: comandos AT+ADDRESS, AT+NETWORKID, o mensajes estructurados en la recepción que inician con +RCV=<...>)
- **Capa de RED** El protocolo de enrutamiento propuesto en este trabajo se encarga de la comunicación de los datos entre los nodos de la malla LoRa y el MiniGateway.

La figura 4.6 muestra como se separan las 3 capas del modelo OSI que intervienen en este protocolo de enrutamiento.

4. Pruebas

Para todas las pruebas, la configuración de LoRa de los módulos LoRa REYAX se muestra en la tabla 4.3, Se cambia únicamente en el Node ID, Los modulos REYAX necesitan tener configurada la misma red para permitir la comunicación de los nodos.

En la tabla 4.4 se muestra la configuración LoRaWAN definida para el Heltec Wireless Stick V3. Este módulo cumple la función de Minigateaway,

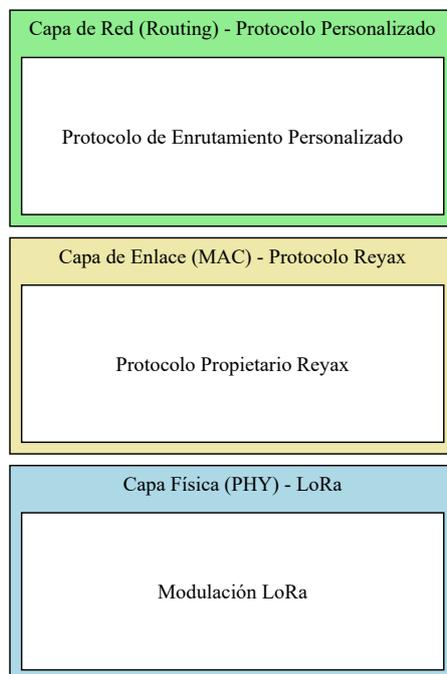


Figura 4.6: Separación de las capas ocupadas del Modelo OSI

Dispone de un módulo LoRa REYAX RYLR998 conectado en su puerto serial y, por esta razón permite el envío de datos desde LoRa hacia LoRaWAN, La configuración del módulo REYAX RYLR998 se muestra en la tabla 4.3 y la configuración del módulo LoRa embebido SX1262 en configuración LoRaWAN se muestra en la tabla 4.4.

Para evaluar el funcionamiento del protocolo, se realizaron 2 pruebas:

Prueba 1: Envío simultáneo de mensajes

Se realiza la configuración de los nodos LoRa para transmitir simultáneamente cada minuto sus mensajes a través de la red. Todos los datos fueron enviados al nodo 7, que actúa como MiniGateway, retransmitiendo la información desde la red de malla LoRa hacia la red LoRaWAN mediante un gateway Milesight UG67.

La figura 4.7 muestra que

Prueba 1: Transmisión prolongada directo al gateway MilesightUG67

Prueba 2: Transmisión prolongada con variación de potencia

En un terreno pequeño, se desplegaron varios nodos y se inició a transmitir datos durante una hora. Durante la prueba, se modificó la potencia de transmisión para evaluar su impacto en la comunicación.

La Tabla 4.5 presenta las coordenadas exactas de los nodos utilizados en esta prueba. La Figura 4.8 muestra la distribución espacial de los nodos en

Cuadro 4.3: Configuración de LoRa para los módulos REYAX RYLR998

Parámetro	Valor
Network ID	18
Node Address	1
Broadcast Address	0
Frecuencia (Hz)	915000000
Potencia de transmisión (dBm)	14
Spreading Factor (SF)	7
Bandwidth	500 kHz (BW9)
Coding Rate	4/5 (CR1)
Preamble	12
LoRaWAN Data Rate	5

Cuadro 4.4: Configuración de LoRaWAN para el módulo Heltec Wireless Stick V3

Parámetro	Valor
Spreading Factor (SF)	5
Potencia de transmisión (dBm)	14
Región LoRaWAN	AU_915_0
Clase LoRaWAN	A

el terreno.

