

Integrantes:

- Andres Felipe Sanchez Sanchez
- Sergio Alejandro Pineda Vejar
- Cristian David Gonzalez Carrillo
- Cristian Adolfo Baquero Pico

Marco Teórico

El Internet de las cosas (IoT) representa un ecosistema de dispositivos autónomos capaces de detectar, comunicarse y cambiar dinámicamente sin necesidad de intervención humana. Esta tecnología ya se ha adoptado en muchos escenarios, desde la industria hasta la agricultura, y desde las zonas rurales hasta las ciudades inteligentes , y se espera que el número de dispositivos IoT aumente a 22 mil millones para 2025 . Centrar la atención, en particular, en las redes de IoT a gran escala, la conectividad de largo alcance y la eficiencia energética son requisitos desafiantes que se han cumplido con tecnologías de redes de área amplia y de baja potencia (LPWAN), como LoRaWAN, NB-IoT y SigFox . Estas redes combinan un uso eficiente de la batería (incluso diez años) de los dispositivos de la red y una amplia cobertura (incluso varios kms), a costa de una baja tasa de bits de transferencia.

Entre las tecnologías LPWAN, LoRaWAN se considera una de las más prometedoras, ya que es relativamente flexible y sencilla, tanto desde el punto de vista tecnológico como comercial . En una red LoRaWAN, los dispositivos finales (ED), que representan nodos de IoT (por ejemplo, sensores o actuadores), envían paquetes a puertas de enlace (GW), que los reenvían a un servidor de red (NS) al que están conectados a través de Internet (mediante WiFi, 3G / 4G, Ethernet, etc.).

En la capa física, LoRaWAN se basa en LoRa, que es una solución de capa física patentada por Semtech Corporation, y las capas de red y control de acceso al medio (MAC) han sido definidas por LoRa Alliance . La modulación LoRa se basa en la modulación de espectro ensanchado de chirp (Chirp Spread Spectrum (CSS)), que explota chirps (pulsos) cuyas frecuencias aumentan o disminuyen linealmente durante un cierto período de tiempo. Uno de los parámetros más importantes de la capa física es el factor de expansión (SF o spreading factor), que aumenta al aumentar los valores de la relación entre el ancho de banda de la señal y la velocidad de transferencia de cada símbolo. Manteniendo constante el ancho de banda, es posible mejorar la sensibilidad del receptor (y por lo tanto la distancia

máxima de comunicación) aumentando el tiempo en el aire (ToA o Air Time) (duración de la transmisión de un paquete por el canal), aumentando el SF. A menudo se supone que las transmisiones que utilizan diferentes factores de dispersión son ortogonales, aunque no se alcanzan una ortogonalidad perfecta.

Los dispositivos LoRa operan principalmente en bandas industriales, científicas y médicas (ISM) sin licencia, cuya disponibilidad y condiciones de uso difieren en las distintas regiones del mundo. Específicamente, en la Unión Europea, la implementación más extendida se basa en la banda ISM 863-870 MHz, aunque una versión de LoRa que trabaja a 2.4 GHz está ganando mucho terreno actualmente.

Tecnología LoRa

La modulación LoRa se encuentra en el nivel físico del protocolo de comunicación LoRaWAN. Esta modulación opera en la banda de radio ISM sub-GHz (para fin Industrial, Científico y Médico) utilizando una técnica de ensanchamiento de espectro. La modulación proporciona comunicación bidireccional a través de un espectro ensanchado CSS (Chirp Spread Spectrum) que difunde la señal de banda estrecha por medio de barridos de frecuencia. La señal modulada resultante es altamente resistente a ruidos e interferencias.

El transmisor modifica la frecuencia de la señal chirp en el tiempo sin cambiar la fase de la señal entre dos símbolos adyacentes. Si la frecuencia de modulación es lo suficientemente lenta como para asignar más energía al símbolo de chirp, los receptores ubicados a distancias muy grandes pueden decodificar la señal atenuada.

Las especificaciones de LoRaWAN definen tres tipos de nodos: los nodos clase A, B y C. Un dispositivo de clase A envía mensajes al módulo de puerta de enlace (gateway) durante ciertos períodos de tiempo, dependiendo sobre las especificaciones de su aplicación. Posteriormente el nodo de LoRa (el end device) abre una ventana de recepción para permitir que la puerta de enlace envíe un ACK, es decir un mensaje de reconocimiento u otro tipo de comandos. El gateway recibe los mensajes del nodo LoRa y los envía al servidor de red (NS).

