




Redes LoRaWAN. Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT.

Miguel Angel Manrique Latorre¹, Leidy Marcela Buitrago Márquez², Jairo Hernández-Gutiérrez³

¹ [Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia](#) 
² [Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia](#) 
³ [Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia](#) 

RESUMEN

Introducción: El presente artículo es producto de la investigación “Redes LoRaWAN. Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT.”, realizado durante el periodo 2018-2019 en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, aplicando la metodología de revisión sistemática de literatura (SLR)

Objetivo: El propósito de este artículo es realizar una revisión de los componentes funcionales tanto físicos como lógicos de la tecnología LoRa y sus protocolos LoRaWAN, y además profundizar en sus características principales, con el fin de obtener una visión objetiva acerca de su rol como red para aplicaciones de IoT.

Metodología: Se revisaron cerca de 50 fuentes bibliográficas, y se descartaron aquellas que no contestan las preguntas de investigación planteadas en el numeral 1.1

Conclusión: LoRaWAN es una gran opción para implementar redes de bajo consumo energético y gran cobertura (hasta de 15 Km). Las cualidades que posee esta red la perfilan como la red más adecuada para aplicaciones IoT (internet de las cosas).

Limitaciones: Existe poca diversidad de información acerca de este tema, por lo general, los documentos encontrados corresponden a los mismos autores y redundan los temas. En este documento recoge cerca de 50 referencias, buscando diversidad de autores y puntos de vista

Originalidad: Se presenta un documento en idioma español, donde se organiza y resume información dispersa, a veces confusa, sobre los aspectos fundamentales de la tecnología LoRa y LoRaWAN

Palabras clave: LPWAN, LoRa, LoRaWAN, IoT

LoRaWAN networks. Review of functional components in IoT applications.

ABSTRACT

Introduction: This article is the research product of "Redes LoRaWAN. Review of functional components in IoT applications. ", Carried out during the period 2018-2019 in the Francisco José de Caldas District University, applying the methodology of systematic review of literature (SLR)

Objective: The purpose of this article is to review the functional physical and logical components of LoRa technology and its LoRaWAN protocols, and also to delve into its main features, in order to obtain an objective view of its role as a network for applications. of IoT.

Methodology: Nearly 50 bibliographical sources were reviewed, and those that did not answer the research questions set forth in number 1.1 were discarded.

Conclusion: LoRaWAN is a great option to implement networks with low energy consumption and large coverage (up to 15 km). The qualities of this network make it the most suitable network for IoT (internet of things) applications.

Limitations: There is little diversity of information about this topic, in general, the documents found correspond to the same authors and redo the topics. In this document it collects about 50 references, seeking diversity of authors and points of view

Originality: A document is presented in Spanish, where scattered, sometimes confusing, information about the fundamental aspects of the LoRa and LoRaWAN technology is organized and summarized.

Keywords: *LPWAN, LoRA, LoRaWAN, IoT.*

1 INTRODUCCIÓN

Internet de las cosas o más conocido como IoT (Internet of Things), es la tendencia de conectar todo tipo de dispositivos a la red internet. Esta simple tendencia, ha producido un crecimiento exponencial de diferentes aplicaciones prácticas en campos como lo son seguridad, agricultura, medición, ciudades inteligentes (Smart cities), y hogares inteligentes [1]

Con la expansión del concepto de IoT, son más evidentes las falencias encontradas en las redes de comunicaciones actuales para adoptar este nuevo concepto. Por este motivo aparece LoRaWAN, un estándar que permite la conexión de una gran cantidad de dispositivos de bajo consumo, con un gran alcance, además de flexibilidad y sencillez en su implementación. Cabe aclarar que esta tecnología no es la única opción para la implementación de redes IoT, pero posee ciertas cualidades que la hacen interesante, y por ello es necesario revisar sus componentes.

1.1 Enfoque de investigación

Esta revisión se centra solamente en los componentes funcionales, es decir, en los componentes tanto físicos como lógicos de esta tecnología, y cómo estos son capaces o incapaces de solventar las necesidades de una red IoT. Para esta labor se realizó una búsqueda de la bibliografía existente aplicando una Metodología Revisión sistemática de la literatura (SLR) siguiendo lo dictado por Velásquez [2] y se plantearon las siguientes preguntas de investigación:

- **QR1.** ¿Es LoRa WAN la tecnología de comunicación ideal para la implementación de aplicaciones IoT?
- **QR2.** ¿Cuáles son los componentes lógicos y físicos de LoRa WAN, que caracterizan a la tecnología y la resalta sobre otras?
- **QR3.** ¿De acuerdo a las investigaciones existentes de tipo SLR o de meta análisis (MA) se puede argumentar la relevancia de LoRaWAN en el campo de las redes IoT?
- **QR4.** ¿Las investigaciones y publicaciones SLR en el campo de las IoT, manejan la calidad necesaria para contribuir a la continuidad o nuevas líneas de investigación, con el fin de determinar el futuro de las aplicaciones del internet de las cosas?

Las anteriores cuestiones son denominadas preguntas primarias, ya que son el objetivo buscado por este documento. De las anteriores preguntas, se derivan otras denominadas secundarias; están dirigidas a temas más puntuales y son decisivas al momento de excluir referencias, estas son:

- **QR1.1.** ¿Las investigaciones SLR analizadas, plantean puntos de discusión apoyados en evidencias, que apoyen o refuten el uso de la tecnología LoRaWAN en aplicaciones IoT?
- **QR2.1.** ¿Las investigaciones SLR analizadas, proponen ventajas frente a otras tecnologías, demostrables con base teórica o práctica, que resalten a LoRaWAN como una tecnología relevante?
- **QR3.1.** ¿Se puede determinar por medio de las directrices implementadas de cada SLR usada en este proyecto, si contemplan datos relevantes para esta investigación, es decir, si sus componentes descritos en factores de seguridad, costos, alcance, escalabilidad, etc., brindan enfoques relevantes?

- **QR4.1.** ¿Existen limitantes a nivel de investigación de LoRa y del campo de las IoT, que no permitan la profundización de las investigaciones?
- **QR4.2.** ¿Es posible que las evidencias estén más orientadas hacia la teoría, que hacia práctica y que los estudios actuales sean netamente teóricos?, y si es así ¿cuáles serían las causas que hacen a LoRaWAN poco funcional en aplicaciones de gran escala?

Para la recolección de referencias de la metodología SLR (Revisión sistemática de literatura) se consultaron las bases de datos IEEE explore, Google scholar, Research gate y arXiv. De esta búsqueda se seleccionaron cerca de 100 referencias, la cuales fueron clasificadas en cuatro grupos:

Artículos de revisión: Aquellos dedicados a revisar literatura de LoRa y LoRaWAN, se obtuvieron 7 documentos.

Artículos de Comparación: Son los documentos que se dedican a comparar la tecnología LoRa con otras tecnologías de red como SigFox, NB-IOT, 5G, WiFi y demás. Se obtuvieron 43 documentos.

Artículos de Aplicación: Son aquellos dirigidos a aplicaciones concretas, en las cuales LoRa y LoRaWAN son un factor importante solución. Se encontraron 30 referencias

Otros Artículos: Esta categoría agrupa bibliografía dedicada a estudiar aspectos muy específicos acerca del tema, y por esto es imposible agruparlas. De estos se encontraron 22 documentos.

Estos documentos fueron reunidos en una tabla denominada de síntesis, donde se les asignó un puntaje dependiendo del desempeño obtenido al cumplir con las evidencias de investigación, como lo es mostrado en la figura 1. Los mejores puntajes fueron seleccionados como referencias validas, las cuales hacen parte de esta revisión.

CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN DE REFERENCIAS													
Preguntas de investigación propuestas		Preguntas de investigación propuestas											
		Primarias					Secundarias						
		QR1. ¿Es LoRa WAN la tecnología de comunicación ideal para la implementación de aplicaciones IoT?	QR2. ¿Cuáles son los componentes lógicos y físicos de LoRa WAN, que caracterizan a la tecnología y la resalta sobre otras?	QR3. ¿De acuerdo a las investigaciones extenientes de tipo SLR o de meta analisis (MA) se puede argumentar la relevancia de LoRa WAN en el campo de la IoT?	QR4. ¿Las investigaciones y publicaciones SLR en el campo de las IoT, manejan la calidad necesaria para contribuir a la continuidad o nuevas líneas de investigación?	QR1.1. ¿Las investigaciones SLR analizadas, plantean puntos de discusión apoyados en evidencias que apoyen o refuten el uso de la tecnología LoRa WAN en el campo de la IoT?	QR2.1. ¿Las investigaciones SLR analizadas, proponen puntos de ventajas demostrables en base teórica o practica que resalten a LoRa WAN en comparativa a otras tecnologías de red?	QR3.1. ¿Se puede determinar por medio de las directrices implementadas de cada SLR usada en este proyecto, si contemplan datos relevantes para esta investigación?	QR4.1. ¿Existen limitantes a nivel de investigación de LoRa y del campo de las IoT, que no permitan la profundización de las investigaciones?	QR4.2. ¿Es posible que las evidencias estén más presentes en teoría en que en práctica, y que los estudios actuales sean netamente teóricos, y si es así cuáles podrían ser las causas?			
#	referencia (url / título)	Criterios de inclusión/exclusión							Períodos de Calidad, nivel de respuestas preguntas				
		Tipo de publicación	Componentes de SRL y MA empleados	solución de las	relevancia publicac	Relación con temas estudio	Nivel de Detalle y descripción	Disponibilidad de Informacio	QA1	QA2	QA3	total	
1	Hattari Riad. Low Power Wide Area Networks (LPWAN) Overview and Applications. XCOM, 2017.	5	4	4	4	4	4	4	5	3	4	3	45
2	M. Ayash, et al., Coexistence of WiFi and LFI toward 5G: concepts, opportunities, and challenges. IEEE Access, 2017.	5	4	4	4	4	4	4	5	3	3	3	45
3	Y. Kim, J. Lee, J. Jeong, S. Chong, Multi-flow rate control in delay-tolerant networks. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2017.	5	4	4	4	4	4	4	5	4	3	3	44
4	J. Jeong, Y. Yi, J.-W. Cho, D. Eun, S. Chong, Energy-efficient wi-fi sensing policy under multi-user interference. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2017.	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	3	43
5	NORRLOF, JOHANNA y LAGUSSON, PETER. A Study of Low-Power Wide-Area Networks. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017.	4	4	4	4	4	4	5	4	4	3	3	44

