

**Estudio sobre las características del protocolo de transmisión de LoRa**

Julian David Olivares Auza

Universitaria Agustiniana  
Facultad de Ingenierías  
Ingeniería en Telecomunicaciones  
Bogotá D.C.  
2020

**Estudio sobre las características del protocolo de transmisión de LoRa**

Julian David Olivares

Director

Carlos Andres Gomez Ruiz

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero en Telecomunicaciones

Universitaria Agustiniana  
Facultad de Ingenierías  
Ingeniería en Telecomunicaciones

Bogotá D.C.

2020

## **Dedicatoria**

*Dedico esta tesis a mis compañeros de clase que durante el tiempo de estudio me ayudaron y mostraron un gran interés, cordialidad para resolver muchas dudas. A mis padres quienes me apoyaron todo el tiempo y me impulsaron a no abandonar cuando las cosas no salían bien.*

*A mi novia Kelly quien me apoyo para continuar y finalizar mis estudios.*

*A mis profesores, en especial al profesor Andrés Gómez que en los momentos en que necesite su consejo, su punto de vista y su colaboración para el desarrollo de mi trabajo de grado estuvo dispuesto a darme su apoyo.*

*Al departamento de bienestar y al equipo de fútbol quienes desde el primer día me recibieron y me permitieron crecer deportivamente y como profesional.*

*Para ellos y su apoyo incondicional dedico este trabajo de grado.*

## **Resumen**

Este proyecto cuyo objetivo es realizar un estudio sobre las características del protocolo de transmisión LoRa, iniciando un levantamiento de información de diferentes fuentes oficiales sobre el protocolo de transmisión, documentando las características más importantes sobre su funcionamiento, sus especialidades y su desarrollo; de la misma manera proponiendo y citando varios artículos científicos sobre el desarrollo de LoRa y LoRaWAN en diferentes escenarios. Abordado desde la metodología de investigación cuantitativa debido a que se realizará el levantamiento de información de implementaciones y desarrollos técnicos de la tecnología LoRa. Como principal documento LoRaWAN 1.1 Specification en donde nombran los aspectos y el procedimiento que debe usar el protocolo para su correcto y óptimo funcionamiento. Al ser una tecnología relativamente nueva y que está incursionando en el mundo sobre todo en la parte de IoT los artículos científicos encontrados son específicos y de gran ayuda ya que proponen características nuevas con el fin de optimizar el rendimiento del protocolo de transmisión.

## **Abstract**

This project whose objective is to carry out a study on the characteristics of the LoRa transmission protocol, initiating a survey of information from different official sources on the transmission protocol, documenting the most important characteristics on its operation, its specialties and its development; in the same way proposing and quoting several scientific articles on the development of LoRa and LoRaWAN in different scenarios. It is approached from the quantitative research methodology due to the fact that the information on the implementation and technical development of the LoRa technology will be collected. As the main document LoRaWAN 1.1 Specification where they name the aspects and the procedure that the protocol must use for its correct and optimal operation. As it is a relatively new technology that is entering the world mainly in the IoT part, the scientific articles found are specific and of great help since they propose new characteristics with the purpose of optimizing the performance of the transmission protocol.

## Tabla de contenidos

1.	Introducción .....	8
2.	Justificación .....	9
3.	Objetivos .....	10
3.1	Objetivo principal .....	10
3.2	Objetivos específicos .....	10
4.	Marcos de referencia.....	11
4.1	Marco conceptual .....	11
4.1.1	LoRa.....	11
4.1.2	LPWAN (Low-Power Wide-Area-Network).....	11
4.1.3	LoRaWAN. ....	12
4.1.4	OSI. ....	13
4.2	Marco teórico.....	14
4.3	Marco legal .....	15
5.	Metodología de investigación.....	17
6.	Administración del proyecto.....	18
6.1	Cronograma .....	18
6.2	Presupuesto.....	19
6.2.1	Presupuesto de personal.....	19
6.2.2	Presupuesto de equipo.....	19
6.2.3	Presupuesto general. ....	20
7.	Desarrollo del problema de investigación .....	21
7.1	LoRa .....	21
7.2	¿Qué es LoRaWAN? .....	22
7.2.1	Arquitectura de LoRaWAN. ....	22
7.2.2	LoRaWAN. ....	23
7.2.3	Descripción general de la especificación. ....	25
7.2.4	Factores de difusión y tiempo aire. ....	25
7.2.5	Velocidad de datos adaptativa. ....	26
7.3	Especificación LoRaWAN 1.1.....	26
7.3.1	Introducción. ....	26
7.3.2	Mensajes ascendentes. ....	27
7.3.3	Mensajes descendentes. ....	27
7.3.4	Mensajes de datos. ....	27

7.3.5 MAC Payload.....	28
7.3.6 Encabezado FHDR.....	28
7.3.7 Control de velocidad de datos adaptable en encabezado de trama. ....	28
7.3.8 Bit de reconocimiento del mensaje.....	29
7.3.9 Procedimiento de retransmisión.....	29
7.3.10 Contador.....	30
7.3.11 Cifrado de carga útil.....	30
7.3.12 Comando RejoinParamSetupReq.....	30
7.3.13 Activación del dispositivo final. ....	30
7.3.14 Diagrama de derivación clave.....	33
7.3.15 Activación personalizada. ....	35
7.3.16 Retransmisiones back-off.....	36
7.4 LoRaWAN Clase B .....	36
7.4.1 Enlace descendente Clase B.....	36
8.    Estado del arte de QoS en LoRa .....	39
Conclusiones.....	44
Referencias.....	45

## **1. Introducción**

La tecnología LoRa, esta es una solución de IoT o más conocido como Internet de las Cosas, esto se traduce a la interconexión de objetos comunes con internet. La diferencia de LoRa con otras tecnologías de transmisión de datos como WiFi, es que utiliza una frecuencia de radio más baja; al utilizar dicha frecuencia la distancia de transmisión de datos aumenta; la cantidad de datos que transporta no es muy grande y esto equivale a que sea una red de bajo consumo energético. Con el fin de facilitar la recopilación de datos de información, para ser usadas con algún fin ya sea laboral, personal o comercial.

Debido a que es una nueva tecnología inalámbrica no es muy claro cuáles son sus características, lo que permite este proyecto es verificar que los estándares teóricos se apliquen en la parte práctica, para poder definir de una mejor manera dicha caracterización.



## **2. Justificación**

El principal propósito de este proyecto es conocer de una manera más profunda las características de la tecnología LORA, esta tecnología inalámbrica se basa en la transmisión de datos a grandes distancias. Al ser una tecnología nueva, no se conoce muy bien su comportamiento por lo cual se hará un estudio teórico desarrollado por la recopilación de información de diferentes fuentes permitiendo entender plenamente todas sus características técnicas. Este estudio dejará disponible el material actualizado y en idioma español, para que los estudiantes de ingeniería puedan acceder a detalles del funcionamiento de estas tecnologías.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo principal**

Desarrollar un estudio sobre las características del protocolo de transmisión de LoRa.

#### **3.2 Objetivos específicos**

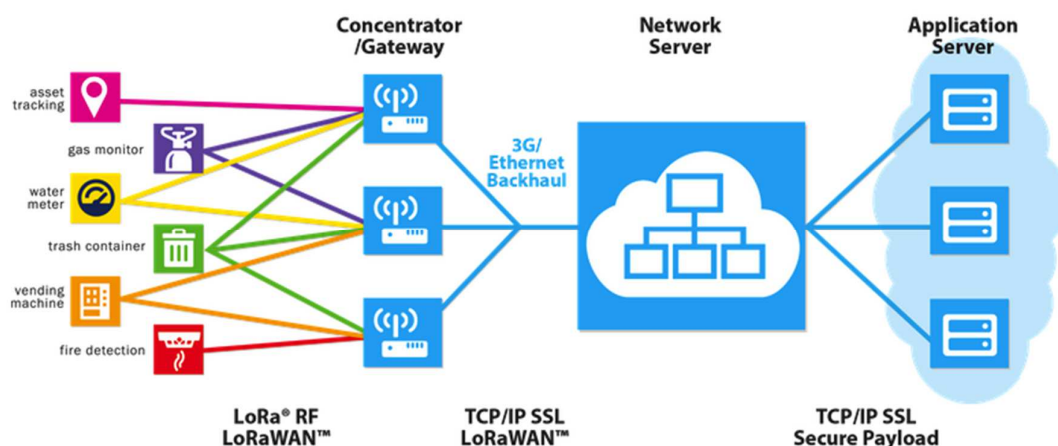
- Levantar información actual sobre protocolo LoRA en redes LPWAN.
- Documentar las características del protocolo de comunicaciones de LoRA y LoRAWAN.
- Levantar estado del arte del desarrollo de calidad de servicio (QoS) en redes LoRa.

## 4. Marcos de referencia

### 4.1 Marco conceptual

#### 4.1.1 LoRa.

LORA o Low Range es una tecnología IoT que usa un protocolo LPWAN para la transmisión de datos que usan las redes LoRaWAN para la modulación de RFLoRa o Low Range es una tecnología IoT que usa un protocolo LPWAN para la transmisión de datos que usan las redes LoRaWAN para la modulación de RFLoRa o Low Range es una tecnología IoT que usa un protocolo LPWAN para la transmisión de datos que usan las redes LoRaWAN para la modulación de RFLoRa o Low Range es una tecnología IoT que usa un protocolo LPWAN para la transmisión de datos que usan las redes LoRaWAN para la modulación de RFLoRa o Low Range es una tecnología IoT que usa un protocolo LPWAN para la transmisión de datos que usan las redes LoRaWAN para la modulación de RF. (Semtecc, s.f.) Como se aprecia en la figura 1.



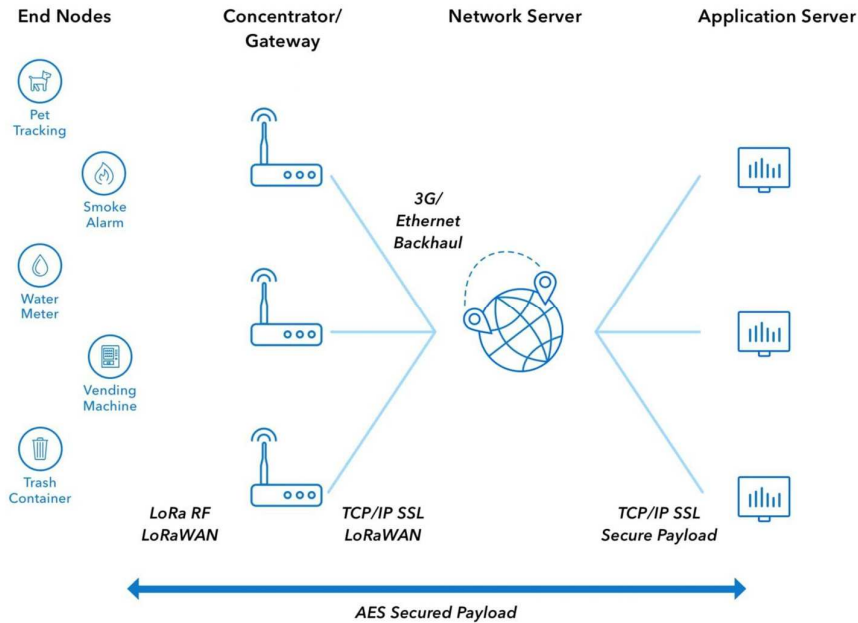
**Figura 1.** Topología típica de una solución LoRa. Aprendiendoarduino (2018).