Para la prueba 2, la tabla 4.5 muestra las coordenadas de los nodos en la prueba número 2, y la figura 4.8 muestra su ubicación en el mapa.

5. Validación

Para evaluar el rendimiento de la red híbrida LoRaMesh-LoRaWAN, se consideró como métrica la tasa de entrega de paquetes PDR. Que se presente en la ecuación 4.15 . Este parámetro permite conocer la confiabilidad del protocolo de enrutamiento

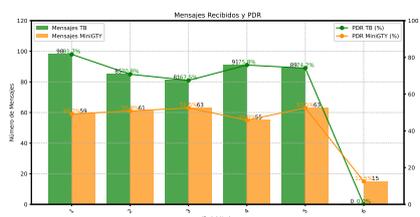


Figura 4.7: PDR Discovery Storm.



Figura 4.8: Ubicación de nodos

Nodo	Latitud	Longitud
NODO1	-2.913145	-79.056163
NODO2	-2.913128	-79.055398
NODO3	-2.913275	-79.055473
NODO4	-2.913356	-79.055805
NODO5	-2.912837	-79.055502
NODO6	-2.913030	-79.056064
MiniGATEWAY	-2.913304	-79.055947
GTY SENSECAP	-2.913179	-79.056027

Cuadro 4.5: Coordenadas de los nodos en orden numérico

$$PDR = \frac{\text{Mensajes recibidos correctamente}}{\text{Mensajes enviados}} \times 100\% \quad (4.15)$$

5. Resultados y discusión

5.1 Resultados

Prueba 1: Transmisión prolongada entre nodos y hacia el Gateway Milesight UG67

En esta prueba, todos los nodos de la malla transmitieron durante 2 horas cada minuto mensajes en la red. Se espera que en total por cada nodo lleguen 120 mensajes al Minigateway, La figura 5.1 muestra que existió un elevado número de paquetes duplicados que se muestran en el servidor LoRaWAN. Esto ocasiona una tasa de PDR sobre el 60% en los nodos del 1 al 5, siendo esta tasa falsa. La tasa real de mensajes entregados dentro de la malla LoRA, se aprecia en los mensajes que llegan al Minigateway, donde se ve que maximo se alcanza el 52.5% de paquetes entregados.

Prueba 2: Transmisión prolongada con variación de potencia

Los resultados de la segunda prueba se muestran en las figuras 5.2, ejecutada con la potencia de los nodos LoRa REYAX en 0 dBm, 5.3, con la potencia en 7 dBm, 5.4 con la potencia en 14 dBm, En las figuras se aprecia que existen más mensajes recibidos que enviados, específicamente en las figuras 5.2, y 5.3. Esto ocurre porque algunos mensajes que llegaron al servidor LoRaWAN se mostraban como duplicados.