La clase B amplía la clase A al programar ventanas de recepción; por otro lado, la clase C prolonga la clase A, manteniendo siempre la ventana de recepción abierta, excepto en los momentos en los que se envía información.

Normalmente, un dispositivo de clase A o clase B funciona con una batería; mientras tanto, un nodo tipo C es alimentado por la red eléctrica debido al alto consumo de energía.

Los parámetros que controlan la transmisión de LoRa son:

La comunicación LoRa admite múltiples factores de propagación (SF) (entre 6 y 12) para lograr el balancear el rango de comunicación o alcance y la tasa de transferencia de datos. También utiliza una técnica de corrección de errores hacia adelante (FEC) que, junto con la modulación LoRa, aumenta la sensibilidad del receptor. A Continuación se enumeran los principales parámetros de LoRa :

Parameters	Values
Spreading Factor (SF)	6 to 12
Channel Bandwidth (BW)	125 kHz, 250 kHz, 500 kHz
Power	-1 to 14 dBm

LoRaWAN es el protocolo de comunicación de la capa de control de acceso al medio (MAC) que utiliza la modulación LoRa a nivel físico. A Continuación se presenta la arquitectura del sistema de comunicación LoRa que incluye los módulos de dispositivo final (end devices) y los módulos de puerta de enlace (gateway) que retransmiten mensajes al servidor de red (network server) dentro del Arquitectura LoRa.

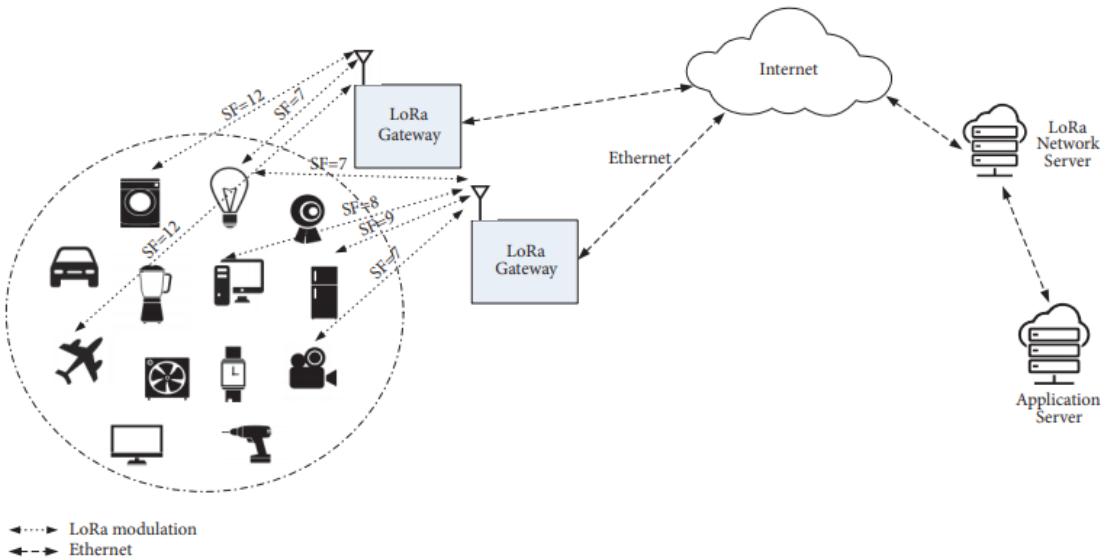


FIGURE 1: LoRaWAN communication system.

La tasa de transferencia de datos varía de 300 bps a 37,5 kbps, dependiendo del factor de propagación (SF) y el ancho de banda del canal de comunicación. Un menor factor de propagación significa chirps más rápidos y por ende una tasa de transferencia de datos mayor, asimismo un menor factor de propagación reduce el alcance de las transmisiones de LoRa porque incrementa la tasa de transferencia de bits y hace más difícil al receptor captar fidedignamente la señal. Este factor de propagación también permite controlar la congestión de la red, pues a menor factor de transferencia mayor cantidad de paquetes por segundo se transmiten, dado que la tasa de transferencia de datos aumenta. Cabe resaltar que los factores de propagación son ortogonales, por lo que las señales moduladas con distintos factores de propagación se transmiten sobre el mismo canal de frecuencia al mismo tiempo.