Figura 1 Tabla de síntesis para exclusión de referencias en la metodología SLR

1.2 Estructura del documento

Para resolver estas preguntas, este documento fue dividido en siete secciones. La primera sección es una aproximación al concepto de redes de baja potencia y gran alcance llamadas LPWAN (low-power wide-area network) e introduce una visión histórica acerca de estas tecnologías. En la sección siguiente se propone un modelo de referencia, el cual es la herramienta esencial para desglosar y facilitar el posterior desarrollo del documento. En las secciones 4 y 5 se describen los componentes físicos y lógicos propios de LoRa y LoRaWAN, y finalizando se propone una discusión acerca de la idoneidad de las redes LoRaWAN como solución de los requerimientos de una red IoT.

El principal aporte de este artículo, es desglosar una gran cantidad de información dispersa, y concentrarla en un solo documento, con el fin de discernir de manera objetiva, las bondades de la tecnología LoRa y poder tener una visión formada sobre qué tan buena opción es LoRaWAN como red IoT.

1.3 Antecedentes

La tecnología LoRa y sus protocolos LoRaWAN han atraído el interés de muchos académicos, que centran sus trabajos en entender los aspectos más importantes de esta tecnología y su rol disruptivo en el mundo de las redes de baja potencia. Aunque existe una gran cantidad de bibliografía disponible referente a este tema, hace cinco años esto no era así. No fue hasta el año 2015, cuando numerosos trabajos empezaron a ser publicados, tanto así que en septiembre de 2018 hubo alrededor de 2000 publicaciones en la base de datos Google scholar con la palabra clave LoRaWAN, mientras en la base de datos IEEE xplora había 162 artículos con la misma palabra clave [3]. Al realizar este mismo ejercicio en mayo de 2019, en la base de datos Google scholar existen 4440 resultados con la palabra clave LoRaWAN, de los cuales 3940 fueron creados desde el 2015 hasta la fecha. Así mismo, en la base de datos de IEEE explore fueron hallados 276 resultados, 239 pertenecientes a actas de conferencias, 26 publicados en revistas y 11 son artículos subidos directamente a la plataforma.

Lo descrito anteriormente demuestra la cantidad de información existente; es imposible agrupar todo en un solo documento, pero se han hecho algunos intentos de revisión del tema que vale la pena mencionar. Uno de los trabajos más completos es el realizado por Jetmir Haxhibeqiri [3], en donde se explica de manera muy explícita en que consiste LoRaWAN, haciendo énfasis en sus protocolos, descuidando mencionar las desventajas de LoRaWAN frente a sus principales competidores. Otro gran trabajo, fue el realizado por Ordoñez [4], en donde su principal aporte (aparte de ser de los pocos trabajos en lengua española) es la descripción de los componentes lógicos de LoRaWAN destacando sus principales falencias.

Un documento a resaltar es realizado por M. Saari - A. Muzaffar bin Baharudin [5] el cual realiza una revisión rápida de la bibliografía existente, aplicando una metodología SLR (revisión sistemática de literatura) para cerca de 91 fuentes diferentes. Finalmente, cabe mencionar los aportes hechos por Alexandru Lavric y Valentin Popa, los cuales en diferentes trabajos, han intentado mostrar la importancia de LoRaWAN en el mundo de las redes IoT; entre sus principales trabajos se destacan [6], [7], [8], los cuales fueron extraídos de actas de conferencias, y tratan de temas diversos desde los componentes elementales de LoRa hasta los desafíos que enfrenta esta tecnología.

Otro tipo de documentos encontrados en esta bibliografía, son aquellos que buscan comparar diferentes tecnologías de redes de bajo consumo (LPWAN), entre estos destacan Mekki-Bajic [1] y [9], Ikpehai-Adebisi [10], Sinha-Wei [11], Finnegan-Brown [12] y Wang- Fapojuwo [13]. Todos estos artículos tienen la característica de comparar dos o más tecnologías LPWAN entre las que se encuentran SigFox, NB-IOT y LoRa, para destacar sus puntos fuertes y débiles.

En la categoría de documentos destinados a aplicaciones, destacan aquellos orientados a una nueva tendencia denominada IoE (Internet of Energy), la cual busca conectar, medidores, actuadores y sensores con el fin de optimizar las redes eléctricas y principalmente aquellas que se basan en energía limpias; como lo explica claramente Song-Lin [14] y Bao-Wei [15]. Otra aplicación importante es aquella donde se necesita monitorear un área extensa donde existen varios sensores, como lo indican Xihai Zhang [16], Petäjälä - Mikhaylov [17] y Mikhaylov - Moiz [18]. Existen otras aplicaciones en campos como la automatización [19], [20] y la industria [21].

También existe una serie de documentos que resuelven problemáticas específicas, y no pueden ser categorizados en un conjunto específico; estas van desde preguntas técnicas como la rapidez ADR

(Adaptative Date Rate) [22], hasta cuestiones sobre la escalabilidad de LoRaWAN [23], [24].

2 ¿QUÉ ES LPWAN (LOW-POWER WIDE-AREA NETWORK)?

Las tecnologías actuales tales como 3G/4G o WiFi, están orientadas a la transmisión de gran cantidad de datos a una alta velocidad, demandando un alto consumo energético, y además sin admitir una gran cantidad de dispositivos conectados, lo que no se ajusta a los requerimientos descritos anteriormente. Esto muestra que el mundo de las comunicaciones no estaba preparado para el surgimiento de una tendencia como IoT, lo que desembocó en el nacimiento de una nueva generación de tecnologías orientadas a suplir estas necesidades, a las cuales fueron agrupadas como redes LPWAN (Low Power Wide-Area Network).

LPWAN representa una clara evolución de las redes de comunicación orientadas hacia los dispositivos IoT. Estas redes fueron diseñadas para interconectar una gran cantidad de dispositivos, con un alcance superior a las tecnologías convencionales, usando la menor cantidad de recursos, pero sacrificando la velocidad de transmisión, lo que las hacía ideales para nueva tendencia de interconectar sensores y dispositivos de baja velocidad, pero ineficaces para transmisión de voz, audio y video. [1]

El término LPWAN (low-power wide-area network) es muy reciente, tanto así que en 2013 ni siquiera existía [1], y reúne las nuevas tecnologías con licencia y sin licencia que estaban surgiendo en el momento, orientadas a la conexión de dispositivos con baja velocidad de transmisión de datos.

Existen varias tecnologías LPWAN con las que se puede crear una red y solventar algunas necesidades de IoT, pero en la actualidad solo existen tres que ofrecen soluciones completas: Sigfox, Ingenu y LoRa [4]. Estas tres tecnologías ya se encuentran con presencia a nivel mundial, pero existe una gran diferencia entre el modelo de negocio tomado por Sigfox e Ingenu frente al seguido por LoRa. Las dos primeras (Sigfox e Ingenu) optaron por un modelo de negocio propietario, en donde ellas se encargan de ofrecer todos los servicios IoT requeridos, es decir, la venta de dispositivos, la red de conexión y servicios adicionales; mientras tanto LoRa siguió un modelo más abierto donde la empresa propietaria llamada Semtech tiene derechos solamente sobre la capa física, es decir, los dispositivos, y la comunidad LoRa Alliance se encarga de estandarizar los protocolos denominados LoRaWAN. Desde el punto de vista práctico, LoRa y LoRaWAN permiten que cualquier entidad pueda desplegar su propia red IoT, lo que hace interesante esta tecnología y explica porqué grandes empresas en el sector TI tienen intereses en este tipo de redes.

3 MODELO DE REFERENCIA LORA

El desarrollo de un modelo de referencia para IoT, es uno de los desafíos que trae este concepto, ya que el modelo de referencia actual OSI queda obsoleto al intentar agrupar todas las tecnologías LPWAN [25], por lo que se podría decir, que para redes IoT, hasta el momento, no existe un modelo de referencia que agrupe todas las tecnologías LPWAN, y que permita la creación de un “Internet de las cosas” en vez de una “Intranet de las cosas”; como se implementan estas redes actualmente. Por lo mencionado anteriormente, cada tecnología ha desarrollado su propio modelo, LoRa Alliance no es la excepción.