#### 4.1.2 LPWAN (Low-Power Wide-Area-Network).

Una red de área amplia de baja potencia (LPWAN) es un tipo de red inalámbrica de área amplia de telecomunicaciones diseñada para permitir comunicaciones de largo alcance a una velocidad de bits baja entre cosas (objetos conectados), como sensores que funcionan con una batería.

LPWAN ofrece una vida útil de la batería de varios años y está diseñado para sensores y aplicaciones que necesitan enviar pequeñas cantidades de datos a larga distancia varias veces por hora desde diferentes entornos. LPWAN es una red que trabaja bajo la banda ISM





**Figura 3.**LoRaWAN. Redestelecom (2018).

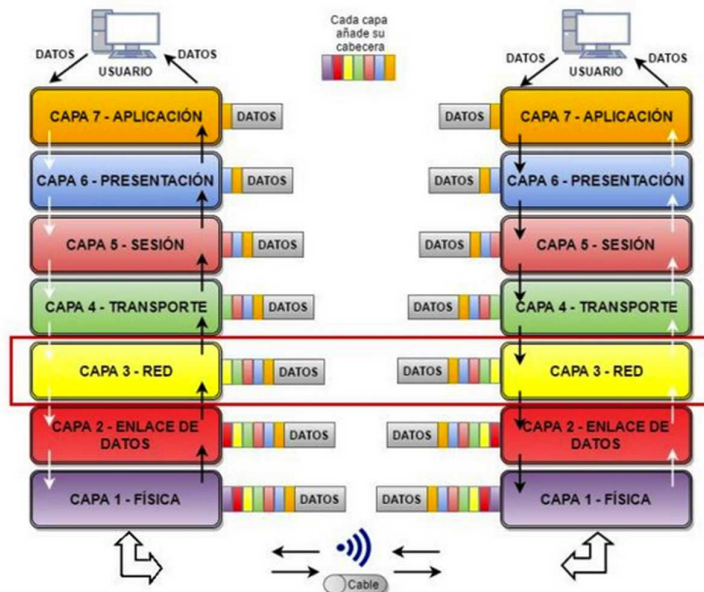
#### 4.1.4 OSI.

Es un modelo de referencia para los protocolos de comunicación de las redes informáticas o redes de computadores. Fue creado en la década de 1980 por la Organización Internacional de Normalización (ISO).

Al ser un modelo normativo, el Modelo OSI es realmente un constructo teórico, sin correlato directo en el mundo de lo tangible. No es más que un intento de normar las diversas y variadas voces tecnológicas del mundo, dado que existen numerosos fabricantes, compañías y tecnologías en el mundo de las telecomunicaciones. Este modelo tiene 7 capas entre las que se encuentran:

- Capa de Aplicación
- Capa de Presentación
- Capa de Sesión
- Capa de Transporte
- Capa de Red
- Capa de Datos
- Capa Física

La figura 4 muestra cómo se construyen los flujos de datos de cada comunicación entre las 7 capas del modelo OSI.



**Figura 4.** Flujo de datos en las capas del modelo OSI . Franpcinfo.com (2018).

## 4.2 Marco teórico

En la empresa Telecom Bretagne se realizó un estudio similar sobre el rendimiento de LORA haciendo varias pruebas en diferentes condiciones indicador de intensidad de señal recibida (RSSI) y la relación señal/ruido (SNR), la primera condición se hizo en cuanto a la calidad en puntos fijos, donde se decidieron 8 ubicaciones cada una a 3 km de la estación LORA, las 8 ubicaciones tienen varios obstáculos, una parte se encuentra en la parte más urbana de Rennes y la otra parte en las fronteras de la ciudad. Su estudio demuestra que el hecho de que se encuentre en la parte rural no siempre va a ser mejor la comunicación entre el punto de medición y la estación, se concluye que lo que afecta en la tasa de error es la elevación de la antena de la estación. Pero la cobertura ya sea al aire libre o en zonas urbanas es muy buena. (Petrić T, Goessens M, Nuaymi L., Toutain L. Pelov A., 2016).

En Rumania, Lavric A y Popa V (2017) en un artículo realizaron un estudio sobre LoRaWAN en donde su fin es evaluar su rendimiento, corroborando que entre más amplia sea su cobertura, mayor es el tiempo que toma la transmisión de datos, al utilizar la banda de frecuencias ISM que es un rango de frecuencias sin licencia y ratifica el bajo costo. También concluye que el tiempo en el aire del paquete es inversamente proporcional al factor de propagación y la velocidad de transferencia es directamente proporcional al ancho de banda que le asignen.

En otro trabajo Lavric A y Popa V (2017) hacen un análisis en cuanto a los requisitos que se deben tener en cuenta para IoT dejando en claro que LORA es un principal candidato para

abordar y solucionar los obstáculos que se enfrentan. Se basa en los aspectos más importantes como lo es la conectividad, la gestión eficiente de la energía, seguridad, complejidad y desarrollo rápido; además se debe tener en cuenta el servicio de monitoreo y de control remoto para a un óptimo funcionamiento. Para descrito anteriormente, LORA cumple con lo requerido para hacer parte de IoT.

Por otro lado, en un estudio del estado del arte de Lavric A y Popa V (2017), realizan un estudio enfocándose en las dificultades de que debe presentar LORA en el campo IOT, resalta un aspecto importante en LoRaWAN y es que al utilizar la modulación LORA los receptores son más perceptibles y más sensibles a la recopilación de la información. Compara las diferentes tecnologías inalámbricas como lo son WiFi, Bluetooth, ZigBee, NFC teniendo como principal objetivo el ancho de banda vs el rango y como se puede ver en la imagen LORA esta mejor posicionado que las demás tecnologías. Una de las ventajas es que se pueden integrar varios nodos y así mismo configurar la velocidad de modulación individualmente gracias al mecanismo integrado ADR (Adaptive Data Rate) en español adaptador de velocidad de datos.

En Croacia Rudeš H., Kosović I. N., Perković T., Čagalj M. (2018) realizan un experimento en condiciones reales de IoT con el fin de garantizar la confiabilidad de la transmisión de datos, inicialmente utilizan 2 tipos de pruebas, la primera prueba es en un espacio interior donde se instala una red de sensores con su respectiva estación central a una distancia de 7 metros, esto sin ningún tipo de obstáculo entre el emisor y el receptor, como segunda prueba utilizaran la misma configuración solo que se hará en pisos diferentes. Para la prueba exterior utilizaran un viñedo de 12 hectáreas de extensión, este viñedo tiene un terreno muy irregular, por lo que no había visibilidad entre la estación central y la estación de sensores, como resultado de las pruebas al aire libre y en interiores, se puede concluir que es una red de transmisión muy confiable en cuanto a la menor cantidad de datos se transmitan, su porcentaje de pérdida es muy poco mientras menor sea el tamaño de los paquetes.

### **4.3 Marco legal**

Para la realización del presente proyecto de investigación se deben tener en cuenta las siguientes reglamentaciones:

La Constitución Política de Colombia que en su artículo 75 establece que el espectro electromagnético es un bien público inajenable e imprescriptible sujeto a la gestión y control del Estado, y garantiza la igualdad de oportunidades en el acceso a su uso en los términos que fije la ley. Igualmente, dispone que, para garantizar el pluralismo informativo y la competencia, el Estado intervendrá por mandato de la ley para evitar las prácticas monopolísticas en el uso del espectro electromagnético. Y sus artículos 101 y 102 de la Constitución Política establecen

que el espectro electromagnético es un bien público que forma parte de Colombia y pertenece a la Nación.

LEY 1341 del 30 de Julio de 2009 "Por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las tecnologías de la información y las comunicaciones - tic-, se crea la agencia nacional de espectro y se dictan otras disposiciones".

La Resolución 711 del 11 de Octubre de 2016 "Por la cual se establecen las bandas de frecuencia de libre utilización dentro del territorio nacional y se derogan algunas disposiciones."



## 5. Metodología de investigación

La investigación Cuantitativa surge de una rama de la filosofía llamada Positivismo lógico, el cual está basado en leyes de lógica, predicciones y principios de verdad absoluta. Su método es usar la recolección de datos, el análisis estadístico y medición, con el fin de comprobar una hipótesis o establecer un patrón de comportamiento según sea el caso. Las fases o etapas del enfoque cuantitativo se pueden definir de la siguiente manera:

- Idea
- Planteamiento del Problema
- Revisión de literatura y desarrollo de marco teórico
- Visualización del alcance del estudio
- Recolección de datos
- Definición y selección de la muestra
- Desarrollo del diseño de investigación
- Elaboración de hipótesis y definición de variables
- Análisis de datos
- Reporte de resultados

Para este proyecto se utilizará como metodología la investigación cuantitativa, debido a que se realizará el levantamiento de información de implementaciones y desarrollos técnicos de la tecnología LoRa, para proceder a realizar toma de muestras de transmisiones de este protocolo, para así verificar el cumplimiento de los parámetros técnicos con los que fue diseñado.

## 6. Administración del proyecto

### 6.1 Cronograma

Tabla 1.

*Cronograma*

CRONOGRAMA DE TRABAJO					
ACTIVIDAD	2020				
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
Planteamiento del proyecto	x				
Investigación del proyecto		x			
Objetivos Generales y Específicos		x			
Marcos de Referencia, Marco Teórico y Metodología			x	x	x
	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10
Desarrollo LoRa	x	x	x	x	
Desarrollo ¿Que es LoRaWan?	x	x	x	x	
Desarrollo Especificación LoRaWAN 1.1					x
	Semana 11	Semana 12	Semana 13	Semana 14	Semana 15

Desarrollo Especificación LoRaWAN 1.1	x	x	x	x	x
	Semana 16	Semana 17			
Estado del arte de QoS en LoRa	x	x			
Terminación Proyecto		x			

*Nota:* Autoría propia.