Un LoRa Gateway tiene la capacidad de recibir y difundir mensajes simultáneamente con diferentes SF (factores de propagación). La arquitectura específica de LoRa está compuesta por nodos finales y módulos de puerta de enlace que retransmiten mensajes de los nodos terminales al servidor de red. Los mensajes enviados por los dispositivos finales LoRa son recibidos por todos los dispositivos Gateway, por lo que se crea una topología de tipo estrella. La implementación de esta red con este grado de redundancia aumenta la probabilidad de que se reciba un mensaje con éxito, contribuyendo a la posibilidad de implementar servicios como la localización.

La especificación LoRa permite que los dispositivos y las puertas de enlace puedan transmitir en cualquier momento. No existe un algoritmo o protocolo de verificación de canal o CSMA (acceso múltiple con detección de portadora) implementado para evitar colisiones. El protocolo LoRaWAN utiliza un mecanismo de comunicación tipo ALOHA, donde la longitud del paquete es variable. Según las especificaciones de LoRa, los nodos pueden transmitir en cualquier canal y en cualquier momento utilizando cualquier velocidad de datos disponible, si se cumplen ciertas reglas. Generalmente el nodo selecciona el canal de modo pseudoaleatorio para cada transmisión.

El desplazamiento de frecuencia ofrece la principal ventaja de la comunicación LoRa que es la resistencia a interferencias. Asimismo cada nodo LoRa respeta el

parámetro del ciclo de trabajo (fracción del tiempo en la que el dispositivo se encuentra transmitiendo datos) y otras regulaciones asignadas a las regiones en las que opera.

Tasa de Transmisión LoRaWAN

Los nodos LoRa tienen la posibilidad de configurar la velocidad de datos, según la normativa regional. Los ajustes de velocidad de datos son numerados del 0 al 6 y representan un conjunto predefinido de configuraciones, así como el factor de propagación y la tasa de codificación.

Es posible seleccionar una determinada velocidad de transferencia de datos con la ayuda de algunos comandos a nivel MAC. Incluso la especificación recomienda la implementación de un cierto algoritmo para el control de velocidad de datos. Este algoritmo está controlado por el servidor de red que puede enviar comandos a los nodos MAC para aumentar o disminuir la velocidad de datos, dependiendo del nivel de la señal recibida. Cuando se implementa un mecanismo de acuse de recibo, si el nodo no recibe los dos primeros reconocimientos consecutivos, automáticamente realiza una degradación de la velocidad de datos. A continuación se presentan las tasa de transferencia de datos de la especificación LoRaWAN:

TABLE 2: Data rate codes defined by LoRaWAN.

Data RateCode	Spreading Factor	Channel Width	Coding Rate	Data Rate
0	12	125 kHz	4/6	250 bps
1	11	125 kHz	4/6	440 bps
2	10	125 kHz	4/5	980 bps
3	9	125 kHz	4/5	1760 bps
4	8	125 kHz	4/5	3125 bps
5	7	125 kHz	4/5	5470 bps
6	7	250 kHz	4/5	11000 bps

La especificación LoRaWAN define un mecanismo para adaptar la tasa de transferencia de datos , conocido como el Adaptive Data Rate (ADR) sin dar ningún detalle sobre la selección de parámetros que realiza este algoritmo.

Te Things Network (TTN) es un proveedor de servicios de agregación de datos que permite la creación de una red IoT. La infraestructura definida por TTN utiliza una versión modificada del algoritmo ADR que se puede aplicar solo a nodos estáticos (no se aplica a nodos en movimiento).

Desde el momento en que un nodo decide utilizar el algoritmo ADR, la red recopilará el parámetro SNR (signal to noise ratio) y el número de gateways que han recibido

dicha señal para los últimos 20 paquetes. Dicha información se procesa en orden para calcular cuánto margen debe usarse para aumentar o disminuir la velocidad de datos estableciendo un nivel de potencia de transmisión más bajo. Por lo tanto, se toma la decisión de cambiar la velocidad de datos.