La cantidad de mensajes que llegaron al minigateway en la prueba, de 0

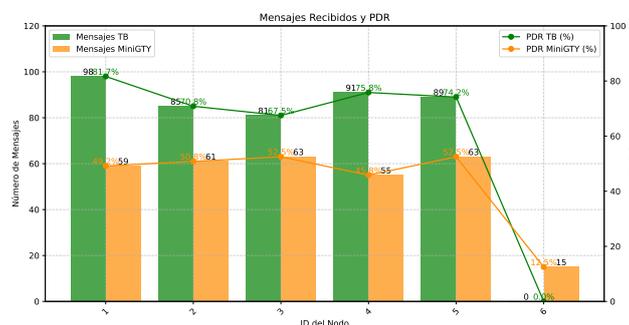


Figura 5.1: PDR: Discovery Storm

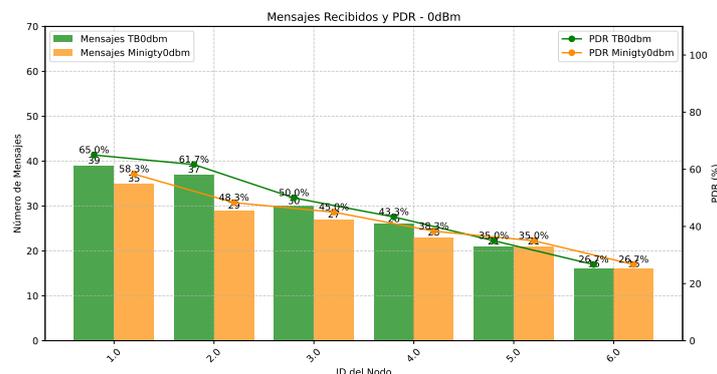


Figura 5.2: PDR en 0dBm

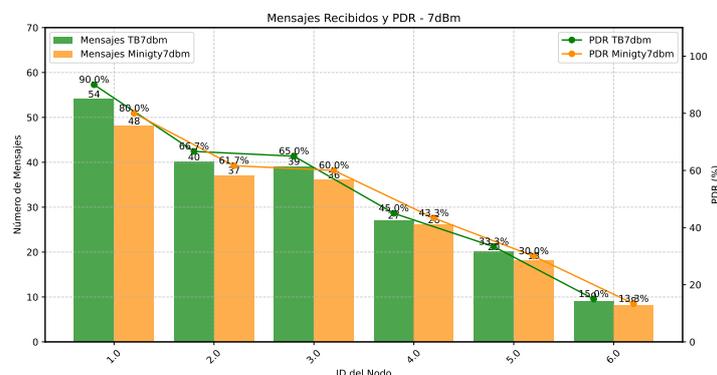


Figura 5.3: PDR en 7dBm

dBm y 7 dBm, fue baja, pero se muestra que la mayoría llegaron desde la malla LoRa hasta el servidor LoRaWAN. En contraste, la figura 5.4 muestra que la cantidad de mensajes que llegaron hacia el minigateway fue más del 90% en 5 nodos. Únicamente el nodo 6 no pasó del 25% de mensajes. Pero en el servidor LoRaWAN llegaron muchos menos mensajes que los alcanzados por el minigateway. Esto significa que el minigateway no fue capaz de reenviar todos los mensajes que le llegaron en esta prueba.

En la tabla 5.1 se muestra que la mayoría de nodos eligen enviar directamente los mensajes al MiniGateway, En la prueba realizada de 14 dBm, 6 mensajes eligen una ruta con más de un salto, En la prueba de 7 dBm ningún mensaje eligió una ruta indirecta y en la prueba de 0dbm solo un mensaje siguió con una ruta de más de un salto directo.

Análisis de máximos nodos en la red.

Actualmente, el protocolo de enrutamiento maneja 88 bytes de cabecera y 20 bytes de carga útil destinada a los mensajes de sensores posibles para transmitir.

El número máximo de nodos que el protocolo de enrutamiento puede

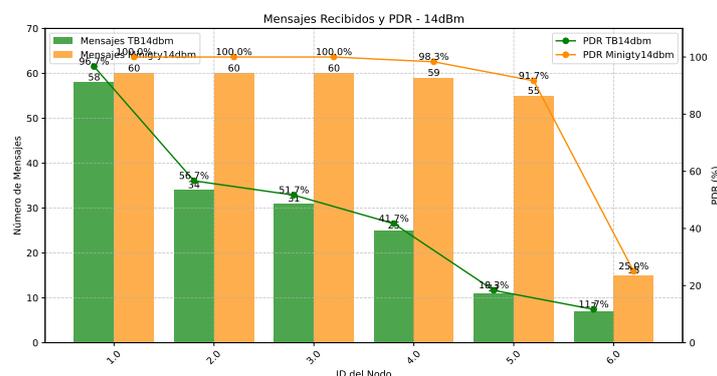


Figura 5.4: PDR en 14dBm

Cuadro 5.1: Comparación del número de mensajes con rutas de más de un salto

Potencia de Transmisión (dBm)	Mensajes con más de un salto
14 dBm	6
7 dBm	0
0 dBm	1

manejar depende del tamaño de la carga útil permitido por los módulos REYAX en este caso 240 bytes y del crecimiento de la cabecera con cada nodo agregado a la red. La tabla 5.2 muestra que la cantidad máxima de nodos que puede soportar este protocolo es 21,