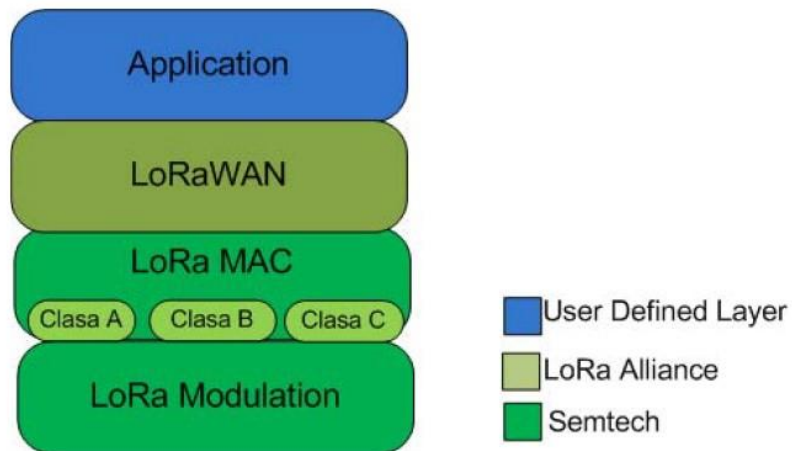


Figura 2 Modelo de referencia propuesto para LoRaWAN [6]

En la figura 2 se describen las capas que componen el modelo de comunicación propuesto por LoRa Alliance. Como se había mencionado anteriormente, la empresa Semtech se encarga de los componentes físicos de LoRa, mientras que los componentes lógicos están a cargo de la comunidad LoRa Alliance, los cuales comprenden la estructura de los diferentes protocolos de comunicación que deben servir como soporte a las aplicaciones de capa final que el usuario desee implementar.

4 COMPONENTES FÍSICOS ¿QUÉ ES LORA?

LoRa es una tecnología de capa física patentada por Semtech en 2014 [26]. Esta tecnología está basada en una técnica de comunicación denominada modulación de espectro expandido SS (spread spectrum technique). SS es una técnica utilizada en sistemas industriales de IoT, que emplean una banda ancha (similar a señales de ruido) para transmitir datos y difundir la señal portadora a través de un ancho de banda que es mucho más grande que el ancho de banda de una señal de datos real [27]. Esta señal puede realizar saltos de frecuencia en periodos cortos de tiempo, permitiendo transmisiones simultaneas, además al utilizar un espectro ancho, la potencia utilizada para su transmisión es pequeña como lo muestra la figura 3, lo que se traduce en un gasto energético mínimo [27]. La Modulación de la capa física LoRa opera en la banda sin licencia ISM (Industrial, Scientific and Medical), en las frecuencias 868 MHz en Europa, 915 MHz en América del Norte, y 433 MHz en Asia [8], por lo que no existen costos por su uso.

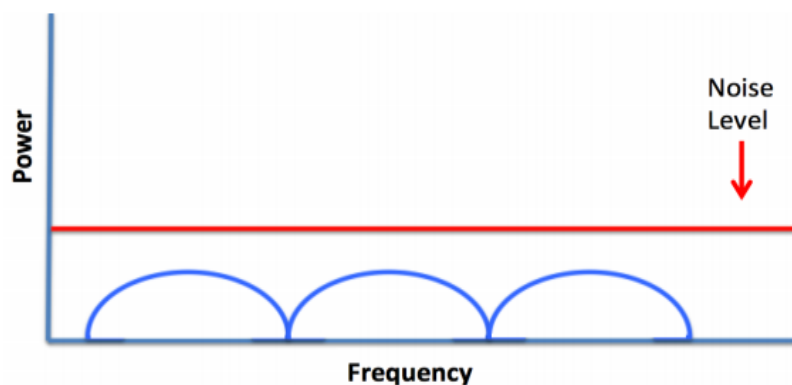


Figura 3 Modulación de espectro de banda expandido [27]



Figura 5 Gateway Cisco para LoRaWAN [29]

- Servidores de red: Son equipos servidores (pueden ser locales o en la nube) encargados de la recepción y procesamiento de la información proveniente de los dispositivos finales, además estos servidores se encargan de la configuración de red y gestión de los dispositivos conectados a la misma.

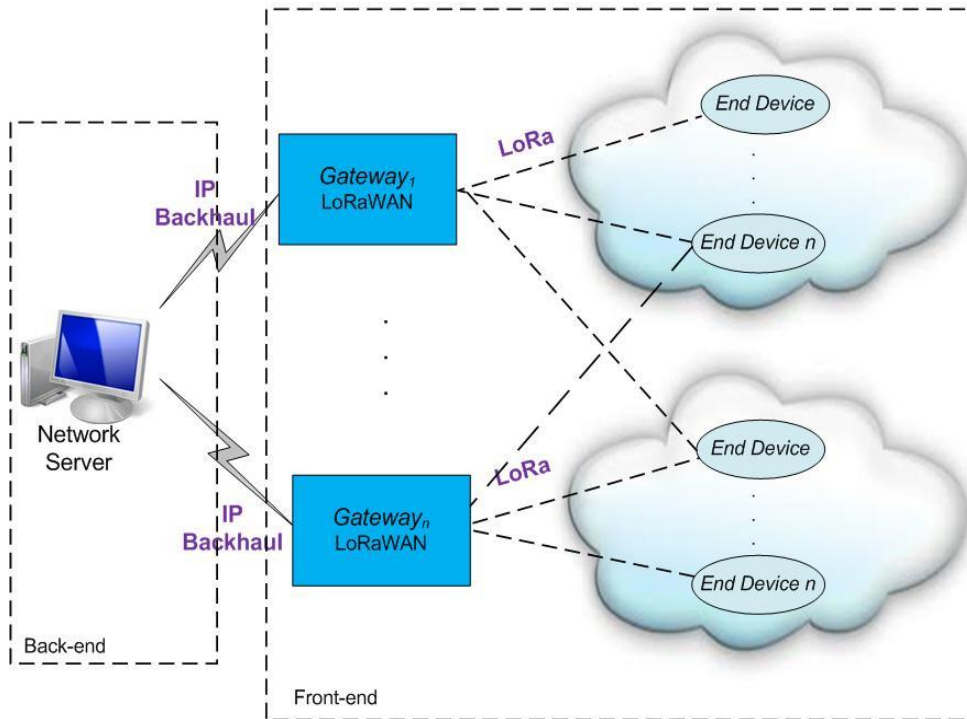


Figura 6 Servidor LoRa [7]

La topología comúnmente empleada en este tipo de redes, es aquella denominada estrella, donde los dispositivos están conectados directamente entre sí, sin intervención de enrutadores.

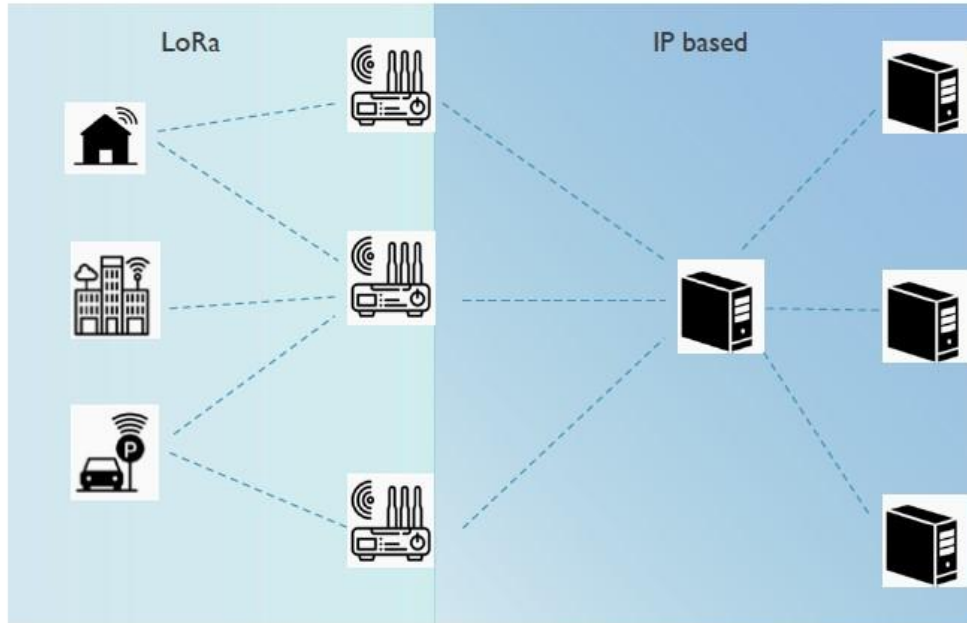


Figura 7 Topología de red LoRa [3]

4.2 Modulación CSS (Chirp Spread Spectrum)

La capa física de LoRa basa sus comunicaciones en un tipo de modulación de espectro expandido CSS (Chirp Spread Spectrum), la cual es tan importante, que es necesario conocer sus fundamentos.

4.2.1 Teorema Shannon – Hartley

Para poder entender los fundamentos de la tecnología LoRa, es necesario conocer el teorema Shannon-Hartley, el cual establece la capacidad en un canal de Shannon y define la tasa máxima de transferencia de información que se puede transmitir en un ancho de banda definido en presencia de ruido [30].

$$C = B * \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (1)$$

Donde:

C: Es la capacidad del Canal

B: Es el ancho de banda del canal (hz)

S: Potencia promedio de la señal recibida (watts)

N: Potencia promedio de la Interferencia por ruido (watts)

$\frac{S}{N}$: *Relacion Señal a Ruido (SNR)*

Al reorganizar la Ecuación 1 y pasando de log base 2 a logaritmo natural e, y sabiendo que $\ln = \log_e$, podemos

Manipular la ecuación de la siguiente manera:

$$\frac{C}{B} = 1.433 * \frac{S}{N} \quad (2)$$

En aplicaciones de espectro amplio, la relación señal a ruido es muy pequeña, ya que la potencia de la señal es menor que el piso del ruido [30]. Suponiendo $\frac{S}{N} \ll 1$ se tiene:

$$\frac{N}{S} \approx \frac{B}{C} \quad (3)$$

De la ecuación 3 se puede ver que en un canal determinado de capacidad C, con solo aumentar o disminuir el ancho de banda, se puede controlar la degradación causada por el ruido [30], de esta manera se puede transmitir en varios canales simultáneos, en un ancho de banda limitado, con interferencias de otras comunicaciones y aún así tener una transmisión libre de ruido, como sucede en la tecnología LoRa.