Técnica de Acceso al Canal

El uso de una red LoRaWAN implica el uso de diferentes canales de comunicación que son configurados y monitoreados por dispositivos Gateway y la cantidad de canales depende de las restricciones regionales o otras configuraciones específicas a la red wifi. Algunos canales son dedicados exclusivamente a transmisión de datos y un canal dedicado a respuestas Gateway para los nodos LoRa y finalmente también existen canales usados para que los nodos puedan enviar peticiones al módulo gateway. Cuando un nodo LoRa envía un paquete un canal es aleatoriamente seleccionado y transmite sin antes realizar verificación del tipo de detección de portador y sin el intervalo de tiempo de sincronización preestablecido, además de que el largo del paquete es variables, el proceso de acceso descrito es llamado ALOHA. Después de que el nodo LoRa abre el receptor para dos intervalos cortos de recibimiento, el primero corresponde al canal de enlace ascendente y el segundo al canal de enlace descendente.

En LoRaWAN se definen diez enlaces de comunicación para la zona Europa, 8 de estos canales tienen múltiples canales de información que varían entre los 250 bps a los 5,5 kbps. Se tienen dos canales de alta velocidad que proveen una tasa de transferencia de 11 kbps y 50 kbps usando una frecuencia de modulación FSK.

El parámetro de SF (Spreading Factor) que ocurre en la modulación LoRa es básicamente el radio entre la tasa símbolo y la chip. El uso de un SF alto determina el incremento de la señal al parámetro de la proporción de ruido SNR, mejorando la sensibilidad del receptor que genera un efecto secundario que es el incremento del tiempo en el aire del paquete. El parámetro SF puede tomar valores entre 6 y 12.

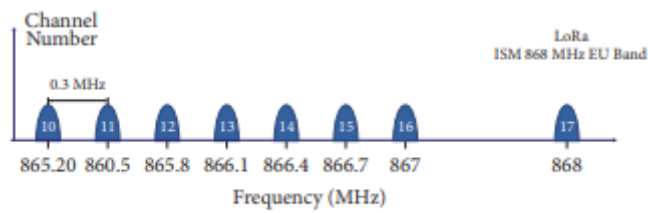


FIGURE 3: LoRaWAN channels for ISM 868 EU band.

En la figura 3 se muestran los canales de comunicación LoRa para la frecuencia ISM 868 MHz del área de la Unión Europea. En esta los canales se encuentran separados por cada 0.3 MHz menos para el canal 17 que es un canal de alta tasa de información.

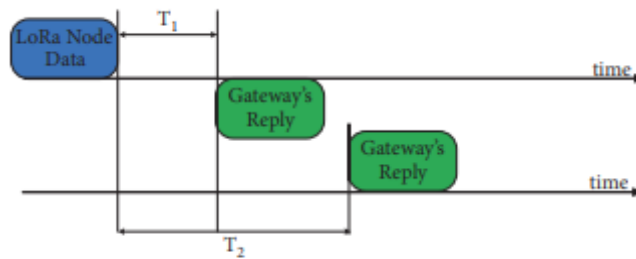


FIGURE 4: LoRaWAN reception time slots.

En la figura 4 se muestran los intervalos de recepción definidos a nivel del protocolo LoRaWAN, el tiempo de los intervalos es arreglado en diferentes intervalos de tiempo desde que el momento en que el nodo Lora transmite información. El primer intervalo de recepción permanece abierto durante T_1 segundos después de que la transmisión en el enlace ascendente es completada y el segundo intervalo se abre un segundo después. El canal de enlace ascendente es usado para el primer intervalo mientras que el canal de enlace descendente es usado para el segundo intervalo, la razón para usar este mecanismo de comunicación es para reducir el consumo de energía asociado al proceso de comunicación.

El nodo LoRa no abre el segundo intervalo de comunicación cuando recibe una franja dentro del primer intervalo, también es posible enviar una recepción de reconocimiento que puede ser requerida por el módulo Gateway y el nodo LoRa. La especificación LoRa no especifica el largo de los intervalos de recepción, pero este debe ser lo suficientemente largo para permitir al receptor detectar eficientemente la permeabilidad del paquete LoRa necesitado para la sincronización. De tal manera, el valor de T_1 es configurable e implícitamente igual al del segundo periodo de tiempo.

Las especificaciones de LoRaWAN definidos por la alianza LoRa, un módulo Gateway puede transmitir información a la clase A de un nodo, sólo dentro de un intervalo que puede ser iniciado sólo después que un nodo LoRa ha enviado un paquete. Lo anterior se realiza con el propósito de disminuir el consumo de energía del nodo LoRa sin escatimar el módulo Gateway que no funciona con batería y así la clase A no puede garantizar el valor máximo del retraso para el enlace descendente de los mensajes y la clase B o C deben ser utilizados en aplicaciones sensibles a demoras.