Análisis del máximo número de nodos soportados por el protocolo si en cada retransmisión se agrega la carga útil de los sensores. La tabla 5.3 muestra que si en cada retransmisión se agrega la carga útil de los sensores, el número máximo de sensores que soporta el protocolo es de 7 nodos.

Cuadro 5.2: Distribución del tamaño de la cabecera y cálculo del número máximo de nodos

Elemento	Tamaño (bytes)
Tamaño base de la cabecera	
sourceNodeID	1
destinationNodeID	1
messageType	1
messageID	2
hopCounter	1
retransmissionsCount	1
routeQuality	1
Total cabecera fija	8
Tamaño fijo de datos de sensores	
Datos de sensores	20
Total fijo (cabecera + sensores)	28
Tamaño adicional por cada nodo agregado	
routingPath[MAX_NODES]	1
batteryPercentage[MAX_NODES]	1
batteryLevel[MAX_NODES]	2
snr[MAX_NODES]	2
rssi[MAX_NODES]	2
linkQuality[MAX_NODES]	2
Total por nodo	10
Cálculo del número máximo de nodos	
Tamaño máximo del payload	240
Tamaño ocupado por cabecera + sensores	28
Espacio disponible para nodos	212
Tamaño por nodo	10
Máximo de nodos soportados	21

Cuadro 5.3: Distribución del tamaño de la cabecera y cálculo del número máximo de nodos con payload por nodo

Elemento	Tamaño (bytes)
Tamaño base de la cabecera (sin nodos)	
sourceNodeID	1
destinationNodeID	1
messageType	1
messageID	2
hopCounter	1
retransmissionsCount	1
routeQuality	1
Total cabecera fija	8
Tamaño adicional por cada nodo agregado	
routingPath[MAX_NODES]	1
batteryPercentage[MAX_NODES]	1
batteryLevel[MAX_NODES]	2
snr[MAX_NODES]	2
rsssi[MAX_NODES]	2
linkQuality[MAX_NODES]	2
Subtotal cabecera por nodo	10
Datos de sensores por nodo	
Datos de sensores	20
Total por nodo (cabecera + sensores)	30
Cálculo del número máximo de nodos	
Tamaño máximo del payload	240
Tamaño ocupado por cabecera fija	8
Espacio disponible para nodos	232
Tamaño por nodo (cabecera + sensores)	30
Máximo de nodos soportados	7

6. Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros

6.1 Conclusiones

Para la cabecera del protocolo de enrutamiento, no es necesario incluir los valores de SNR y RSSI y calidad del enlace por cada nodo, esto se puede calcular en cada nodo y retransmitir únicamente las rutas disponibles. Esto provocará que la cantidad de nodos que soporta el protocolo de enrutamiento aumente.

La cantidad de mensajes que llegaron desde la red de malla LoRa hasta LoRaWAN fue menos que la cantidad de mensajes enviados por cada nodo. Posiblemente debido a la configuración del Minigateway o del servidor de red, algunos mensajes de la red de malla LoRa, se muestran duplicados en el servidor de red.

Los resultados obtenidos durante las pruebas del protocolo de enrutamiento sugieren que puede obtener mejores resultados en una implementación real, como la de monitorización de parámetros de la agricultura para el que fue pensado. Esto se debe a que los intervalos de retransmisión serán más amplios, lo que reducirá la colisión y pérdida de paquetes.