4.2.2 Espectro expandido (SS)

Uno de los principios de funcionamiento de CSS (Chirp Spread Spectrum), es la técnica conocida como espectro expandido por Secuencia Directa o DSSS, el transmisor ensancha el ancho de banda para cada bit transmitido, de esta forma el canal de comunicación varía el ancho de banda del canal a una frecuencia constante y de esta forma evita la interferencia causada por el ruido presente en el canal [30].

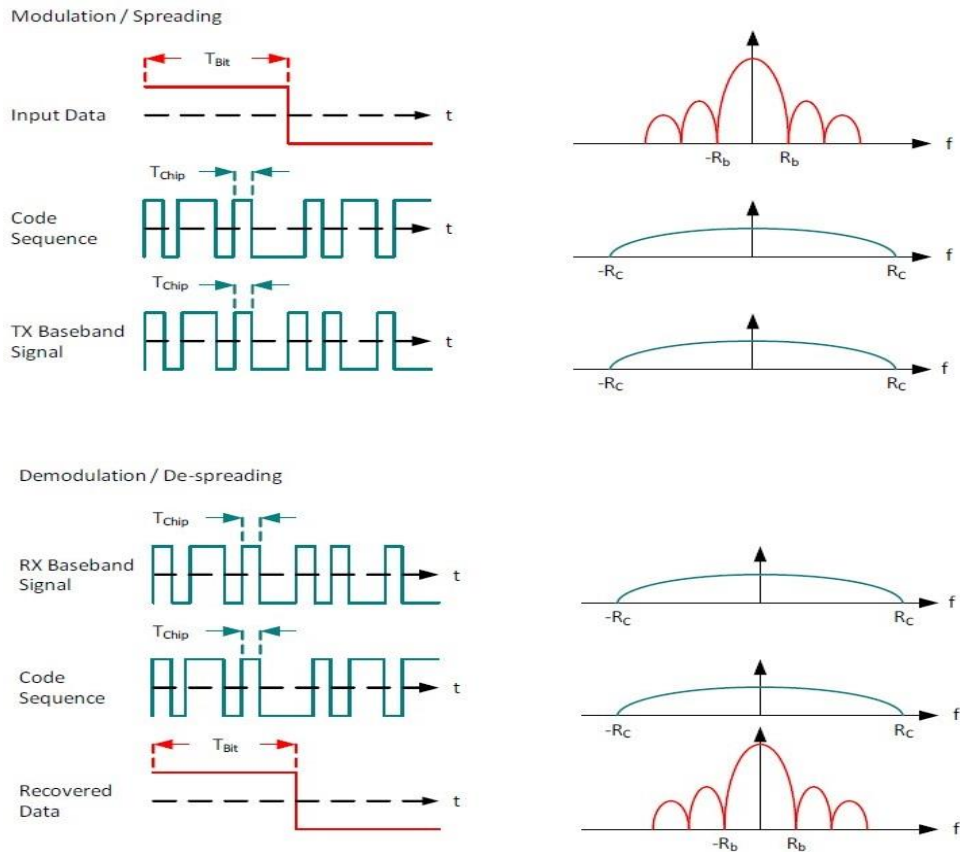


Figura 8 Modulación Demodulación DSSS [30]

Aunque esta forma de transmitir información resulta útil en el sentido de la tener inmunidad al ruido, el sistema debe estar perfectamente sincronizado, lo cual requiere de la implementación de relojes que se deben sincronizar cada cierto tiempo, lo que implica un alto consumo de energía, y un gran costo.

En la década de 1940 aparece una tecnología novedosa desarrollada para aplicaciones de radar conocida como Chirp Spread Spectrum o CSS. Esta técnica reemplaza la sincronización por medio de relojes, por una en donde se emite un “chirrido” donde todos los chirridos poseen la misma duración y sirven para sincronizar transmisor con receptor y de esta forma iniciar la comunicación, disminuyendo considerablemente el consumo y manteniendo la inmunidad al ruido, cualidad característica la modulación de banda expandida. Posteriormente esta técnica fue adoptada en el estándar IEEE 802.15.4 para la creación de redes personales de bajo consumo WPAN [30]

La modulación usada por la tecnología LoRa une las ventajas de la técnica DSSS con el bajo consumo (25 mA en transmisión y 10 mA en transmisión [31]) característico de CSS, y así consigue disminuir el costo de su hardware, obtener una transmisión de gran alcance e inmune al ruido, y además con un bajo consumo energético.

4.2.3 Trama de la capa física LoRa

La trama de la capa física de LoRa consta básicamente de cuatro secciones, preámbulo, Header, PHY CRC y Carga útil, aunque puede venir con una última sección también CRC.

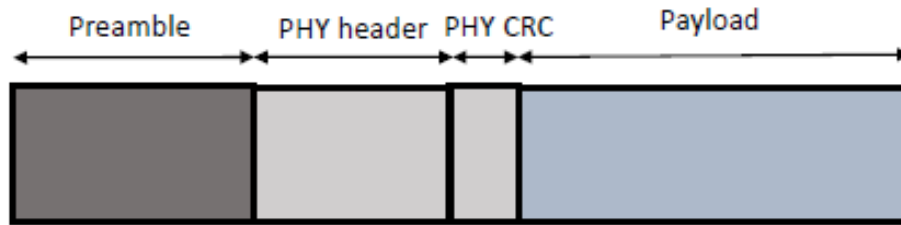


Figura 9 Formato de una Trama LoRa [3]

El preámbulo es la parte donde se sincronizan tanto el transmisor como el receptor y puede tener un longitud desde 10 hasta 65.536 símbolos en total. La parte fija del preámbulo consta de cuatro símbolos, Y el resto es programable con una longitud mínima de seis símbolos y una longitud máxima de 65,532 [32]. El tamaño tanto del preámbulo como de la carga útil y en general de toda la trama se puede variar a través del factor de ensanchamiento SF (spread factor), del cual se hablará con más detalles en la sección 4.2.4.1.

El preámbulo inicia con unos pulsos de chirridos de subida o upchirp los cuales pueden variar en cantidad dependiendo de la programación dada. Luego sigue una palabra o pulsos de sincronización y termina con unos pulsos tipo chirrido de bajada o downchirp. Igualmente, es importante mencionar, que la duración de los silencios en la transmisión es de 0,25 símbolos [33], tiempo suficiente para que el receptor se sincronice con el transmisor. Es de resaltar, que de antemano tanto el transmisor como el receptor deben saber el SF con el que se está trabajando [3].

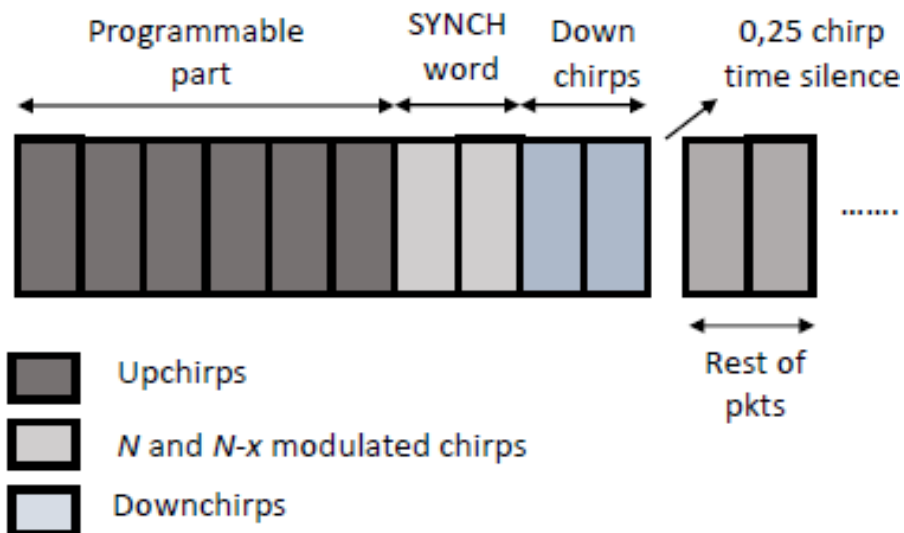


Figura 10 Estructura del Preámbulo [3]

Las tramas de capa física LoRa también incluyen un código de corrección de errores CRC, el cual va incluido tanto PHY CRC como en el campo PayLoad o carga útil. Es de resaltar que el campo PHY CRC contiene la información relevante para acceso al medio de los protocolos LoRaWAN.

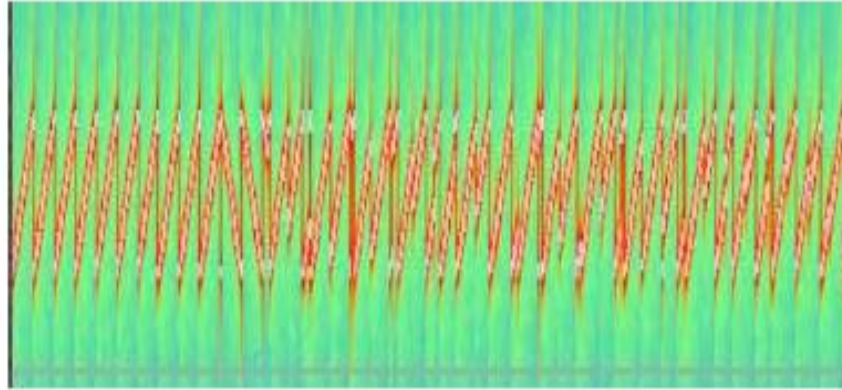


Figura 11 Captura del espectro de una trama LoRa [3]

En la figura 11 se puede apreciar una captura del espectro de una trama de capa física de LoRa, son evidentes los chirridos que señalan los finales de cada parte de la trama, además se puede observar con claridad los chirridos de subida para la sincronización al inicio de la trama.