## 6.2 Presupuesto

### 6.2.1 Presupuesto de personal.

Tabla 2

*Presupuesto de personal.*

Nombre	Horas dedicación semanal	Semanas dedicadas	Valor hora	TOTAL
Julian David Olivares	8	16	3.657	468.096
	TOTAL			468.096

*Nota:* Autoría propia.

### 6.2.2 Presupuesto de equipo.

Tabla 3

*Presupuesto de equipo*

Equipo	Justificación	Valor
Computador	Uso de equipo	1'500.000
	TOTAL	
		1'500.000

*Nota:* Autoría propia.

**6.2.3 Presupuesto general.**

Tabla 4

*Presupuesto general*

ITEM	TOTAL
Personal	\$ 468.096
Equipo	\$ 1.500.000
TOTAL	\$ 1.968.096

*Nota:* Autoría propia.

## 7. Desarrollo del problema de investigación

### 7.1 LoRa

LoRa es una nueva tecnología que está llegando con grandes propósitos y sobretodo con muchas expectativas para los posibles usuarios, los principales atributos o características son:

- Rango.
- Consumo de energía.
- Ancho de banda.

LoRa cumple con las necesidades para irrumpir en el campo IoT en cuanto a bajo costo, y transmisión de paquetes de datos de poco peso pero con una amplia cobertura, este sistema se puede implementar en diferentes campos, como los lugares de parqueo disponibles, sistemas de riego o cualquier otra aplicación a situaciones de la vida cotidiana. Para poder iniciar este proceso debe entenderse que para comunicarse inalámbricamente como lo requiere LoRa necesitamos los paquetes de datos o la información que es codificada en unos y ceros que son los llamados BITS, para que estos bits sean enviados deben ser modulados y viajan por lo que se conoce como ondas electromagnéticas, que pueden ser manipuladas según su amplitud frecuencia y fase.

El tipo de modulación que usa LoRa es llamado Chirp Spread Spectrum, que es un tipo de modulación que han usado los equipos militares y los equipos de comunicación espacial, ya que tiene un tipo de resistencia a la interferencia y así mismo permite que la transmisión del paquete llegue a su destino reduciendo su porcentaje de pérdida. Aunque su velocidad de transmisión es baja (300 bps y 11 Kbps) el paquete máximo depende de la región en donde se encuentre el dispositivo. Esta tecnología no es recomendable para transmitir imágenes o videos ya que la transmisión es muy pesada y no cumpliría con los requisitos óptimos de uso. Las ventajas de LoRa es que su envío de datos es constante, también el tiempo de vida de la batería es muy extenso por su bajo consumo de energía para la transmisión, envía los datos a un dispositivo. La unión de esto nos permite hacer un seguimiento constante de la transmisión. Por medio del GPS y el reloj interno puede saber de dónde llega la señal, recibe la señal de ruido y el indicador de fuerza con la que recibe la señal.

LoRa en cuanto a frecuencia de comunicación no tiene un rango designado oficialmente pero puede usar las bandas ISM que sus siglas en español traducen Industrial, Científica y Médica, frecuencias que son catalogadas sin licencia es decir que no requiere un permiso especial de la entidad regulatoria del espectro electromagnético. LoRa puede trabajar en varias bandas incluso por debajo de 1GHz es decir puede trabajar en bandas libres de licencia en los diferentes continentes 868 MHz en Europa y 915 MHz en América del Norte.

## 7.2 ¿Qué es LoRaWAN?

LoRaWAN es el protocolo de software que usa la tecnología LORA en la capa Física. LoRaWAN cubre 3 capas del modelo OSI que son La capa de sesión, la capa de red y la capa de datos. Más específicamente LoRaWAN es un software que define el formato de los paquetes, los mensajes enviados entre los dispositivos y la red en el camino son procesados por esta última. Los principales componentes de la red son: el servidor de red, una aplicación y una base de datos en la nube, aparte de ello debe tener ciertos prerequisites para su funcionamiento, como lo debe ser la configuración de parámetros de radio los dispositivos activos y funcionando, la integración de los mensajes, los tiempos de transmisión, la encriptación de los mensajes y la sesión activa de seguimiento. Como todos los protocolos LoRaWAN transmite a una frecuencia específica como lo hace el WiFi o bluetooth en este caso por debajo de 1 GHz, la frecuencia es directamente proporcional al ancho de banda, en el caso de LoRa entre más baja sea la frecuencia menor ancho de banda debe usar y así mismo el rango de cobertura es mayor. Esta frecuencia no requiere licencia por parte de las entidades regulatorias para su uso, lo que facilita inmensamente la implementación y el bajo costo de esta.

La ventaja de la transmisión de datos en baja velocidad es, su alto grado de difusión. Mayor tiempo en el aire mayor cobertura óptima y bajo consumo de energía.

### 7.2.1 Arquitectura de LoRaWAN.

LoRaWAN opera en 3 modos con los diferentes tipos de dispositivos, en los que se encuentra clase a, clase b y clase c, las clases se definen en la manera en cómo se reciben los datos, para ello tienen e consideraciones, que es el poder de consumo, la latencia de los mensajes y la capacidad entre clases.

Los dispositivos de clase A son los más eficientes en cuanto a consumo de energía ya que su configuración permite enviar y recibir mensajes en intervalos de tiempo o eventos controlados, cabe resaltar que solo al momento de enviar un mensaje ascendente es posible recibir uno descendente lo que se conoce como comunicación bidireccional.

Los dispositivos de clase B tienen mayor capacidad de recepción que los anteriores ya que son programados para recibir en horarios específicos. Dice Semtech (2020):

Antes de cambiar de A a B, el dispositivo debe recibir una señal de red y alinear su sincronización interna con el servidor de red. En base a esto, el nodo final puede abrir ventanas de recepción o ranuras de ping, que pueden ser utilizadas por la red para iniciar la comunicación de enlace descendente”. (Módulo 2: LoRa y LoRaWAN)

No obstante se debe enviar el mensaje con el que permite cancelar o habilitar el reloj interno y así cambiar a Clase B de nuevo los de clase C son los que probablemente consumen más

energía ya que constantemente están recibiendo, no tienen alguna secuencia de mensajes para que el nodo del servidor distinga la clase.

Para los Gateway se usan Acces point o hotspots que demodula la señal recibida y la envían por el canal definido, ya sea Ethernet, WiFi o alguna conexión de red celular cuyo fin es llegar al servidor configurado en el Gateway, el servidor en la nube puede ser público o privado. Una de las ventajas de los Gateway es que pueden recibir dependiendo de la cantidad de canales que tenga.

Los Gateway son los principales responsables de recibir los paquetes enviados por los dispositivos, además de eso lo que se recibe se debe enviar al servidor de red y debe enviar un mensaje de recibido a cada uno de los dispositivos, de la misma manera es el encargado de recibir y eliminar los mensajes duplicados y de suministrar la seguridad de los datos, esto en cuanto al cifrado y descifrado, nos permiten identificar el origen del mensaje recibido.

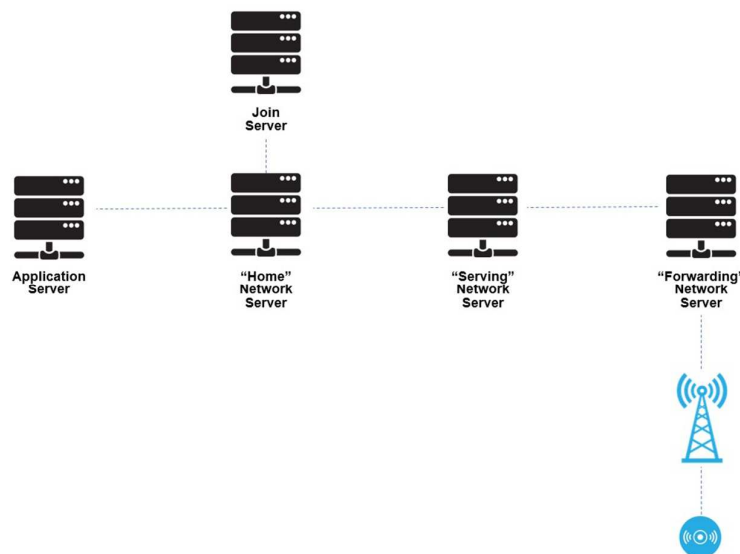
En cuanto a los join server nos permiten la activación del dispositivo, las sesiones de seguridad de cada paquete de datos que recibe.

### 7.2.2 LoRaWAN.

En el año 2019 los operadores de telecomunicaciones proporcionan acceso a redes públicas, de igual manera hay redes privadas que son mantenidas por empresas.

La ventaja de una red privada sobre una pública es que le permite al usuario gestionar su seguridad garantizando las claves y diferentes accesos.

**7.2.2.1 Arquitectura itinerante.** Cuando un dispositivo está en itinerancia se deben tener en cuenta 3 funciones home, serving and forwarding.

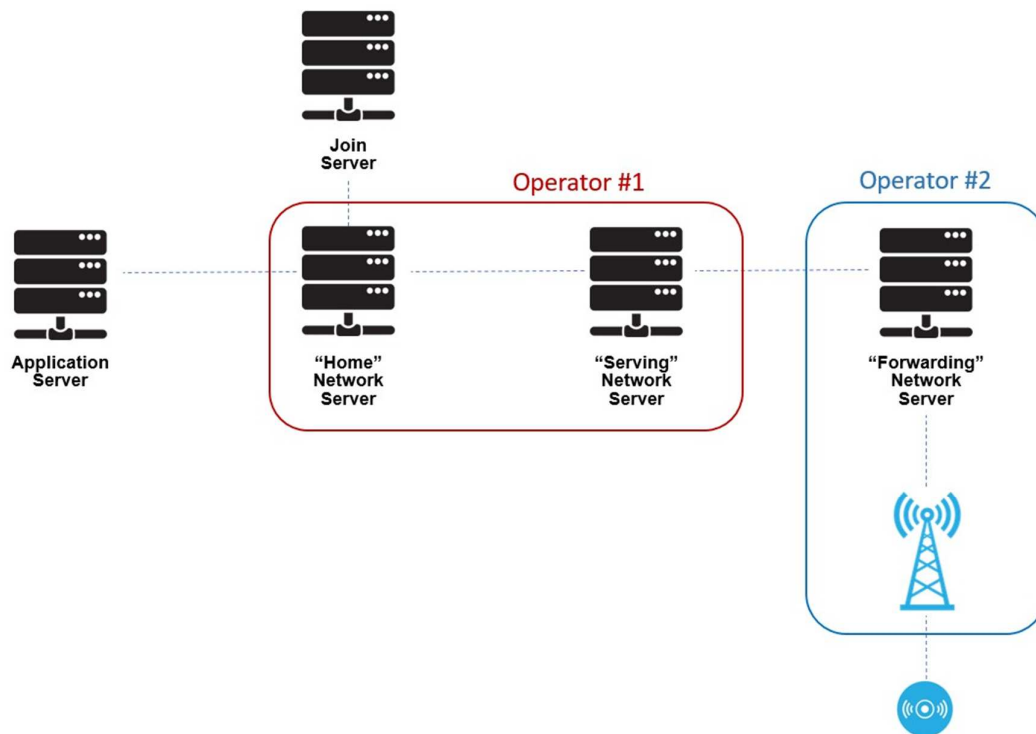


**Figura 5.** LoRa y LoRaWAN. (LoRa Alliance, 2020)

El servidor de red Home o de red doméstica debe estar alineado con la parte del servidor de unión que permite el acceso a las claves del dispositivo, de la misma manera al de aplicaciones que permite cifrar y descifrar los datos de las aplicaciones. En cuanto al serving o red de servicio el cual valida la integridad y los parámetros de radiofrecuencia de los dispositivos finales. El Forward que es el que gestiona las puertas de enlace.