La configuración de parámetros LoRa y LoRAWAN actuales admiten manejar 108 bytes de carga útil, en contraste, si se cambia la configuración, principalmente del SF, a una mayor, la cantidad de bytes disponibles se reduce, lo que provoca que el protocolo soporte menos nodos.

El algoritmo de Dijkstra utilizado para el cálculo de la ruta más corta para el mensaje de los nodos demuestra ser efectivo en esta red de malla LoRa con pocos nodos, Esto se evidencia en las pruebas realizadas, donde casi todos los mensajes fueron directos hacia el Minigateway sin utilizar rutas con saltos, pero si existieron un total de 7 mensajes que tomaron rutas con saltos intermedios.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda incrementar la cantidad de pruebas del protocolo para registrar su comportamiento en diferentes situaciones.

Se recomienda considerar el uso de más algoritmos de búsqueda de caminos más cortos, y con otros enfoques como los orientados a aumentar la duración de las baterías, para comparar resultados y registrar cuál es el mejor.

Se recomienda para implementar el protocolo de enrutamiento considerar el tipo de memoria del microcontrolador base del nodo seleccionado, En los microcontroladores existen tipos de memoria que rellenan con bytes las estructuras de datos para mantener la memoria más organizada. Si esto ocurre, se pierde tamaño de carga útil para el envío de mensajes,

Se recomienda desarrollar un mecanismo dinámico para la selección de los parámetros LoRa para el protocolo de enrutamiento, que permita mantener coherente la malla LoRa con el Minigateway y de esta forma mejorar el uso del espectro de frecuencias ocupado.

Se recomienda desarrollar un sistema de medición y análisis de latencia para evaluar el tiempo de propagación de los mensajes LoRa a través de la red de malla en diferentes distancias, considerando los retardos en cada salto de enrutamiento, el procesamiento en los nodos intermedios y el tiempo total de entrega. Este estudio permitiría identificar cuellos de botella en la transmisión, optimizar los parámetros de red y establecer métricas de calidad de servicio para diferentes tipos de aplicaciones agrícolas.

6.3 Trabajos Futuros

Como trabajo futuro queda el desarrollo de un simulador que permita comprobar el comportamiento del protocolo de enrutamiento desarrollado para extender la cobertura de la red LoRaWAN. Actualmente, es muy difícil comprobar el funcionamiento completo del protocolo. Por esta razón, un simulador que funcione dentro de los nodos y permita realizar pruebas del protocolo desde el laboratorio es necesario.

Como trabajo futuro queda desarrollar un sistema de pruebas y adquisición de datos organizado para obtener métricas ordenadas del protocolo de enrutamiento que permitan su mejora.

Referencias

- Abdullah, M., Page, |., & Ehsan, A. (2014). Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: Classifications and Challenges. www.questjournals.org
- Ahmad, R., Alhasan, W., Wazirali, R., & Aleisa, N. (2024). Optimization Algorithms for Wireless Sensor Networks Node Localization: An Overview. *IEEE Access*, 12, 50459-50488. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3385487>
- Albeyboni, H. J., & Ali, I. A. (2023). LPWAN TECHNOLOGIES FOR IOT APPLICATIONS: A REVIEW.
- Basili, F., Parrino, S., Peruzzi, G., & Pozzebon, A. (2021). IoT multi-hop facilities via LORA modulation and LORAWAN protocol within thin linear networks. *2021 IEEE Sensors Applications Symposium, SAS 2021 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/SAS51076.2021.9530117>
- BECOLVE, D. (2022, junio). Conceptos básicos que te ayudarán a entender LoRa y LoRaWAN en minutos. <https://becolve.com/blog/conceptos-tecnicos-basicos-que-te-ayudaran-a-entender-lora-y-lorawan-low-power-wide-area-network-en-pocos-minutos/>
- Bensaleh, M. S., Saida, R., Kacem, Y. H., & Abid, M. (2020). Wireless Sensor Network Design Methodologies: A Survey. <https://doi.org/10.1155/2020/9592836>
- Bhatia, D. (2016). A Comparative Analysis of Proactive, Reactive and Hybrid Routing Protocols over open Source Network Simulator in Mobile Ad Hoc Network. <http://www.ripublication.com>
- Centelles, R. P., Meseguer, R., Freitag, F., Vinas, R. B., & Navarro, L. (2024). A minimalistic distance-vector routing protocol for LoRa mesh networks. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3443605>
- Chang, C.-Y., Lin, C.-C., Liao, W.-H., & Roy, D. S. (2020). A Distributed Multilevel Data Collection Mechanism Using Bus in WSNs. *IEEE Systems Journal*, 15, 4554-4565. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.3015553>
- Chanwattanapong, W., Hongdumnuen, S., Kumkhet, B., Junon, S., & Sangmahamad, P. (2021). LoRa Network Based Multi-Wireless Sensor