4.2.4 Parámetros importantes de las tramas de capa física

Entre los parámetros básicos de capa física utilizados para la configuración de tramas destacan tres, el factor de ensanchamiento SF (spread factor) ya mencionado en el apartado anterior, la tasa de código CR (code rate), y el ancho de banda BW (bandwidth).

4.2.4.1 Spread Factor SF

El factor de ensanchamiento SF (spread factor) es el encargado de configurar el alcance que puede existir en un enlace entre transmisor y receptor, este factor puede ser un número de 7 a 12, y entre mayor sea este, mayor será la sensibilidad en el receptor lo que aumenta el alcance, pero a la vez necesita de un mayor número de chirridos de subida (upchirp) para asegurar el enlace, lo que aumenta el tamaño del preámbulo y disminuye el tamaño de carga útil a transportar.

Tabla 1 Relación entre SF y el tamaño de chirridos en bytes [34]

Spreading Factor (SF)	Chirp Length Bytes
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096

En la Tabla 1 se puede ver la relación directa entre el aumento de SF y el tamaño del preámbulo. Esta relación se puede describir como una relación inversamente proporcional entre potencia y tasa de datos

(carga útil), como se puede apreciar en la figura 10, en donde a mayor SF menor tasa de datos (Date Rates). Estas pruebas se realizaron con un CR=0, y tres anchos de banda de 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz [34].

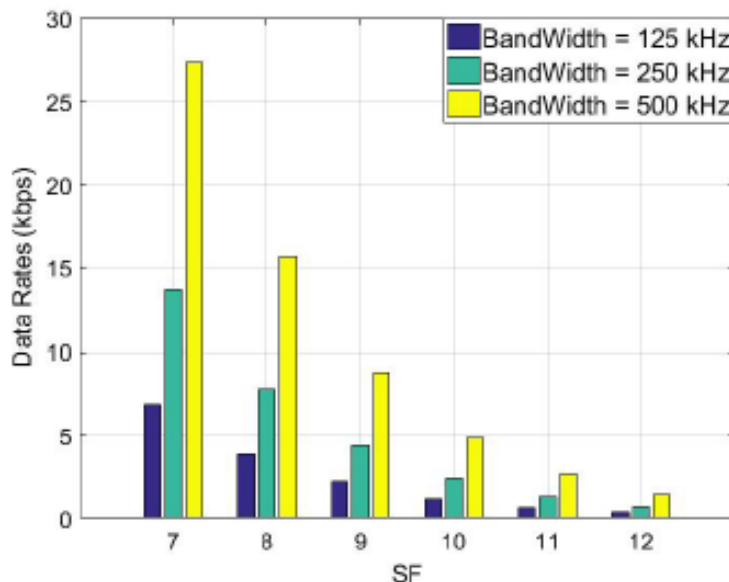


Figura 12 Relación entre la tasa de datos, y el factor SF [34]

4.2.4.2 Tasa de código CR (code rate).

Las redes LoRa son tecnologías orientadas a la conexión, y como es común en este tipo de redes, se debe tener un algoritmo de corrección de errores; para el caso de LoRa, se denomina FEC (Forward error correction) o corrección de errores hacia adelante. Este FEC se puede configurar a través del parámetro CR, LoRa ofrece valores de CR entre 0 y 4, donde CR = 0 significa que no hay FEC. LoRa usa tasas de código de 4/5, 2/3, 4/7 y 1/2. Lo que significa, si CR se denota como $k = n$, donde k representa información útil, y el codificador genera n número de bits de salida, luego $n - k$ serán los bits redundantes [34]. La redundancia permite al receptor detectar y, a menudo, corregir errores en el mensaje, pero también disminuye la tasa de datos efectiva en la tabla 2 se puede apreciar la relación entre el CR y los bits redundantes generados. En la figura 12 se puede apreciar como a medida que aumenta CR, la tasa de datos disminuye, estas pruebas se realizaron con SF=7 y con 3 diferentes anchos de banda.

Tabla 2 Relación entre CR y bits redundantes generados [34]

CR value	1	2	3	4
no. of redundant bits	1	2	3	4
Coding rate	4/5	2/3	4/7	1/2

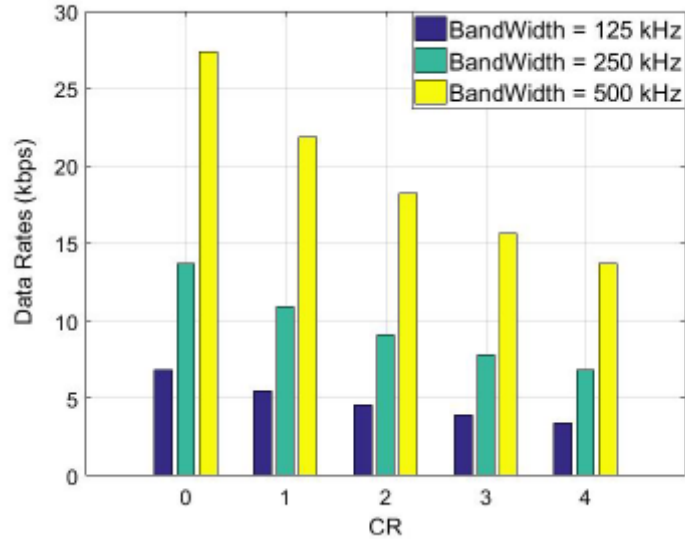


Figura 13 Relación entre CR y la tasa de datos efectiva con SF=7 [34]

4.2.4.3 Ancho de banda BW (bandwidth).

El ancho de banda es otro factor importante con el cual se puede aumentar o disminuir la tasa de datos efectiva.

LoRa proporciona tres configuraciones de BW escalables de 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz también se muestran en la Figura 12. El transmisor envía los datos ensanchados a una tasa de chips igual al ancho de banda del sistema en chips por segundo por Hertz (hz). Entonces un ancho de banda de 125 kHz corresponde a una tasa de chip de 125 kcps. [34]

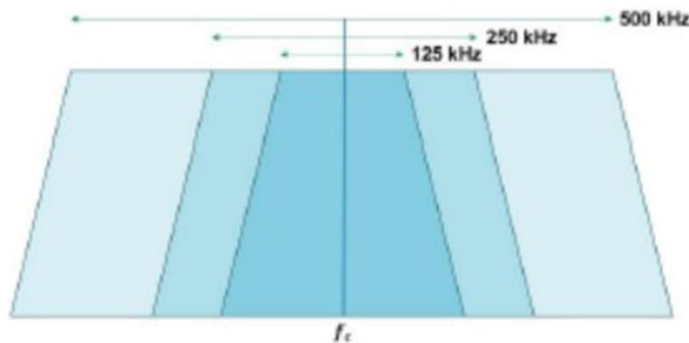


Figura 14 Anchos de banda manejados en LoRa [34]

5 COMPONENTES LÓGICOS ¿QUÉ ES LORA ALLIANCE?

LoRa Alliance es la alianza tecnológica de más rápido crecimiento. Una asociación sin fines de lucro de más de 500 compañías miembro, comprometida a permitir el despliegue a gran escala de IoT de redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) a través del desarrollo y la promoción del estándar abierto LoRaWAN [35]. En otras palabras, LoRa alliance es la comunidad abierta encargada de perfeccionar los protocolos usados en LoRaWAN incluyendo los de control de acceso al medio MAC.

5.1 Capa LoRa MAC

LoRa MAC se refiere al protocolo de control de acceso al medio (MAC) implementado en LoRaWAN, en este caso se trata de una versión basada en el

protocolo ALOHA controlado por un Net Server (servidor de red); las puertas de enlace pueden recibir señales de múltiples ortogonales, hasta el momento puede recibir 9 señales al tiempo. [36]. Cabe aclarar que cada clase en LoRaWAN puede tener modificaciones en su forma de acceder al medio, pero estas se desarrollaran en una sección posterior.

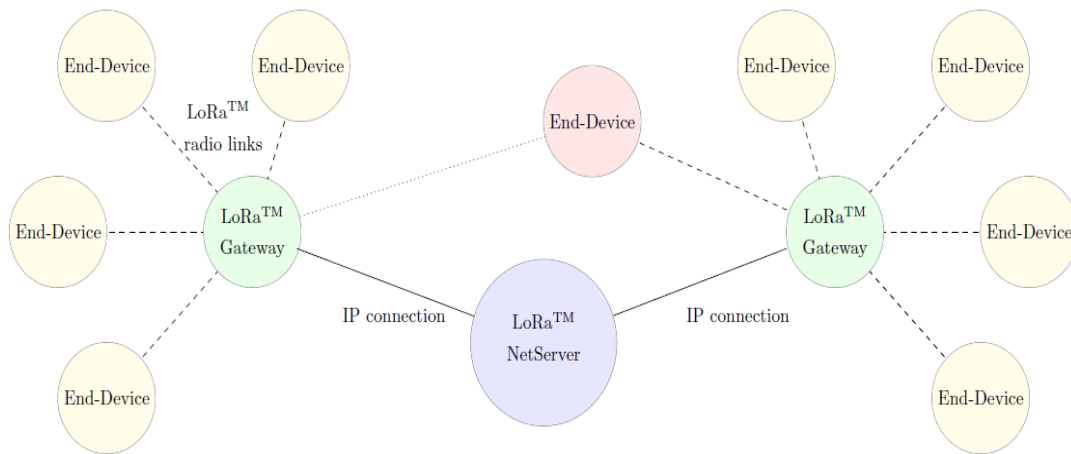


Figura 15 Arquitectura LoRa [36]

Recordando lo dicho en el apartado 4.2.3 donde se mostraba como está constituida una trama LoRa, estas constan de 4 partes, a saber, preámbulo, Header, PHY CRC y Carga útil. El campo payload o PHYCRC tiene un tamaño máximo de 256 bytes, es el segmento donde se describe la trama de acceso al medio MAC como se puede apreciar en la figura 16.