**7.2.2.2 Roaming Pasivo.** El roaming pasivo consiste en enviar un mensaje por la puerta de enlace de un operador y lo recibe un dispositivo de operador diferente, si los operadores tiene un acuerdo el mensaje que recibió un operador diferente lo envía al dispositivo final del operador correspondiente. Dice LoRa Alliance (2020)

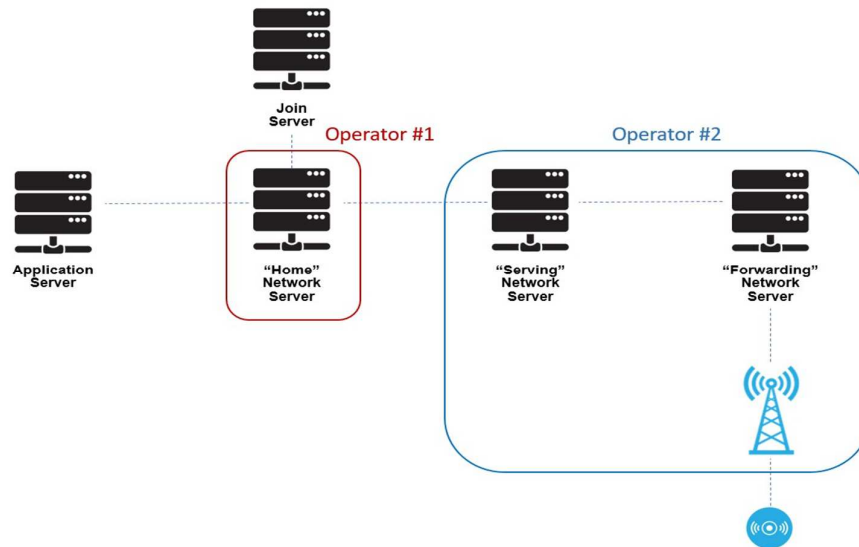
Cuando un servidor de red está configurado para habilitar el roaming pasivo, observa los primeros siete bits de la dirección del dispositivo (DevAddr) que se utiliza como identificador de red (NwkID). El NwkID indica el operador hNS del dispositivo. Si hay un acuerdo de roaming con el operador, el mensaje se pasa. Si no se encuentra ninguna coincidencia, el mensaje se descarta. (Módulo 2).



**Figura 6.** Roaming Pasivo. (LoRa Alliance, 2020)



**7.2.2.3 Roaming de traspaso.** En este caso de roaming permite transferir el control de la capa MAC al dispositivo final el cual no tiene que ser del mismo operador es decir que puede controlar los parámetros de RF.



**Figura 7.** Roaming de traspaso. (LoRa Alliance, 2020)

### 7.2.3 Descripción general de la especificación.

La especificación de una red LoRaWAN tiene en cuenta los aspectos en cuanto al cifrado estandarizado MIC (Código Internacional de Mensaje), procedimientos de unión y construcción de mensajes y los comandos MAC. También mencionan las clases de dispositivos, las ventanas de recepción y la compatibilidad de dispositivos, se han hecho varios ajustes en cuanto a las especificaciones la última hasta el momento se implementó en 2019 que es LoRaWAN 1.1.

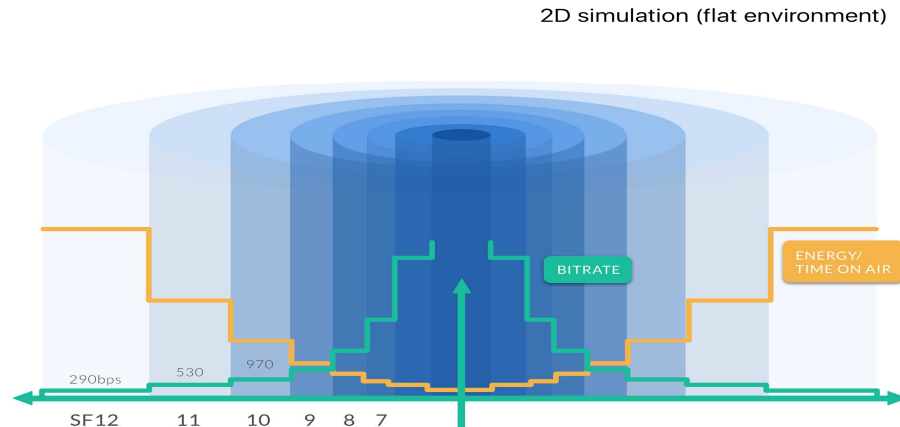
### 7.2.4 Factores de difusión y tiempo aire.

LoRaWAN está diseñado para que de la misma manera en que sus puertas de enlaces se pueden parametrizar en cuanto a cantidad de conexiones, también lo es la velocidad de transmisión, esto hace uso de un principio, ya que la finalidad de LoRa no es la velocidad y la transmisión de datos instantánea, se puede jugar con el factor de la velocidad, entre más liviano sea el mensaje y más lento se haga la transmisión, el rango de la cobertura es más grande. Esto permite que la batería tenga una larga duración, adicional a eso está la opción de parametrizar el Gateway ya que es posible hacer que solo reciba mensajes en el tiempo determinado por el usuario.

### 7.2.5 Velocidad de datos adaptativa.

Una de las características principales de LoRaWAN es que tiene ADR que traduce velocidad de datos adaptativa, que consiste en agregar una puerta de enlace adicional lo que hará que varios nodos cambien su factor de propagación haciendo que el mensaje dure menos tiempo en el aire y esto hace que la capacidad de red sea mucho mayor. El ADR se basa principalmente en la intensidad de señal y la margen del enlace. Dice LoRa Alliance (2020)

En la práctica, esto significa que los dispositivos que se encuentran cerca de la puerta de enlace usan una alta velocidad de datos, lo que resulta en menos tiempo en el aire. Para nodos más distantes, la velocidad de datos es menor. Debido a que la actividad energética más alta en la que participará un nodo es el acto de transmisión de datos, esto reduce radicalmente el consumo de energía de muchos dispositivos. (Modulo2)



**Figura 8.** Velocidad de datos adaptativa. (LoRa Alliance, 2020)

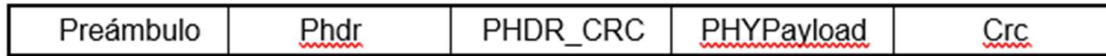
## 7.3 Especificación LoRaWAN 1.1

### 7.3.1 Introducción.

En este documento principalmente describe el protocolo LoRaWAN, creado principalmente para el consumo óptimo de batería que puede ser utilizado en dispositivos móviles o fijos, se basa en una topología estrella, esto permite que los Gateway transmitan los mensajes entre los dispositivos finales y los servidores de red. Las puertas de enlace se comunican por conexiones IP estándar al servidor de red, la transmisión entre dispositivos finales y las puertas de enlaces se pueden distribuir entre diferentes frecuencias y velocidades de transmisión de datos.

### 7.3.2 Mensajes ascendentes.

PHY de enlace ascendente:

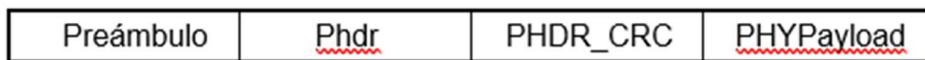


**Figura 9.** Mensaje ascendente. (LoRa Alliance, 2017)

### 7.3.3 Mensajes descendentes.

Los mensajes descendentes son enviados por el servidor a un dispositivo final y solo usa una Puerta de enlace.

PHY de enlace descendente:



**Figura 10.** Mensajes Descendentes. (LoRa Alliance, 2017)

Después de cada mensaje ascendente el Sistema debe abrir dos ventanas, en la primera Ventana de recepción se usa la frecuencia y la velocidad de datos con la que se utilice el mensaje ascendente. La segunda ventana de recepción usa la frecuencia y la velocidad que fue configurada en los dispositivos fijos estas ventanas deben tener una duración aproximada al tiempo en que se tarda en detectar el preámbulo del mensaje encapsulado. LoRa Alliance (2017)

Si se detecta un preámbulo durante una de las ventanas de recepción, el receptor de radio permanece activo hasta que se demodula el marco de enlace descendente. Si se detectó un marco y posteriormente, demodula durante la primera ventana de recepción y el marco estaba destinado a este dispositivo final después de comprobar la dirección y el MIC (código de integridad del mensaje), el dispositivo final no DEBE abrir la segunda ventana de recepción.(p. 19).

Si se va a transmitir un mensaje descendente a un dispositivo final es necesario que se transmita al principio de una de las ventanas de recepción, en caso de que en ambas ventanas se transmita el mensaje, debe ser exactamente igual en las dos. Un dispositivo final no transmite el mensaje ascendente hasta haber recibido la confirmación del enlace descendente o en caso de que la segunda ventana expire.

### 7.3.4 Mensajes de datos.

Los mensajes de datos se utilizan para la transmisión de datos MAC y de Aplicación combinados en uno solo, en ellos pueden ser reconocidos y no reconocidos por el dispositivo receptor.

### 7.3.5 MAC Payload.

Para los mensajes MAC dice LoRa Alliance (2017)

La carga útil MAC de los mensajes de datos, contiene un encabezado (FHDR) seguido de un puerto opcional (FPort) y un campo de carga útil de trama (FRMPayload). Un fotograma con un FHDR, sin Fopts (FoptsLen = 0), sin Fport y sin FRMPayload es válido. (p.26.).

### 7.3.6 Encabezado FHDR.

El encabezado de una trama se divide de la siguiente manera DevAddr que es una dirección corta del dispositivo final, FCtrl que es un octeto de control, FCnt que es el contador y los FOpts que es la parte de hasta 15 octetos para las opciones, puede en ocasiones utilizar un cifrado NwkSEncKey.