- Nodes and LoRa Gateway for Agriculture Application. *Proceedings - 2021 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovation Electricals and Electronics, RI2C 2021*, 133-136. <https://doi.org/10.1109/RI2C51727.2021.9559804>
- Chilamkurthy, N. S., Pandey, O. J., Ghosh, A., Cenkeramaddi, L. R., & Dai, H. N. (2022). Low-Power Wide-Area Networks: A Broad Overview of Its Different Aspects. *IEEE Access*, *10*, 81926-81959. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3196182>
- Daousis, S., Peladarinos, N., Cheimaras, V., Papageorgas, P., Piromalis, D. D., & Munteanu, R. A. (2024, enero). Overview of Protocols and Standards for Wireless Sensor Networks in Critical Infrastructures. <https://doi.org/10.3390/fi16010033>
- Dasiga, S., Bhatia, A. A. R., Bhirangi, A., & Siddiqua, A. (2020). LoRa for the last mile connectivity in IoT. *Proceedings of the 2020 9th International Conference on System Modeling and Advancement in Research Trends, SMART 2020*, 195-200. <https://doi.org/10.1109/SMART50582.2020.9337114>
- Dias, J., & Grilo, A. (2020). Multi-hop LoRaWAN uplink extension: specification and prototype implementation. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, *11*(3), 945-959. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01207-3>
- Egli, P. R. (2015). LPWAN-Low Power Wide Area Network OVERVIEW OF EMERGING TECHNOLOGIES FOR LOW POWER WIDE AREA NETWORKS IN INTERNET OF THINGS AND M2M SCENARIOS LPWAN LOW POWER WIDE AREA NETWORK LPWAN-Low Power Wide Area Network. https://indigoo.com/dox/itdp/12_MobileWireless/LPWAN.pdf
- Faris, M., Mahmud, M. N., Salleh, M. F. M., & Alnoor, A. (2023, enero). Wireless sensor network security: A recent review based on state-of-the-art works. <https://doi.org/10.1177/18479790231157220>
- Ghahroudi, M. S., Shahrabi, A., Ghoreyshi, S. M., & Alfouzan, F. A. (2023). Distributed Node Deployment Algorithms in Mobile Wireless Sensor Networks: Survey and Challenges. *ACM Transactions on Sensor Networks*, *19*. <https://doi.org/10.1145/3579034>
- Heydarishahreza, N., Ebadollahi, S., Vahidnia, R., & Dian, F. J. (s.f.). Wireless Sensor Networks Fundamentals: A Review.
- Heydarishahreza, N., Ebadollahi, S., Vahidnia, R., & Dian, F. J. (2020). Wireless Sensor Networks Fundamentals: A Review. *2020 11th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, 0001-0007. <https://doi.org/10.1109/IEMCON51383.2020.9284873>
- INCIBE. (2023, junio). LoRaWAN and its contribution to IIoT | INCIBE-CERT | INCIBE. <https://www.incibe.es/en/incibe-cert/blog/lorawan-and-its-contribution-iiot>