Protocolos de Encaminamiento Para MANETs y sus protocolos

Los nodos de redes Ad-Hoc no permanecen estáticos mientras cumplen su función de actuar como enrutadores , por lo que no cuentan con Gateways, protocolos como DHCP y DNS al no contar con una infraestructura. De tal manera, estos deben suplir estas características almacenando la información de rutas en cada nodo y su direccionamiento, además de la aplicación de mecanismos de descubrimiento de rutas para la llegada de nuevos nodos a la red. Existen protocolos utilizados para los fines descritos anteriormente que son utilizados por los nodos y son enlistados a continuación.

- **Protocolos Proactivos:**

Bajo este método los nodos conservan información de rutas hacia los otros nodos participantes de la red, los protocolos proactivos consisten en aquellos que requieren de un intercambio periódico de mensajes con el fin de mantener sus tablas de enrutamiento actualizadas con salidas, permanencia y llegada de nodos a la red. Es permanente el envío de mensajes entre nodos, independiente de los cambios que se realicen a nivel de topología.

- Routing Information Protocol.
- Open Shortest Path First.

Destination Sequenced Distance-Vector (DSDV) :

Uso de número de secuencia de destino para conocer la cantidad de saltos requeridos para llegar un nodo, con el fin de mantener la red libre de bucles. Descrito el fin de este protocolo es necesario mencionar la manera en que es logrado:

- Actualización de tabla de rutas donde se especifica el destino y saltos necesarios para

llegar a esta. Dado el evento que no esté actualizada esta información se presentará pérdida de paquetes.

- Siempre se mantiene informado de los nodos involucrados en la topología.
- Número de secuencia que indica cuál es la información más actualizada, cada nodo posee uno. Estos aumentan conforme a la llegada de nodos, el más nuevo poseerá la información más actual de la red.

Wireless Routing Protocol (WRP) :

Método similar a DSDV con la diferencia del uso de varias tablas con el fin de mantener más precisa la información de los nodos. Este protocolo utiliza la información del siguiente salto y del penúltimo para resolver el problema concerniente con el conteo infinito de saltos. Actualiza las trayectorias para tomar la más corta mediante el uso de costes para alcanzar un destino.

Utiliza las siguientes tablas:

- Tabla de distancias (DT).
- Tabla de rutas (RT).
- Tabla de coste de un enlace (LCT).
- Lista de mensajes de retransmisión (MRL).

Optimized Link State Routing (OLSR) :

Bajo este protocolo se busca la optimización del número de mensajes de control producidos en la red, puesto que la retransmisión de mensajes de control que informan de la topología de la red es costoso. La manera para solucionar este problema de costos es mediante la selección de un conjunto de nodos MultiPoint Relays (MPR's) que habilitan el alcance a cualquier nodo de la red. Los nodos MPR's poseen un subconjunto de nodos que habilitan una distancia de dos saltos y es actualizado conforme al cambio de topología, permitiendo la entrada de nuevos nodos MPR's que permiten mantener un tamaño reducido de la tabla.

La información provista bajo esta modalidad permite el cálculo del camino más corto para cualquier nodo que esté conectado a uno MPR, con el fin de disminuir los costos se hacen las actualizaciones de manera periódica. Bajo este protocolo se reduce la

sobrecarga, gracias a la actualización de sólo nodos MPR y cuando se requiere de una red con topología dispersa se hacen las actualizaciones con una periodicidad más amplia y así las rutas pueden ya no existir o ser más cortas.

- **Protocolos Reactivos:**

Para este caso las tablas son actualizadas solamente de ser necesario, es también llamado enrutamiento en demanda. Con el propósito de enviar un mensaje, un nodo revisa si posee una tabla de enrutamiento y en caso de no tenerla, se realiza una búsqueda por descubrimiento para establecer la ruta hacia su destino, desempeñándose mejor al no realizar mantenimiento de rutas por cambios originados en la topología. Es importante decir que al no actualizar las tablas la red completa no es conocida pues sólo se conocen los de las rutas activas.

Dynamic Source Routing (DSR):

Este protocolo busca restringir el ancho de banda, eliminando las actualizaciones periódicas, que es requerido por los paquetes de control. Con el fin de obtener información de la topología, se aprovecha el envío de mensajes que crea un camino y se toma la información de su recorrido.