<b>Tamaño (bytes)</b>	4	1	2	0..15
<b>FHDR</b>	DevAddr	FCtrl	FCnt	FOpts

**Figura 11.** Formato de encabezado. (LoRa Alliance, 2017)

Para marcos de enlace descendente el contenido FCtrl del encabezado de fotograma Es:

<b>#</b>	7	6	5	4	[3..0]
<b>FCtrl bits</b>	Adr	Rfu	Ack	FPending	FOptsLen

**Figura 12.** Campos FCtrl de enlace descendente. (LoRa Alliance, 2017)

Para marcos de vínculo superior el contenido FCtrl del encabezado de fotograma Es:

<b>#</b>	7	6	5	4	[3..0]
<b>FCtrl bits</b>	Adr	ADRACKReq	Ack	Classb	FOptsLen

**Figura 13.** Campos FCtrl de enlace Ascendente. (LoRa Alliance, 2017)

### 7.3.7 Control de velocidad de datos adaptable en encabezado de trama.

LoRa permite que cualquier dispositivo final use cualquier velocidad y potencia de transmisión de datos, esta característica la usa de igual manera LoRaWAN para adaptarla a los dispositivos finales fijos, optimizando de tal manera la velocidad de la red.

Aunque es una gran ventaja de esta red, porque permite en su mayoría tener la velocidad más rápida posible; pero tiene una restricción cuando la atenuación del canal radioeléctrico está en constante y rápido cambio. Esto afecta ya que el servidor no puede controlar la velocidad de transmisión de los datos, ya que la capa de aplicación debe siempre minimizar el tiempo del mensaje en el aire dependiendo de las condiciones.

Para todo esto es necesario habilitar el BIT ADR para que controle la velocidad y la potencia de transmisión por medio de comandos MAC. En caso de que no se habilita el BIT la red no intenta controlar la velocidad de transmisión independiente de la calidad de la señal. Según LoRa Alliance (2017)

El bit ADR puede ser configurado por el dispositivo final o la red bajo demanda. Sin embargo, siempre que sea posible, el sistema ADR DEBE estar habilitado para aumentar la duración del dispositivo final y maximizar la capacidad de red. (p.29.)

### **7.3.8 Bit de reconocimiento del mensaje.**

Dentro del mensaje se habilita un bit de confirmación al momento de la recepción, el bit de confirmación es ACK que se envía durante las ventanas de recepción luego del envío.

### **7.3.9 Procedimiento de retransmisión.**

**7.3.9.1 Marcos de enlace descendente.** Los mensajes de enlace descendente manejan estados, confirmado y no confirmado, en el caso de que el servidor no reciba la confirmación puede decidir transmitir el mensaje.

**7.3.9.2 Marcos de enlace ascendente.** En el caso de los enlaces ascendentes, decide retransmitir las veces que sean necesarias hasta recibir el estado de confirmación, o un enlace descendente válido, esto por medio de un parámetro llamado “NbTrans” que es usado por el administrador de red para la calidad de la red y la redundancia de mensajes. Para los dispositivos finales B y C evita la retransmisión de mensajes no confirmados durante la ventana de recepción 1 y para los dispositivos clase A lo hacen durante las 2 ventanas de transmisión.

En caso de que se reciba un número mayor de retransmisiones con respecto al parámetro “NbTrans” puede indicar un ataque de reproducción haciendo que no procese tramas adicionales.

**7.3.9.3 Bit Pendiente.** En la trama se reserva un BIT para los mensajes que quedan pendientes este se llama FPending en FCtr, la particularidad es que solo se usa en el enlace descendente debido a que le indica al dispositivo final que aún tiene mensajes pendientes para que abra otra ventana de recepción lo más pronto posible. Eso se hace mediante un mensaje ascendente.

### 7.3.10 Contador.

Todos los dispositivos tienen un contador que les permite saber el número de tramas enviadas en enlaces descendentes con el parámetro FCntUp y para tramas de enlaces ascendentes FCntDown. Para los dispositivos OTAA en el momento de que reciba la confirmación del mensaje el contador FCntUp y el FCntDown se reajustan a 0; mientras que para dispositivos ABP nunca se deben reiniciar.

### 7.3.11 Cifrado de carga útil.

Según LoRa Alliance (2017):

Si una trama de datos lleva una carga útil, FRMPayload DEBE cifrarse antes de que se calcule el código de integridad del mensaje (MIC). El esquema de cifrado utilizado se basa en el algoritmo genérico que se describe en IEEE742 802.15.4/2006 Anexo B [IEEE802154] utilizando AES con una longitud de clave de 128 bits. (p.37, 38.)

La clave K utilizada depende del FPort del mensaje de datos:

FPort	Dirección	K
0	Enlace ascendente/enl ace descendente	NwkSEncKey
1..255	Enlace ascendente/enl ace descendente	AppSKey

**Figura 14.** FPort list. (LoRa Alliance, 2017)

### 7.3.12 Comando RejoinParamSetupReq.

Este parámetro es específico para los dispositivos que no tienen la capacidad de medición del tiempo. Permitiendo establecer el tiempo máximo y la periodicidad entre dos transmisiones.

### 7.3.13 Activación del dispositivo final.

Para que los dispositivos finales puedan funcionar en una red LoRaWAN es necesaria una configuración, que puede activarse de 2 maneras, OTAA o por medio de la activación personalizada ABP.

**7.3.13.1 Procedimiento de Unión.** Este procedimiento consiste en una combinación o de reincorporación y un intercambio de unión y aceptación. Se realiza por medio de un mensaje que es enviado desde el dispositivo final, con la siguiente estructura:

<b>Tamaño (bytes)</b>	8	8	2
<b>Solicitud de unión</b>	JoinEUI	DevEUI	DevNonce

**Figura 15.** Campos de mensaje de solicitud de unión. (LoRa Alliance, 2017)

Explicado de una manera más sencilla tiene un Join-Request que comprende JoinEUI un Dev EUI seguidos de un Nonce, este último es un contador el cual inicia desde 0 con el que se evita que se reúse en un Join lo cual evitará confusiones para el servidor al momento de descartar solicitudes, cabe aclarar que en el momento que se reinicie el Nonce, se debe de igual manera reiniciar el Join y así evitar el conflicto. El servidor lo que hace es verificar el valor del Nonce, si dicho valor no incrementa, se ignoran todas las solicitudes de unión que reciba. Para la solicitud se debe tener en cuenta lo siguiente según LoRa Alliance (2017)

El mensaje join-request no está cifrado. El mensaje de solicitud de combinación se puede transmitir utilizando cualquier velocidad de datos y siguiendo una secuencia de salto de frecuencia aleatoria a través de los canales de combinación especificados. Se recomienda utilizar una pluralidad de velocidades de datos. Los intervalos de transmisión de las solicitudes de unión respetarán la condición. Para cada transmisión de una solicitud de unión, el dispositivo final incrementará el valor de DevNonce. (p.56.)

**7.3.13.2 Mensaje de aceptación de unión.** Luego de recibir la solicitud, el servidor envía una respuesta como un enlace descendente, la velocidad y la frecuencia que se usa para el envío de la respuesta es el mismo que el de las ventanas de recepción, la composición del mensaje de aceptación es el siguiente:

<b>Tamaño (bytes)</b>	3	3	4	1	1	(16) Opcional
<b>Unirse-aceptar</b>	JoinNonce	Home_NetID	DevAddr	DLSettings	RxDelay	CFList

**Figura 16.** Campos de mensaje de aceptación de unión. (LoRa Alliance, 2017)

El dispositivo final recibe el mensaje de aceptación sólo si el campo MIC es correcto junto con el JoinNonce ya que este debe ser mayor al último grabado.

**7.3.13.3 Mensaje de reincorporación-solicitud.** Existen 3 tipos en las cuales se puede usar un mensaje de reincorporación El primer byte del mensaje Rejoin-request se denomina Rejoin Type y se utiliza para codificar el tipo de Rejoin-request. En la tabla siguiente se describe el propósito de cada tipo de mensaje Rejoin-Request.

Tabla 5

*Resumen de los mensajes RejoinReq*

Tipo RejoinReq	Contenido y propósito
0	<p>Contiene NetID+DevEUI. Se utiliza para restablecer un contexto de dispositivo, incluidos todos los parámetros de radio (devAddr, claves de sesión, contadores de tramas, parámetros de radio,..). Este mensaje solo se puede enrutar al servidor de red doméstico del dispositivo</p> <p>Servidor de red receptor, no al servidor JoinServer del dispositivo El MIC de este mensaje solo puede ser verificado por el servidor de red de servicio o doméstico.</p>
1	<p>Contiene JoinEUI+DevEUI. Exactamente equivalente al mensaje inicial Join-Request, pero puede transmitirse encima del tráfico normal de aplicación sin desconectar el dispositivo. El servidor de red receptor solo puede enrutarlo al Servidor de red de recepción. Utilice d para restaurar un contexto de sesión perdido (Ejemplo, El servidor de red ha perdido las claves de sesión y no puede asociar el dispositivo a un</p> <p>JoinServer). Solamente el JoinServer puede marcar el MIC de este mensaje.</p>
2	<p>Contiene NetID+DevEUI. Se utiliza para volver a introducir un dispositivo o cambiar su DevAddr (DevAddr, claves de sesión, contadores de tramas). Los parámetros de radio se mantienen sin cambios. Este mensaje solo se puede enrutar a la red doméstica del dispositivo</p> <p>Servidor por redes visitadas, no al servidor de unión del dispositivo. El MIC de este mensaje sólo puede ser verificado por el servicio o el servidor de red doméstico.</p>

*Nota:* Autoría propia.



Para los mensajes tipo 0 y tipo 2 tiene un NetID que permite identificar la red doméstica en la que se encuentra el dispositivo final, y un DevEUI, luego tiene un contador que incrementa su valor con cada trama de la reincorporación, este valor incrementa en el momento en el que se procesa exitosamente un Join-Accept. Cada dispositivo debe hacer un seguimiento e ignorar las solicitudes de incorporación en el momento en el que el valor del contador sea menor al último valor almacenado, El ciclo de trabajo de las transmisiones Rejoin-Req tipo 0 o 2 del dispositivo siempre será  $<0,1\%$ .

<b>Tamaño (bytes)</b>	1	3	8	2
<b>Rejoin-request</b>	Volver a unirse al tipo 0 o 2	NetID	DevEUI	RJcount0

**Figura 17.** RejoinReq tipo 0 y 2. (LoRa Alliance, 2017)

Para la reincorporación tipo 1 al tener el JoinEUI y el DevEUI cualquier servidor de red que reciba la solicitud, puede enviarlo y enrutarlo al correcto. Una de las ventajas de esta solicitud tipo 1 es que permite restaurar la conectividad del dispositivo en el caso en que el servidor tenga una pérdida completa, por lo que los expertos recomiendan enviar una solicitud de reincorporación mínimo 1 vez al mes. Este al igual que el tipo 0 y 2 tiene un contador, dicho contador solo incrementa con trama tipo 1 La periodicidad de transmisión de Rejoin-Request tipo 1 será tal que este ajuste no pueda ocurrir durante la vida útil del dispositivo para un valor JoinEUI determinado.