- Islam, M. M., Nooruddin, S., Karray, F., & Muhammad, G. (2023). Internet of Things: Device Capabilities, Architectures, Protocols, and Smart Applications in Healthcare Domain. *IEEE Internet of Things Journal*, 10, 3611-3641. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3228795>
- Kais, M., Eddy, B., Frederic, C., & Fernand, M. (2018, octubre). *Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT*. Institute of Electrical; Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2018.8480255>
- Kandris, D., Nakas, C., Vomvas, D., & Koulouras, G. (2020, marzo). Applications of wireless sensor networks: An up-to-date survey. <https://doi.org/10.3390/asi3010014>
- Kim, D. H., Lee, E. K., & Kim, J. (2019). Experiencing LoRa network establishment on a smart energy campus testbed. *Sustainability (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/su11071917>
- Lalle, Y., Fourati, M., Fourati, L. C., & Barraca, J. P. (2021). Routing Strategies for LoRaWAN Multi-Hop Networks: A Survey and an SDN-Based Solution for Smart Water Grid. *IEEE Access*, 9, 168624-168647. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3135080>
- LoRaWAN® Formally Recognized as ITU International Standard for Low Power Wide Area Networking - LoRa Alliance®. (s.f.). <https://lora-alliance.org/lora-alliance-press-release/lorawan-formally-recognized-as-itu-international-standard-for-low-power-wide-area-networking/>
- MacAraeg, K. C. V. G., Hilario, C. A. G., & Ambatali, C. D. C. (2020). LoRa-based Mesh Network for Off-grid Emergency Communications. *2020 IEEE Global Humanitarian Technology Conference, GHTC 2020*. <https://doi.org/10.1109/GHTC46280.2020.9342944>
- Marchese, M., Moheddine, A., & Patrone, F. (2019). Towards Increasing the LoRa Network Coverage: A Flying Gateway [Accessed: 16-Nov-2024]. *Proceedings of the International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*. <https://www.scnlditen.unige.it/publications/ISAECT-2019-LoRa.pdf>
- Meyer, J., Bischoff, R., Feltrin, G., & Motavalli, M. (2010a). Wireless sensor networks for long-term structural health monitoring. *Smart Structures and Systems*, 6, 263-275. <https://doi.org/10.12989/sss.2010.6.3.263>
- Meyer, J., Bischoff, R., Feltrin, G., & Motavalli, M. (2010b). Wireless sensor networks for long-term structural health monitoring. *Smart Structures and Systems*, 6, 263-275. <https://doi.org/10.12989/sss.2010.6.3.263>
- Mrabet, H., Belguith, S., Alhomoud, A., & Jemai, A. (2020, julio). A survey of IoT security based on a layered architecture of sensing and data analysis. <https://doi.org/10.3390/s20133625>