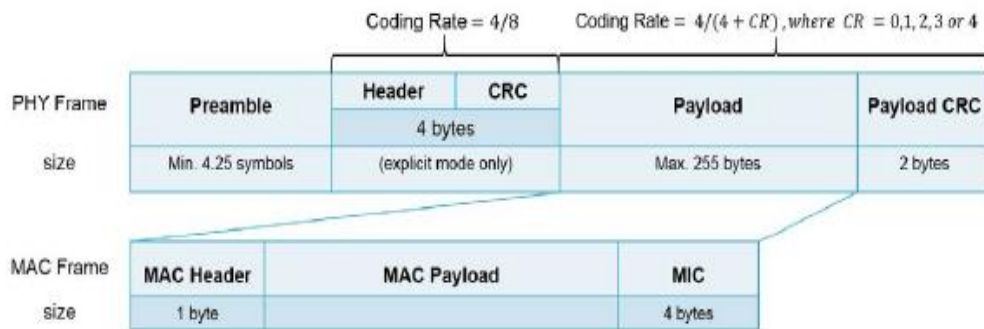


Figura 16 Estructura de un Paquete LoRa [34]

5.1.1 Trama MAC de LoRaWAN

En la figura 16 se puede ver que la trama MAC de LoRaWAN, también denominada LoRa MAC, se ubica en el campo payload de la trama de capa física. La trama MAC está formada por tres campos: la cabecera de la trama (MHDR), el payload (MACPAYLOAD) y un campo de integridad (MIC) [4].

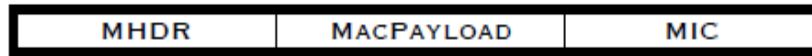


Figura 17 Estructura de una Trama LoRaMAC [37]

La cabecera MHDR identifica el tipo de mensaje que contiene MACpayload. Existen seis tipos de mensajes predefinidos, de los cuales hay unos denominados de tipo “Join”, usados durante el proceso de registro y activación de los dispositivos, y hay otros del tipo Data que son usados para el envío de órdenes y datos de aplicación. Además de estos dos tipos de datos, existe un tercero que no está predefinido llamado “Proprietary” que permite la implementación de mensajes no estándar por parte del desarrollador [4].

Tabla 3 Tipos de datos MAC [37]

Mtype	Descripción
000	Join Request
001	Join Accept
010	Unconfirmed Data Up
011	Unconfirmed Data Down
100	Confirmed Data Up
101	Confirmed Data Down
110	RFU
111	Proprietary

En la figura 16 se muestra la estructura del campo MACpayload.

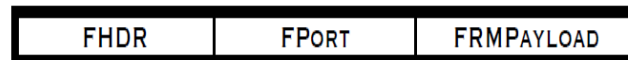


Figura 18 Estructura de MACpayload [37]

La cabecera FHDR contiene la dirección del dispositivo final, y adicionalmente una serie de campos de gestión y de control.

5.2 Clases LoraWAN

En las redes Lora, pueden coexistir diferentes tipos de dispositivos finales, que se pueden usar de diferentes formas, con diferentes propósitos y diferentes requerimientos; por esto LoraWAN ha definido tres tipos de dispositivos [38].

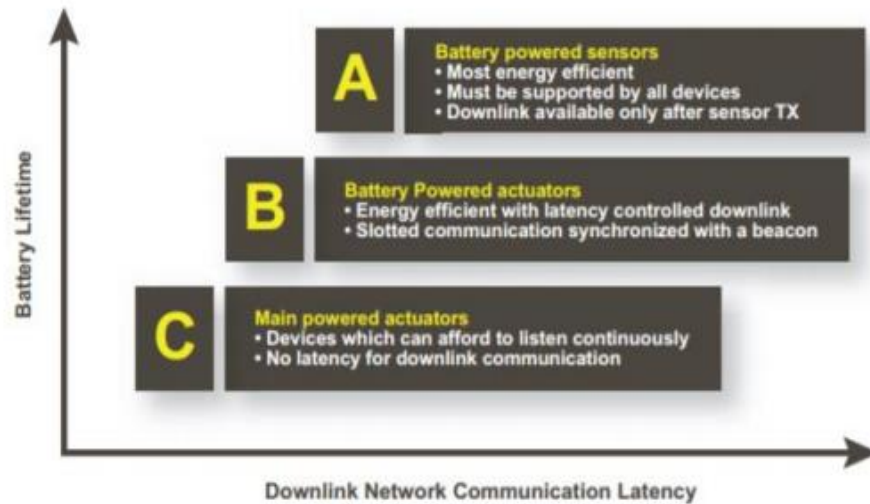


Figura 19 Diferentes clases en LoRaWAN [38]

5.2.1 Clase A

Los nodos de la Clase A permiten comunicaciones bidireccionales por las cuales la transmisión de enlace ascendente de nodo es seguida por dos ventanas cortas de recepción de enlace descendente. La ranura de transmisión programada por el dispositivo final se basa en sus propias necesidades de comunicación con una pequeña variación basada en una base de tiempo aleatoria (tipo de protocolo ALOHA). Esta operación de Clase A es el sistema de dispositivo final de menor potencia para aplicaciones que sólo requieren comunicación de enlace descendente desde el servidor poco después de que el dispositivo final haya enviado una transmisión previa. [39]

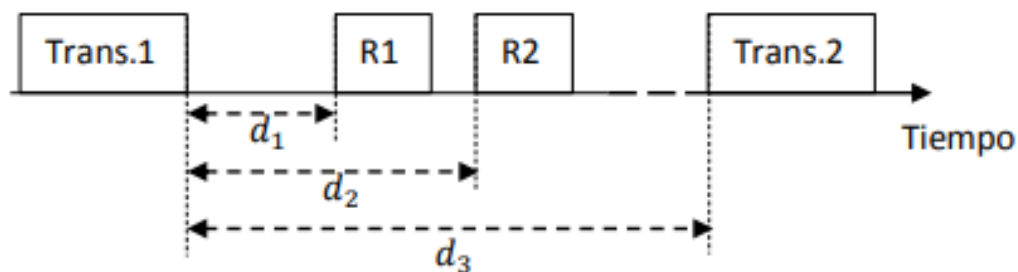


Figura 20 Acceso al medio en dispositivos clase A [39]

En la Figura 20 se puede apreciar el protocolo de acceso al medio usado en dispositivos Clase A, que se utiliza durante el procedimiento de activación, y durante el intercambio de datos (con temporizadores diferentes). Después de una transmisión, se abre una primera ventana de recepción. Si no se detecta ningún preámbulo durante la primera ventana de recepción, o si se detecta una transmisión para otro nodo, se abre la segunda ventana de recepción. Independientemente del hecho de que se reciba o no un preámbulo, el canal (así como otros canales de la misma subbanda) no se puede utilizar durante una duración, dependiendo del ciclo útil. [39]

5.2.2 Clase B

Esta clase está orientada a la conexión de dispositivos que necesitan iniciar una comunicación bidireccional en cualquier momento. A diferencia de los dispositivos clase A, la clase B pueden crear ventanas de recepción sin la necesidad de una transmisión previa [39]. Con esto se aumenta la capacidad del dispositivo de recibir datos, pero consumiendo una mayor cantidad de energía.

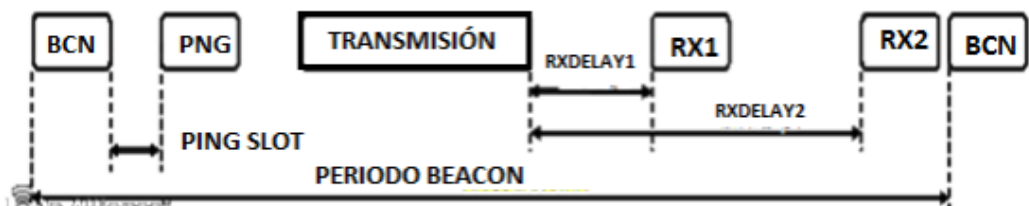


Figura 21 Acceso al medio en dispositivos Clase B [39]

En la conexión de dispositivos Clase B, la sincronización se da por medio de envío de tiempos de transmisión llamados beacon, los cuales son generados por el Gateway o pasarela, y tienen el fin de planificar el periodo de tiempo en el cual las ventanas de transmisión estarán disponibles [39].

5.2.3 Clase C

Este tipo de dispositivos están en modo de recepción permanente y solo cierran sus ventanas de escucha cuando transmiten. Esto disminuye la latencia, pero aumenta de manera considerable el consumo energético.

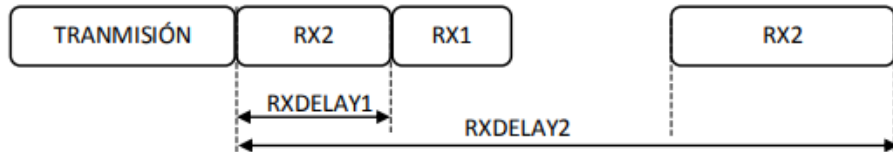


Figura 22 Acceso al medio Clase C [39]

5.3 Seguridad y activación en redes LoRaWAN

5.3.1 Activación y registro

Una red LoRa está diseñada para permitir la conexión de muchos dispositivos diferentes, pero también es necesario evitar que elementos ajenos a la red puedan conectarse, para esto LoRaWAN provee a la red de un mecanismo seguro por el cual se autoriza a un dispositivo conectarse a la red.