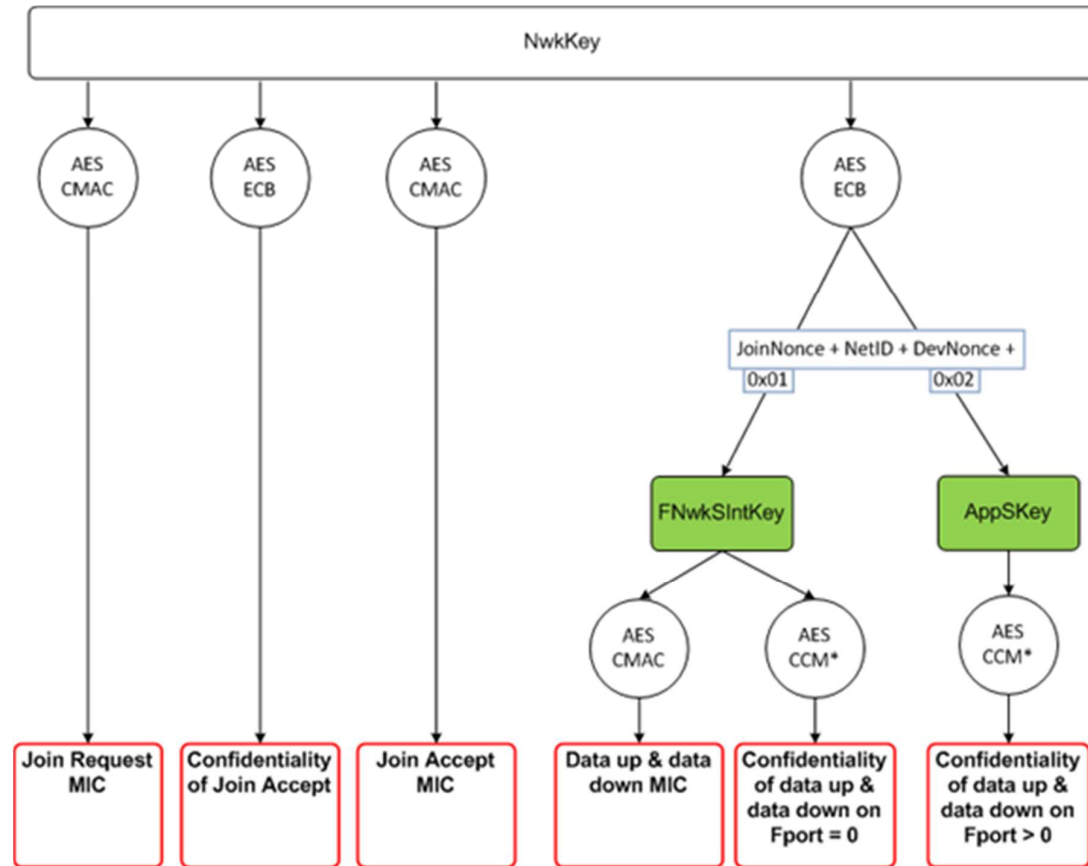
<b>Tamaño (bytes)</b>	1	8	8	2
<b>Rejoin-request</b>	Tipo de reincorporación n.o 1	JoinEUI	DevEUI	RJcount1

**Figura 17.** RejoinReq tipo 1. (LoRa Alliance, 2017)

#### 7.3.14 Diagrama de derivación clave.

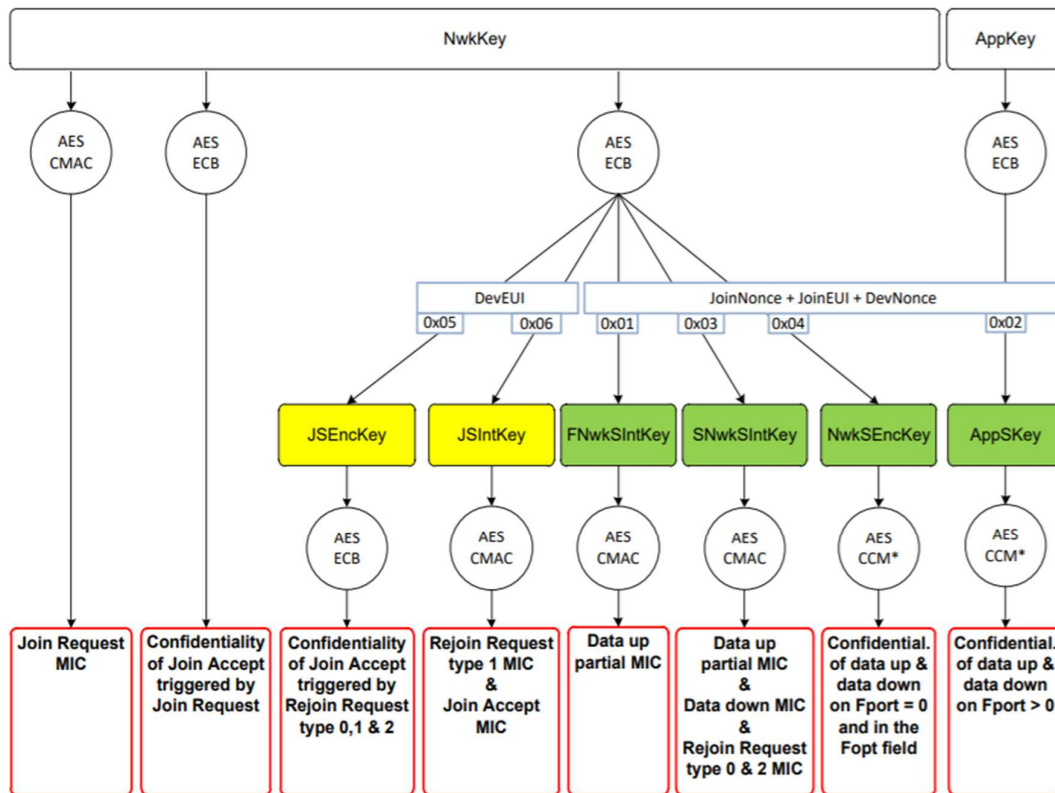
Los siguientes esquemas aplican para la conexión de servidores LoRaWAN 1.0 o 1.1.

**7.3.14.1 Backend LoRaWAN 1.0.** Cuando un dispositivo LoRaWAN 1.1 se aprovisiona con un back-end de red LoRaWAN 1.0.X las claves se derivan de la clave raíz NwkKey. No se utiliza AppKey del dispositivo.



**Figura 18.** Esquema de derivación de claves LoRaWAN1.0. (LoRa Alliance, 2017)

### 7.3.14.2 LoRaWAN 1.1 network backend.



**Figura 19.** Esquema de derivación de claves LoRaWAN1.1. (LoRa Alliance, 2017)

### 7.3.15 Activación personalizada.

Esta activación se realiza con el fin de vincular una red específica que pasa por alto un procedimiento de Request-accept con un dispositivo final. Según LoRa Alliance (2017)

La activación de un dispositivo final por personalización significa que **DevAddr** y las cuatro claves de sesión **FNwKSIntKey**, **SNwKSIntKey**, **NwkSEncKey** y **AppSKey** se almacenan directamente en el dispositivo final en lugar de derivarse de **DevEUI**, **JoinEUI**, **AppKey** y **NwkKey** durante el procedimiento de combinación. El dispositivo final está equipado con la información necesaria para participar en una red LoRa específica tan pronto como se inicia. (p.64.)

La activación permite que no se derive ninguno de los datos que pueda poner en riesgo la seguridad y la comunicación entre dos dispositivos. Cuando se conecte por 1 vez o su conexión venga luego de un reinicio el dispositivo final envía un comando **ResetInd MAC** en el campo **FOpt** con el fin de no perder la configuración realizada.

### 7.3.16 Retransmisiones back-off.

El servidor debe enviar un mensaje de respuesta en caso de recibió la retransmisión, de lo contrario realiza nuevamente la retransmisión. Esta retransmisión se realiza al final de la ranura de la ventana de recepción 2 y seguirá una secuencia diferente para cada dispositivo.

Tabla 6

*Limitaciones del ciclo de trabajo de solicitud de unión.*

Agregado durante la primera hora después del encendido o restablecimiento	$T_0 < t < T_0 + 1h$	Tiempo de transmisión < 36Sec
Agregado durante las próximas 10 horas	$T_0 + 1 < t < T_0 + 11h$	Tiempo de transmisión < 36Sec
Después de las primeras 11 horas, agregado sin más de 24h	$T_0 + 11 + N < t < T_0 + 35 + N \quad N > -0$	Tiempo de transmisión < 8.7Sec por 24h

*Nota:* Autoría propia.

## 7.4 LoRaWAN Clase B

Los dispositivos finales de clase B pueden ser móviles o fijos, esta operación se habilita cuando hay una solicitud para abrir la ventana de recepción en intervalos de tiempo fijos para así activar el envío de los mensajes descendentes, puesto que esta operación tiene una ventana de recepción adicional que se sincroniza específicamente entre el servidor y el dispositivo final. La finalidad de la clase B es siempre tener un dispositivo final disponible para la recepción a una hora específica, a parte de las ventanas de recepción fijadas con anterioridad.

Mediante una solicitud al servidor de manera regular, la clase B sincroniza todos los dispositivos que contiene la red, con el fin de abrir una ranura adicional que se conoce como PING.

### 7.4.1 Enlace descendente Clase B.

Para que la red permite la operación de clase B entre los dispositivos finales y el servidor de red, es necesario que el servidor envíe una solicitud a los dispositivos finales con la referencia para la sincronización entre ellos. Cuando el dispositivo final recibe el PING inicia la

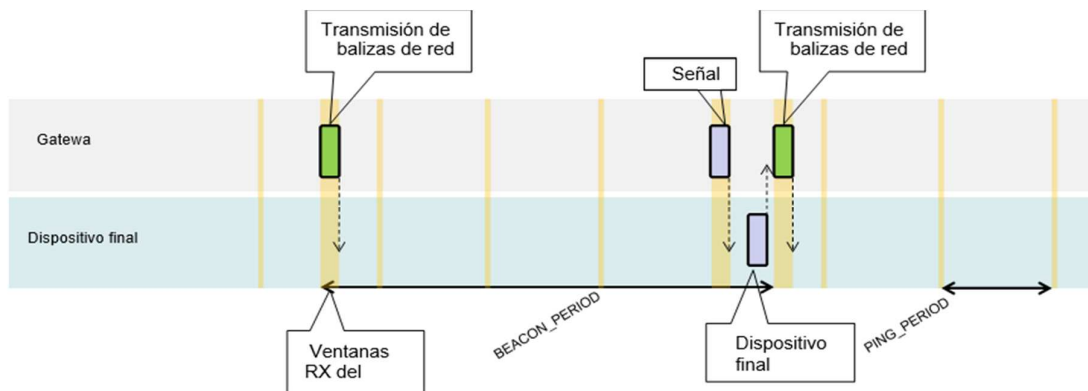
comunicación con un mensaje de enlace descendente, los indicadores de calidad de la señal del último enlace ascendente son los que toma el servidor. Por esta razón, si un dispositivo final se mueve y detecta un cambio en la solicitud que recibió, permitiendo que se reconozca y se identifique que el dispositivo final fue movido del lugar de origen.