- Nguyen, T. T., Nguyen, H. H., Barton, R., & Grossetete, P. (2019). Efficient Design of Chirp Spread Spectrum Modulation for Low-Power Wide-Area Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(6), 9503-9515. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2929496>
- Rawat, P., Singh, K. D., Chaouchi, H., & Bonnin, J. M. (2014). Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies. *Journal of Supercomputing*, 68, 1-48. <https://doi.org/10.1007/s11227-013-1021-9>
- Regional Parameters | The Things Network. (s.f.). <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/>
- Rodrigues Cotrim, J., Borges Margi, C., & Kleinschmidt, J. H. (2022). Design of a Gateway-based relay node for LoRaWAN multihop networks. *2022 Symposium on Internet of Things, SIoT 2022*. <https://doi.org/10.1109/SIoT56383.2022.10070205>
- Saidarao, S., & Sekhar, R. A. R. C. (2017). Proactive and Reactive Routing Protocols In Wireless Sensor Networks. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 4. www.ijarset.com
- Semtech. (2015, mayo). *AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics* (inf. téc.) (Revision 2. Available online at www.semtech.com). Semtech Corporation.
- Semtech Corporation | Company Overview | Semtech. (s.f.). <https://www.semtech.com/company>
- Sharma, S., & Kaur, A. (2021). Survey on Wireless Sensor Network, Its Applications and Issues. *Journal of Physics: Conference Series*, 1969. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1969/1/012042>
- Slats, L. (2020, enero). A Brief History of LoRa: Three Inventors Share Their Story. <https://blog.semtech.com/a-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference>
- Sole, J. M., Centelles, R. P., Freitag, F., & Meseguer, R. (2022). Implementation of a LoRa Mesh Library. *IEEE Access*, 10, 113158-113171. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3217215>
- Syed, A. S., Sierra-Sosa, D., Kumar, A., & Elmaghraby, A. (2021). Iot in smart cities: A survey of technologies, practices and challenges. *Smart Cities*, 4, 429-475. <https://doi.org/10.3390/smartcities4020024>
- Teja, R. (2024, abril). Basics of Wireless Sensor Networks (WSN) | Classification, Topologies, Applications - ElectronicsHub USA. <https://www.electronicshub.org/wireless-sensor-networks-wsn/>
- thethingsNetwork. (s.f.). What are LoRa and LoRaWAN? | The Things Network. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>
- Thiasiriphet, T., & Teich, W. G. (2021). Combining OFDM-MFSK and Chirp Spread Spectrum Modulation for Applications in Low-Power Wide-Area Networks. *2021 15th International Conference on Signal*

- Processing and Communication Systems, ICSPCS 2021 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICSPCS53099.2021.9660291>
- Tian, P., Boano, C. A., Ma, X., & Wei, J. (2023). LoRaHop: Multi-Hop Support for LoRaWAN Uplink and Downlink Messaging. *IEEE Internet of Things Journal*. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3263630>
- Yang, J., Sharma, A., & Kumar, R. (2021). IoT-based framework for smart agriculture. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 12, 1-14. <https://doi.org/10.4018/IJAEIS.20210401.oa1>

Glosario

ADC Analog To Digital Converter – Convertidor analógico digital.

AODV Ad-hoc on demand distance vector – enrutamiento basado en vector de distancia bajo demanda en redes ad-hoc.

BW Band Width – Ancho de Banda.

CR Code Rate – Tasa de codificación.

CSS Chirp Spread Spectrum – Espectro Ensanchado por Señales Chirp.

DR Data Rate – Velocidad de datos.

DSDV Destination-Sequenced Distance Vector Routing – Enrutamiento de Vector Distancia con Secuencia de Destino.

IoT Internet of Things – Internet de las Cosas.

ISM Industrial Scientific Medic – Industrial científico y medico.

ITU International Telecommunications Union – Union internacional de telecomunicaciones.

LAN Local Area Network – Redes de área local.

LoRa Long Range – Largo Alcance.

LoRaWAN LoRaWAN – Largo Alcance Red de área amplia .

LPWAN Low Power Wide Area Network – Red de área amplia de baja potencia.

NB-IoT Narrow Band Internet of Things – Banda estrecha Internet de las cosas.

OSI Open System Interconnection – Modelo de interconexión de sistemas abiertos.

PAN Personal Area Network –Redes de área personal.

PDR Packet Delivery Rate – Tasa de entrega de paquetes.

PRR Packet Reception Rate – Tasa de recepción de paquetes.

RAM Random Acces Memory – Memoria de acceso aleatorio.

RSSI Received Signal Strength Indicator – indicador de fuera de la señal recibida.

SF Spread Factor – Factor de propagación.

SNR Signal to Noise Ratio – Relación señal a ruido.

TTN The Things Network – La red de las cosas.

WSN Wireless Sensor Networks – Redes de Sensores Inalámbricos.