El proceso de registro y activación consta del envío y posterior almacenamiento de los parámetros DevAddr (dirección del dispositivo), AppEUI (identificador de aplicación), NwkSKey (llave criptográfica de sesión) y AppSKey (llave criptográfica de sesión de aplicación) [4].

Para conseguir el registro y configuración de dispositivos finales con los parámetros ya mencionados existen dos procedimientos, OTAA (Over-The-Air-Activation) y ABP (Activation by personalization.)

5.3.1.1 OTAA (Over-The-Air-Activation)

El dispositivo final envía una solicitud de unión al Gateway, que reenvía la trama al servidor de red conteniendo los datos:

- DevEUI: identificador global del nodo.
- (AppEUI): Identificación de la aplicación.
- (AppKey): autenticación con la clave de aplicación

El servidor de red responde con una “join accept”, que es reenviado por el Gateway. El Gateway puede transmitir este “join accept” durante la primera ventana de recepción (que ocurre cinco segundos después del final de la transmisión de la petición de unión) o durante la segunda ventana de recepción (que ocurre seis segundos después del final de la transmisión de la petición de unión). El nodo descifra el “join accept” obteniendo así: DevAddr, NwkSKey y AppSKey. [39]

5.3.1.2 ABP (Activation by personalization).

En la ABP, los nodos poseen en su memoria la información requerida: así, no se requiere comunicación para unirse a la red, este proceso se realiza de manera manual, introduciendo la siguiente información [39] :

- Device Address (DevAddr): Dirección de 32 bits única dentro de la red y presente en cada dataframe la cual permite a la red interpretar los datos y usar las claves de encriptación correctamente.
- Network Session key (NwkSKey): Clave de encriptación AES de 128 bits única para cada nodo y compartida entre el nodo y el Servidor de la red. Proporciona integridad de los mensajes y seguridad para la comunicación entre el nodo y el servidor de la red.
- Application Session key (AppSKey): Clave de encriptación AES de 128 bits única para cada dispositivo y compartida con el nodo y la aplicación del servidor [39]

5.3.2 Seguridad y autenticación

LoRaWAN provee a la red una serie de mecanismos de autenticación mutua, integridad y confidencialidad, basado en un esquema de llave simétrica.

El proceso de activación de un dispositivo final en una Red LoRAWAN se lleva a cabo a través de un mecanismo de autenticación mutua entre dispositivo final y el servidor de red como se observa en la figura 21. Durante el proceso de autenticación, el dispositivo final utiliza la AppKey para calcular el MIC (message integrity code), este mensaje es enviado al servidor como una petición de conexión de red. El servidor que tiene almacenada la AppKey del dispositivo, comprueba la autenticidad de dicha llave, y responde con un mensaje de aceptación cuyo MIC se calcula y codifica con la propia AppKey. [4]

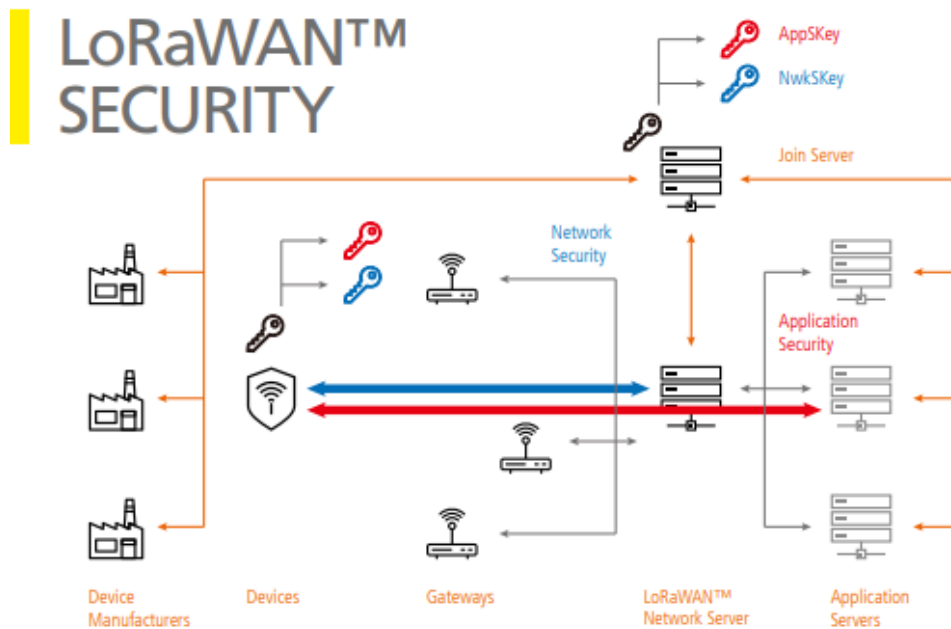


Figura 23 Estructura de la seguridad en LoRaWAN [40]

6 APLICACIONES

Las aplicaciones más habituales en las que participa LoRaWAN, son aquellas en las que se necesita monitorear sensores y actuadores. Como se mencionó en la sección anteriores, los campos más importantes son IoE (Internet of Energy), Automatización e Industria, salud inteligente (Smart Health) entre otros.

6.1 IoE (Internet of Energy)

Las energías renovables están jugando un papel importante en el desarrollo global. Tal es así, que en 2016 gobierno chino anunció nuevas políticas sobre la combinación de internet con energía inteligente para la implementación de energías limpias [14] y de esta forma dar nacimiento a un nuevo concepto denominado red inteligente (Smart Grid).



Figura 24 Primer Proyecto de demostración de energía inteligente aprobado por la Administración Nacional de Energía (NEA) "Internet Plus" City-Park de doble nivel de China, ubicado en Zhuhai, provincia de Guangdong, China. [41]

Un sistema de energía limpia requiere una infraestructura de comunicación robusta que pueda aceptar una mayor variación de las fuentes de energía

renovables [14]. Para poder concebir un sistema de energía inteligente con varias fuentes de energías renovables, desde la perspectiva de la teoría de control, para poder gestionar y equilibrar un sistema tan complejo como el propuesto, es necesario tener acceso a una abundante fuente de información tanto del lado de la oferta como el de la demanda (la información de Internet es una herramienta confiable que puede recopilar información a un costo marginal cero). Sin embargo, los sistemas de energía aún están restringidos por entornos de información cerrados debido a problemas de gestión y técnicos [14]. Estos problemas se hacen más notorios, desde la perspectiva de la demanda, en donde los dispositivos periféricos no son parte del sistema de gestión de información de la red. Este problema, se denomina última milla, y consiste en integrar la demanda como parte activa del sistema, con el fin de equilibrar la oferta y la demanda en un nuevo paradigma de red eléctrica [42]. Según Jun Zou [43], Internet de las cosas que tiene como objetivo conectar todos los dispositivos físicos en el mundo pueden resolver el problema de la "última milla" perfectamente, y en este contexto una gran opción es la Tecnología LoRaWAN, la cual tiene como misión conectar dispositivos finales (como medidores inteligentes), a la red de energía existente, como se puede apreciar en la figura 25.

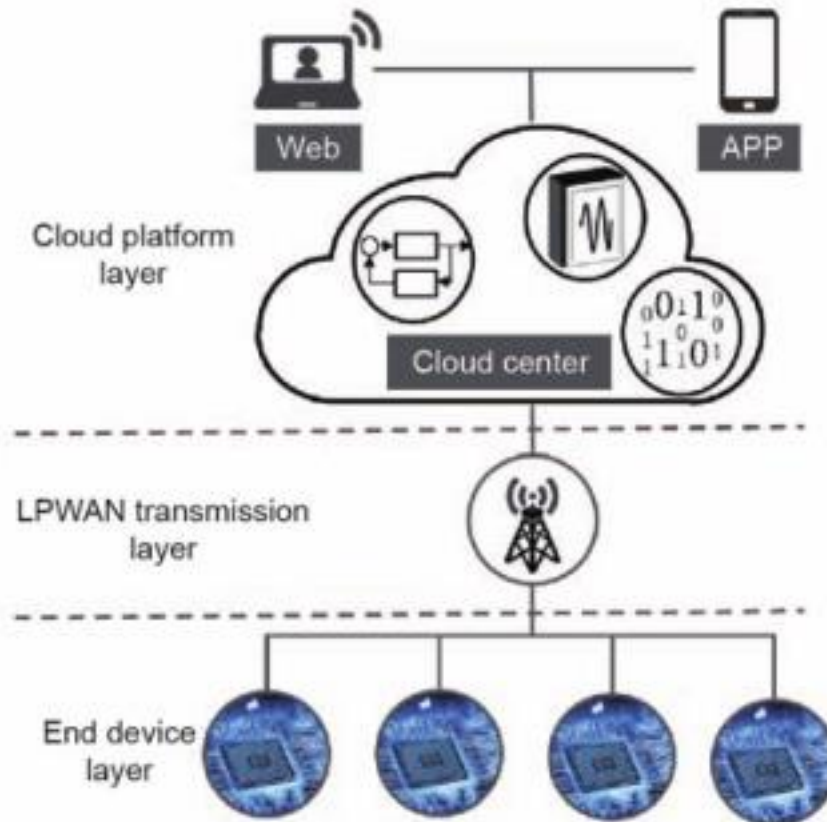


Figura 25 Arquitectura IoE. [14]

6.2 Industria 4.0 o IIoT (Internet Industrial de las cosas)

Hoy en día, LPWAN se utiliza principalmente para supervisar aplicaciones, tales como monitoreo ambiental y Medición inteligente. Sin embargo, sus características son atractivas para aplicaciones IoT; de hecho, la gran eficiencia energética de los dispositivos LPWAN pueden ser realmente interesante, por ejemplo, son de gran utilidad en aplicaciones industriales donde el canal inalámbrico a menudo se ve afectado por multipath y desvanecimiento, lo que les da una ventaja contra tecnologías inalámbricas de baja potencia [21].