Una de los requerimientos para que el dispositivo final pueda funcionar en Clase B es que esté fuera de la banda y disponible. Inicialmente todos los dispositivos finales deben estar vinculados como dispositivos de clase A, luego para que puedan cambiar a clase B se hace el siguiente proceso según la especificación de LoRa Alliance (2017):

- El dispositivo final envía una solicitud a la capa LoRaWAN para cambiar al modo de clase B.
- La capa LoRaWAN del dispositivo final busca una señal y devuelve BEACON\_LOCKED.
- Una vez en el modo de clase B, la capa MAC establece en 1 el bit de la clase B del campo FCTRL en cada trama de enlace ascendente. Este bit indica al servidor que el dispositivo ha cambiado a clase B, La capa MAC programará de forma automática una ranura de recepción cada solicitud y cada PING. Cuando la recepción de la señal tiene éxito, el dispositivo final LoRaWAN reenvía el contenido de la solicitud a la capa de aplicación junto con la intensidad de la señal de radio. La capa LoRaWAN del dispositivo final cuenta con un contador en la programación de la recepción de la señal ranuras y PING.
- Cuando el enlace descendente se demodula durante una ranura de PING, se procesa de forma similar a un enlace descendente Clase A.
- Un dispositivo final móvil debe informar periódicamente al servidor de red de su ubicación para actualizar la ruta de enlace. Esto se hace transmitiendo enlace ascendente "no confirmado" o "confirmado" (posiblemente vacío) para que el dispositivo final establezca adecuadamente el bit de clase B en el campo FCtrl del marco. Esto hace más eficientemente si la aplicación detecta que el nodo se está moviendo, mediante el análisis del contenido de la señal. En ese caso, el dispositivo final debe aplicar un retraso aleatorio entre la recepción y la transmisión de enlace ascendente para evitar colisiones sistemáticas.
- En cualquier momento, el servidor de red puede cambiar el enlace descendente de la ranura de PING, frecuencia o velocidad de datos mediante el envío de un comando PingSlotChannelReq MAC.
- El dispositivo puede cambiar la periodicidad de sus ranuras de PING en cualquier momento. Para ello, debe detener temporalmente la operación de clase B (bit clase B sin

establecer en sus tramas de enlace ascendente) y enviar un PingSlotInfoReq al servidor de red. Una vez que el comando se reconoce, el dispositivo puede reiniciar la operación de clase B con la nueva periodicidad de la ranura de ping.

- Si no se ha recibido ninguna señal durante un período determinado se pierde la sincronización con la red. La capa MAC debe informar a la capa de aplicación que ha cambiado de nuevo a la clase A. Como consecuencia, el dispositivo final deja de establecer el bit de clase B en todos los enlaces ascendentes y esto informa al servidor de red, indicando que el dispositivo final ya no está en modo de clase B. El dispositivo final puede intentar volver a la clase B periódicamente. Esto reiniciará el proceso comenzando con una búsqueda de señales.
- El diagrama siguiente ilustra el concepto de ranuras de recepción de baliza y ranuras de ping. (p.70.)



**Figura 20.** Ranura de recepción de baliza y de PING. LoRaWAN1.1. (LoRa Alliance, 2017).

## 8. Estado del arte de QoS en LoRa

Para obtener un estado del arte en cuanto a la Calidad del servicio en LoRa, se toman 5 documentos como referencia, iniciando con las Mediciones, rendimiento y análisis de LoRa, una implementación del mundo real de LPWAN en donde los autores T. Petrić, M. Goessens, L. Nuaymi, L. Toutain y A. Pelov (2016). Hacen énfasis en IoT, ya que el internet de las cosas en cuanto a conexión de redes se enfoca en 2 puntos, el primero es en utilizar una red de malla con diferentes saltos de frecuencia, en donde se usan varias redes de corto alcance y el uso del espectro sin licencia; el otro punto con las redes de largo alcance. Allí es donde entra LPWAN una red de largo alcance y baja potencia, con el plus de usar una frecuencia la cual no necesita licencia. LoRa es una nueva tecnología que se basa en transmitir datos a una potencia muy baja y con una cobertura muy extensa, en este estudio se verifica el rendimiento de una red LoRaWAN ubicada en la ciudad de Rennes, Francia. Los autores realizan una prueba experimental en donde generan tráfico similar al que podría llegar a tener uno de los nodos; de este análisis se pueden obtener datos adicionales como lo son la tasa de error de paquete (PER), el Indicador de intensidad de señal recibida (RSSI) y la relación Señal / Ruido (SNR). Ofreciendo una recopilamos datos de medición de forma gratuita junto con las herramientas que se usaron para el estudio.

Por otra parte A. Dvornikov, P. Abramov, S. Efremov y L. Voskov, (2017). Publicaron un estudio en la 19a Conferencia IEEE, sobre Informática Empresarial (CBI) en Salónica, Grecia sobre las redes LPWAN. Estas redes cumplen con el objetivo de tener una gran cobertura en cuanto a distancia, eso sí sacrificando un poco la potencia y velocidad de su transmisión, por lo que esta solución aplicada a IoT es muy útil a la hora de transmitir texto, imágenes de baja calidad o paquetes de datos que tengan poco peso. Para poder ser clasificado como una red LPWAN debe cumplir con ciertas especificaciones en cuanto a la calidad del servicio. En este documento LoRaWAN es sometido a un estudio experimental donde el resultado de las métricas indica si es aplicable o no como una red LPWAN.

El artículo presentado por N. Varsier y J. Schwoerer, (2017) en Paris, Francia llamado Límites de capacidad de la tecnología LoRaWAN para aplicaciones de medición inteligente, los autores realizan un análisis en cuanto a la capacidad límite del protocolo LoRaWAN en cuanto a mediciones inteligentes utilizando simuladores que permiten recrear el ambiente muy cercano al real en ambientes interiores, utilizando momentos críticos en cuanto a tráfico en la ciudad de Paris. Teniendo como resultado un área de cobertura de 17km cuadrados utilizando 19 gateways a 1 km de distancia entre ellos, teniendo un 98% de QoS. Esto solo considerando

la transmisión de mensajes pero llegando al límite en cuanto comiencen la entrada de mensajes descendentes.

La Segunda Conferencia de Indonesia Oriental sobre Informática y Tecnología de la Información (EIconCIT) que tuvo lugar en Makassar, Indonesia llevo un documento donde muestran que Hoy existe una gran demanda en cuanto a Iot, ya que cada vez hay más popularidad en los elementos inteligentes y la conectividad entre ellos, siendo LoRa una solución eficiente y económica dado que se puede catalogar como una red LPWAN ya que cumple con tener una gran área de cobertura y bajo consumo de energía. De igual manera para que el rendimiento de una red LoRa sea optimo, se toman en cuenta los factores externos como por ejemplo el lugar donde se encuentre desplegada la red; por ello se debe calcular su desempeño. Actualmente las personas encargadas de esta tecnología realizan la medición de su rendimiento de manera manual, en este documento los autores realizan un aporte proporcionando el diseño de una herramienta que contribuirá de gran manera con dicha medición, también muestran resultados de experimentos en los cuales usan la herramienta de medición propuesta. El nombre que lleva el artículo es LouPe: LoRa Performance Measurement Tool cuyos autores son MRE Arlin, M. Niswar, A. Adnan, D. Fall y S. Kashihara, (2018).

Otro tipo de documento es Método de asignación del factor de dispersión para mejorar la escalabilidad de la red de área amplia LoRaWAN, ya que las redes LPWAN se han convertido en la solución para los sistemas IoT. Para darle la solución en cuanto a la escalabilidad realizan el implemento del protocolo LoRaWAN adicionándole a la configuración convencional, el ajuste del parámetro del factor de dispersión a los dispositivos, aparte de todo lo que disminuye el consumo de energía de todos los dispositivos. Este fue presentado en el año 2018 por A. Tiurlikova, N. Stepanov y K. Mikhaylov, (2018).

Se publica un artículo en 14a Conferencia Internacional de 2018 sobre Computación, Redes y Comunicaciones Inalámbricas y Móviles (WiMob) de los autores U. Coutaud y B. Tourencheau, (2018). Las principales características en cuanto a IoT se trata es la relación que hay entre la entrega de paquetes de información y la baja potencia, por eso en este documento realizan una serie de experimentos que les permite mezclar la codificación de canales para maximizar las características de calidad de servicio de LoRaWAN. El protocolo CCARR utiliza Reed-Solomon FEC y estructura tramas sucesivas en segmentos. Un reconocimiento de finalización controla dinámicamente la cantidad de sobrecarga de FEC. Estimamos la ganancia potencial de CCARR con un análisis probabilístico. La simulación y los experimentos en el banco de pruebas del protocolo corroboran las tendencias de análisis y muestran una gran



mejora en la tasa de entrega de paquetes con respecto a LoRaWAN y la literatura con un aumento controlado del tiempo en el aire debido a la sobrecarga de FEC optimizada.

En el siguiente año B. Robbe and W. Danny, (2019). Publicaron un documento llamado Un enfoque de gestión de movilidad adaptativa compatible con QoS para sistemas IoT basados en LoRa. Las ciudades inteligentes es un tema que se está acercando cada vez más con la llegada de IoT y si se habla de ello se habla de LoRa, en la mayoría de estudios se realizan en nodos fijos, pero en este caso se hará el estudio del comportamiento en cuanto a nodos móviles y la calidad de servicio que ofrece. Esto es un desafío ya que se sabe que cuando se habla de nodos móviles se puede relacionar a irregularidad en el servicio por los continuos cambios a los que está sometido. Por ello en el documento los autores desarrollan un algoritmo que se adapta automáticamente a la configuración con el nodo final, lo que permite en los resultados disminuir la pérdida y garantizar los requerimientos para brindar un excelente servicio y sobretodo funcional. Todo ello implementado en una red IoT.