El proceso de descubrimiento de rutas es dinámico, empieza al un nodo transmitir un paquete de datos hacia un destino. En el primer momento se inunda la red con la transmisión de paquetes Route Request (RREQ) con un identificador del nodo origen y el destino, así la ruta es parcialmente calculada. Cuando un RREQ llega a un nodo es retransmitido a los vecinos hasta que finalmente el nodo destino también lo recibe y responde con un Route Reply (RREP) dirigido al nodo origen, tomando la ruta devuelta.

Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV):

Mensajes de control no son utilizados hasta que un nodo necesite de una ruta hacia su destino, sólo se mantienen las rutas necesarias. Se aprovecha del descubrimiento de ruta en demanda para evitar costos de mantenimiento de rutas y es aprovechado cuando el

tráfico de red es esporádico y dirigido hacia un pequeño subconjunto de nodos.

Utiliza tablas de enrutamiento, una entrada por cada nodo para propagar un Route Reply (RREP) hacia el remitente con el fin de luego hacer el envío de paquetes y utiliza número de secuencia para evitar bucles de enrutamiento y mantener un tipo de actualización. Se usa un método de purga que retira rutas antiguas así están puedan seguir siendo utilizadas siempre en cuanto se tenga una más que sea más reciente su formación,

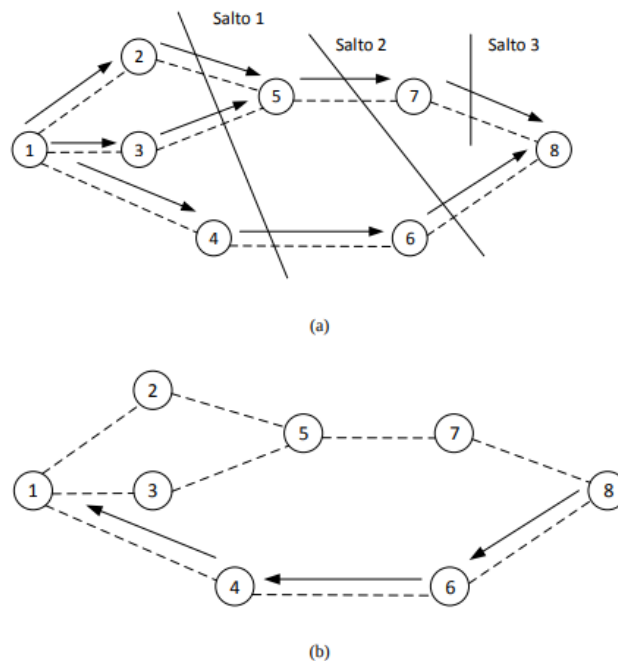


Figura 0.1 (a) Propagación del paquete RREQ y (b) Camino establecido por el paquete RREP [32]

- **Protocolos Híbridos:**

Este protocolo divide la red en grupos para que utilicen un protocolo proactivo y para conocer rutas usan uno reactivo. Bajo las características dadas, no es necesario inundar la red con emisión de mensajes de control.

Zone Routing Protocol (ZRP):

Usa un protocolo reactivo bajo una zona delimitada y hacia el exterior uno reactivo, es usado para redes grandes con alta tasa de movilidad. Los nodos tienen la tarea de elegir los dispositivos periféricos que permiten llegar hacia nodos de otro subconjunto, las zonas o subconjuntos son delimitados por un número de saltos determinado automáticamente.

Cuando un nodo no pertenece a la zona, se realiza una búsqueda por descubrimiento de ruta y al llegar al destino se envía un mensaje de respuesta al remitente.

Hazy Sighted Link State Protocol (HSLs):

Está basado en difusión limitada, no posee protocolos reactivos, pero parcialmente tiene un comportamiento parecido al usar rutas óptimas. Los nodos más cercanos envían actualizaciones de sus enlaces con mayor frecuencia que los que se encuentran lejanos.

Se cuenta con información parcial para establecer una ruta de llegada al destino, esta puede cambiar conforme el paquete es enviado entre la red, por lo que en ocasiones tomará rutas sub-óptimas.

Referencias

[1] Lavric, A., Popa, V. (2018, junio 28). Performance Evaluation of LoRaWAN Communication Scalability in Large-Scale Wireless Sensor Networks. Recuperado de: <https://downloads.hindawi.com/journals/wcmc/2018/6730719.pdf>

[2] Carrión, B., Delgado, L. (2015, enero). Simulación y análisis de redes esporádicas móviles Ad-Hoc. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7777/1/UPS-CT004636.pdf>