En cuanto a las redes LoRa son redes que cumplen con las condiciones exigidas para clasificarse como una red LPWAN, teniendo una amplia cobertura. Dentro de cada red hay muchos dispositivos que potencialmente utilizarán la modulación LoRa lo que le permitirá comunicarse directamente con la puerta de enlace que está a una gran distancia. LoRa tiene la capacidad de que cada puerta de enlace admita que los dispositivos que se encuentren bajo su cobertura cumplan con los requisitos QoS de transmisión. En la mayoría de ocasiones existen 2 factores que pueden afectar el rendimiento y la calidad de las redes, el ruido y la interferencia. Normalmente los dos factores siempre se trabajan de forma separada, creando un umbral en cada factor que permita el correcto y óptimo funcionamiento de la red, pero en este documento la capacidad de la red es evaluada junto con la interferencia y el ruido, debido a que el umbral de SNR para una cobertura exitosa representa una función decreciente del SIR experimentado por el dispositivo final de interés permitiendo que el comportamiento de esta red pueda ser utilizado para seguridad del hogar IoT. Lo anterior fue realizado por T. Elshabrawy y J. Robert, (2019) y presentado en IEEE Sensors Journal (Volumen: 19, Número: 11, 1 de junio, 1 2019)

El Análisis de rendimiento de LoRa QoS en varios factores de difusión en Indonesia Uno de los principales objetivos al implementar un sistema de comunicación es la calidad del servicio que se le presta al usuario, en este caso LoRa es una tecnología que se implementará en redes IoT; cuyo principal objetivo es la transferencia de información entre muchos dispositivos pero utilizando una potencia muy baja. Para obtener el máximo rendimiento de la red se debe tener en cuenta el factor de dispersión el cual se basa en la distancia que hay entre el dispositivo final y el Gateway, en este documento está el análisis del factor de dispersión utilizando varias

distancias dentro de las cuales se concluyen que hay una distancia en la que la red LoRa siempre estará al máximo de su capacidad y otra distancia en donde su rendimiento será el más equilibrado en cuanto a rendimiento y alcance; esto según el análisis de los autores E. D. Widiyanto, M. S. M. Pakpahan, A. A. Faizal y R. Septiana, (2019).

Luego en el mismo año P. Edward, E. Tarek, M. El-Aasser, M. Ashour y T. Elshabrawy, (2019) redactan un informe donde indican que LoRa adopta el método ALOHA que permite constantemente la transmisión de datos pero esto tiene una capacidad limitada, para contrarrestar esta capacidad se crea un nuevo método multidimensional que llama ICS-LoRa, en este nuevo documento proponen varios métodos derivados del ICS-LoRa que reducen el tiempo en el are de los paquetes. Los patrones de relación están diseñados de forma que reduce la relación cruzada de todas señales. El resultado es que se aumenta en un 57% la velocidad de transmisión y el factor de propagación aumenta en 14%. Todo porque el chirp se subdivide de 4 a 8 subintervalos lo que conlleva a aumentar de 2 a 4 bits.

También existe una serie de documentos entre los que se encuentra la Estimación automatizada de la calidad del enlace para LoRa: un enfoque de detección remota hecha por S. Demetri, M. Zúñiga, GP Picco, F. Kuipers, L. Bruzzone y T. Telkamp, (2019) que contiene un análisis donde no solo la parte de hogares está apostando por LoRa, sino que también la parte industrial está interesada ya que la cobertura de esta tecnología es muy amplia, pues la tecnología LoRa abarca decenas de kilómetros según el entorno en el que se encuentre desplegado, en este artículo proponen una manera automatizada de realizar la medición de cobertura y rendimiento, todo esto antes de desplegar la red, hacen una combinación entre la herramienta y las imágenes multiespectrales gratuitas. Clasifican el entorno en el que se encuentra o posiblemente se implementara la red. Esta estimación permite seleccionar o configurar los parámetros básicos de la red y poder obtener un resultado con una tasa de error de 10dBm aproximadamente a la de métodos convencionales que arrojan un resultado entre 20dBm y 40dBm en la potencia de señal esperada.

Un documento a resaltar es Optimización del rendimiento en redes LoRa mediante la asignación de parámetros de radio donde los autores E. Sallum, N. Pereira, M. Alves y M. Santos, (2020) proponen un método efectivo que permite mejorar la calidad del servicio, modificando los parámetros de radio. Este método fue encontrado utilizando Programación lineal de enteros mixtos, en donde se tiene en cuenta el tráfico de red, los parámetros del factor de dispersión y la frecuencia portadora. Con dicho ajuste se reduce notablemente la tasa de colisión de paquetes (13 veces menos), el consumo de energía y mejora la tasa de extracción

de datos en 6%. Todas las pruebas se realizan utilizando LoRaSim. Todo esto en comparación con redes dinámicas.

Por ultimo luego de realizar el análisis de los documentos se puede encontrar que LoRa con el protocolo LoRaWAN en términos de calidad del servicio con respecto a las redes LPWAN tiene un buen desempeño ya que cumple con los principales objetivos, como lo es tener una amplia cobertura y un bajo consumo de energía. Adicionalmente existen varias configuraciones adicionales que permiten la potencialización y optimización del servicio. Es decir la combinación de parámetros con diferentes algoritmos, con diferentes instrumentos y con distintas herramientas hace que el sistema en cuanto a transmisión de datos reduzca la tasa de error y de perdida, minimice la interferencia y el ruido, aumente dentro de su promedio la velocidad de transferencia y en cuanto al entorno donde se despliegue se reduzca el impacto que tienen los obstáculos del ambiente.

## Conclusiones

Hay gran cantidad de información sobre la tecnología LoRa en internet, pero la fuente más completa es Semtech que es la empresa que patentó esta tecnología, la documentación fue recopilada y analizada para disponibilizar la información técnica más relevante que permite entender el protocolo

La recopilación de información permitió tomar los aspectos más relevantes como son los temas de caracterización LoRaWAN, la transmisión, recepción y estructura de los datos, configuración de parámetros en cuanto a los 3 tipos de dispositivos finales Clase A, Clase B Clase C

Se encontró gran cantidad de información en artículos científicos sobre el desarrollo y la implementación de LoRa en diferentes ambientes desde el año 2016 donde se realiza una medición del rendimiento del protocolo LoRaWAN en Francia, hasta el año 2020 en un documento en el cual proponen un método que reduce la tasa de colisión de paquetes de LoRa

LoRa presenta pocas variaciones en su calidad de servicio, dependiendo de las condiciones en las que se encuentre, cumpliendo así con los estándares para ser catalogada como una red LPWAN.

El protocolo LoRaWAN puede ser utilizado y aplicado en IoT teniendo la certeza que tendrá un excelente desempeño en cuanto al enfoque distancia de cobertura y baja potencia.

### Referencias

- Albarran, C. (2018). LPWAN: tímido comienzo, futuro en el aire. Recuperado de: <https://www.redestelecom.es/infraestructuras/noticias/1105893001803/lpwan-timido-comienzo-futuro-aire.1.html>
- Aprendiendoarduino (2018). Redes. Recuperado de: <https://www.aprendiendoarduino.com/2018/03/05/redes-lpwan>
- Dvornikov, P. Abramov, S. Efremov and L. Voskov, (2017). QoS Metrics Measurement in Long Range IoT Networks, IEEE 19th Conference on Business Informatics (CBI), Thessaloniki. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8012393>
- E. D. Widiyanto, M. S. M. Pakpahan, A. A. Faizal and R. Septiana, (2018). LoRa QoS Performance Analysis on Various Spreading Factor in Indonesia. International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD). Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8605471>
- E. Sallum, N. Pereira, M. Alves and M. Santos, (2020). Performance optimization on LoRa networks through assigning radio parameters. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), doi: 10.1109/ICIT45562.2020.9067310.
- Ferrer, V. (2019). Que es LoRaWAN y LoRa. Recuperado de: <https://LoRawan.es/>
- Franpcinfo. (2018). Recuperado de: <https://www.franpcinfo.com/cursos/par/capa-de-red-del-modelo-osi/>
- Lavric and V. Popa, (2017). Internet of Things and LoRa™ Low-Power Wide-Area Networks: A survey. International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS). Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8166405>
- Lavric and V. Popa, (2017) "A LoRaWAN: Long range wide area networks study," International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN). Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8123360>
- LoRa Alliance Inc. (2017) LoRaWAN 1.1 Specification. Recuperado de: <https://LoRa-developers.semtech.com>
- LoRa Alliance Inc. (2020). Módulo 2: LoRa y LoRaWAN. Recuperado de: <https://LoRa-developers.semtech.com>
- M. R. E. Arlin, M. Niswar, A. Adnan, D. Fall y S. Kashihara, (2018). LouPe: LoRa Performance Measurement Tool. 2nd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIconCIT), doi: 10.1109/EIconCIT.2018.8878525.

- N. Varsier and J. Schwoerer, (2017). Capacity limits of LoRaWAN technology for smart metering applications," IEEE International Conference on Communications (ICC), doi: 10.1109/ICC.2017.7996383.
- P. Edward, E. Tarek, M. El-Aasser, M. Ashour and T. Elshabrawy, (2019). Further LoRa Capacity Enhancement through Interleaved Chirp Spreading LoRa Expansion. International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), doi: 10.1109/WiMOB.2019.8923337.
- Robbe and W. Danny, (2018). A QoS-Aware Adaptive Mobility Handling Approach for LoRa-Based IoT Systems. IEEE 12th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO). Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8614287>
- Rudeš H., Kosović I. N., Perković T., Čagalj M. (2018). Towards reliable IoT: Testing LoRa communication. 26th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). <https://ieeexplore.ieee.org/document/8555783>
- S. Demetri, M. Zúñiga, G. P. Picco, F. Kuipers, L. Bruzzone and T. Telkamp. (2019) Automated Estimation of Link Quality for LoRa: A Remote Sensing Approach. 18th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), doi: 10.1145/3302506.3310396.
- Semtech, (S.f). Recuperado de: <https://LoRa-developers.semtech.com/get-started/what-is-LoRa>
- T. Elshabrawy and J. Robert, (2019) Capacity Planning of LoRa Networks With Joint Noise-Limited and Interference-Limited Coverage Considerations. IEEE Sensors Journal, vol. 19, no. 11, doi: 10.1109/JSEN.2019.2897156.
- T. Petrić, M. Goessens, L. Nuaymi, L. Toutain and A. Pelov, (2016). Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN, IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/779456>
- Tiurlikova, N. Stepanov and K. Mikhaylov, (2018). Method of Assigning Spreading Factor to Improve the Scalability of the LoRaWAN Wide Area Network. 10th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), doi: 10.1109/ICUMT.2018.8631273.

U. COUTAUD and B. TOURANCHEAU, (2018). Channel Coding for Better QoS in LoRa Networks. 14th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/>