Existe un interés creciente en el uso de tecnologías IoT en varias industrias. Varios proyectos industriales de IoT han sido llevado a cabo en áreas tales como la agricultura, la industria de procesamiento de alimentos, monitoreo ambiental, vigilancia de seguridad, y otros [44].

De acuerdo a lo ya mencionado, las tecnologías LPWAN son una solución cada vez utilizadas en las diversas industrias, por sus diversas ventajas, como lo son gran alcance, bajo consumo energético, bajo costo (comparado con las tecnologías móviles) [45]. Igual que estas tecnologías tienen ventajas, también tienen debilidades, y una de ellas es la baja tasa de transmisión de datos sumada a la poca convergencia que podrían tener con otras tecnologías existentes. Es por ello, que aún no son capaces de reemplazar las redes móviles existentes en el sector industrial, pero si es posible combinarlas con la infraestructura de redes móviles actuales, y aprovechar sus ventajas en aplicaciones tolerantes a latencias y vulnerables al ruido. Es aquí donde a Navarro-Ortiz [45] se le ocurrió combinar LoRaWAN con 4G/5G, para obtener una red más robusta y eficiente.

6.3 Salud inteligente (Smart Health)

Los desarrollos recientes y los avances tecnológicos en comunicación inalámbrica, la tecnología de sistemas micro electromecánicos (MEMS) y los circuitos integrados han permitido, con nanotecnología, la miniaturización de nodos y sensores invasivos/no invasivos, colocados estratégicamente en o alrededor del cuerpo humano, para ser utilizados en diversas aplicaciones, tales como la vigilancia de la salud personal. Esta emocionante nueva área de investigación se llama redes inalámbricas de área corporal (WBAN) [46]. Tradicionalmente, los sistemas de atención médica personal se han diseñado en función de las redes inalámbricas de área corporal (WBAN), que suelen consistir en sensores portátiles, nodos equipados con radios de corto alcance y que se comunican con una puerta de enlace que tiene una conexión a una red troncal [17]. El uso de las tecnologías de comunicación de corto alcance convencionales limita la distancia entre la puerta de enlace y los sensores WBAN a decenas de metros, dependiendo de la tecnología utilizada y el entorno de operación. Para garantizar la conexión entre los nodos sensores y la puerta de enlace, de manera convencional, la puerta de enlace también ha sido un dispositivo portátil, como un teléfono inteligente [17].

La tecnología LPWAN permite omitir el dispositivo de puerta de enlace. A saber, las redes LPWAN extienden las distancias de comunicación entre los sensores y las estaciones base a decenas de kilómetros de longitud, además permite conectar varios dispositivos a una sola estación base, lo que disminuye de forma considerable los precios de los sistemas de monitoreo médicos.



Figura 26 Nodo LoRaWAN para conectar sensores médicos a una estación base [17]

7 DISCUSION

LoRa y sus protocolos LoRaWAN han sido desarrollados con el único fin de ser la tecnología líder en la implementación de redes IoT, pero ¿qué tan buena es esta tecnología como solución a este paradigma? En este apartado se darán argumentos a partir de lo ya descrito, para generar una posición respecto a esta pregunta, analizando las características propias que debe tener una red IoT, y cómo la tecnología LoRa las puede o no solventar.

7.1 Características de una red IoT

En la actualidad no están definidos de forma rigurosa los requisitos que debe tener una tecnología de red IoT, pero si se pueden definir algunos que son esenciales para la consolidación de este concepto como lo indica Ordoñez [4], estos requisitos son:

- Dispositivos de bajo consumo: Los dispositivos de conexión, es decir tanto pasarelas, como dispositivos finales deben tener un mínimo de consumo, ya que, al operar con baterías, están deben operar de manera autónoma durante varios años.
- Dispositivos de reducido tamaño: Los dispositivos usados en este tipo de redes no pueden ser voluminosos, ya que se deben adaptar a cualquier objeto que requiera conexión a internet.
- Movilidad total: La red IoT debe tener un alcance tal que permitan una movilidad sin limitaciones de alcance.
- Escalabilidad: Una red IoT debe permitir una gran cantidad de dispositivos conectados.
- Convergencia: Esta característica se refiere a la cualidad de permitir que otros dispositivos con otras tecnologías se pueden conectar a una red IoT
- Complejidad: La implementación de una red IoT debe ser sencilla y fácil de desplegar.
- Seguridad: una red IoT debe asegurar que dispositivos a la red puedan ingresar, y debe asegurar la autenticación de los dispositivos ya conectados
- Costo: Las tecnologías IoT deben poseer un costo moderado, que permita reemplazar sus componentes de manera eficaz y rápida.

7.2 Fortalezas y debilidades de LoRa y LoRaWan

Con los criterios descritos anteriormente, es posible realizar un análisis en el cumplimiento de estos por parte de LoRa y LoRaWAN para poder vislumbrar el potencial de esta tecnología.

7.2.1 Fortalezas

- Dispositivos de bajo consumo: LoRa es eficiente en lo que respecta al consumo energético, permitiendo adaptar sus dispositivos a diferentes escenarios, y si además se tiene en cuenta la

posibilidad de configurar sus dispositivos como Clase A en donde el consumo es mínimo, se tiene una red de muy bajo consumo.

- **Movilidad total:** LoRa permite obtener un gran alcance con pocas pasarelas, y sumado el hecho de poder adaptar este a diferentes escenarios con tan solo modificar un par de parámetros, hacen de LoRaWAN una gran opción para usar en espacios tanto cerrados como abiertos.
- **Costo:** Los dispositivos finales se pueden adquirir con precios entre 5 a 7 euros, mientras las pasarelas oscilan con precios entre 100 euros en adelante y las estaciones base se encuentran dese 1000 euros. A esto se le debe sumar el hecho de que LoRaWAN opera en bandas sin licencia, por lo que no existe un costo agregado a esta.

Tabla 4 Comparación de costos de varias tecnologías LPWAN [1]

	Spectrum cost	Deployment cost	End-device cost
Sigfox	Free	>4000€/base station	<2€
LoRa	Free	>100€/gateway >1000€/base station	3-5€
NB-IoT	>500 M€ /MHz	>15 000€/base station	>20€

- **Complejidad:** La topología de red LoRa consta de muy pocos componentes, además sus protocolos tanto LoRAMAC como LoRAWAN requieren de muy pocos parámetros de configuración, lo que hacen de esta red muy fácil de desplegar.

7.2.2 Debilidades

- **Escalabilidad:** Aunque esta tecnología puede atender un gran número de dispositivos conectados al tiempo, existen otras tecnologías que lo superan como queda demostrado en [1]. En [25] se evidencio el problema en redes LoRaWAN del aumento colisiones de datos directamente proporcionales al aumento de dispositivos finales conectados, lo que evita la escalabilidad de esta red (para más información ver [47]).
- **Convergencia:** LoRaWAN es una red en desarrollo, y no posee un modelo de referencia adecuado que permita la convergencia con otras tecnologías, como si lo permite el modelo de referencia OSI.
- **Seguridad:** Este punto no es el peor, pero si cabe destacar la existencia de otras tecnologías con mejores medidas de seguridad.

7.3 Comparación de LoRa con otras tecnologías LPWAN

Las tecnologías LPWAN pueden ser clasificadas en dos categorías, las que están basadas en SS (Spread Spectrum - espectro expandido) y las tecnologías basadas en UNB (Ultra Narrow Band - Ultra Banda Estrecha) como lo muestra la figura 27.

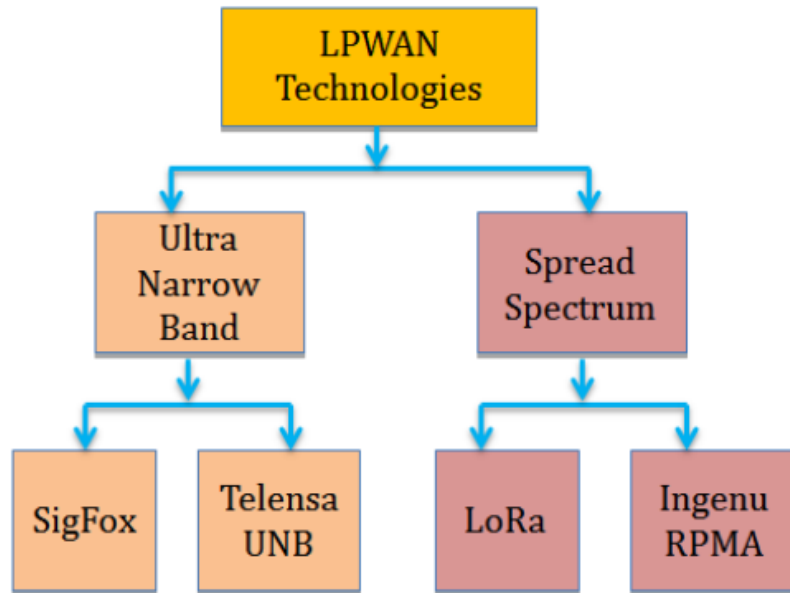


Figura 27 Clasificación de tecnologías LPWAN [27]

Los principales competidores de LoRa son SigFox y NB-IOT, SigFox trabaja sobre bandas sin licencia, mientras NB-IOT lo hace sobre bandas licenciadas; ambas están basadas en tecnología UNB (Ultra Banda Estrecha).

Aunque cada tecnología tiene sus fortalezas y debilidades, es de recalcar, que estos tres tipos de LPWAN se complementan entre sí, es decir, cada una destaca en un factor en el cual las otras dos fallan, como lo muestra la figura 28.

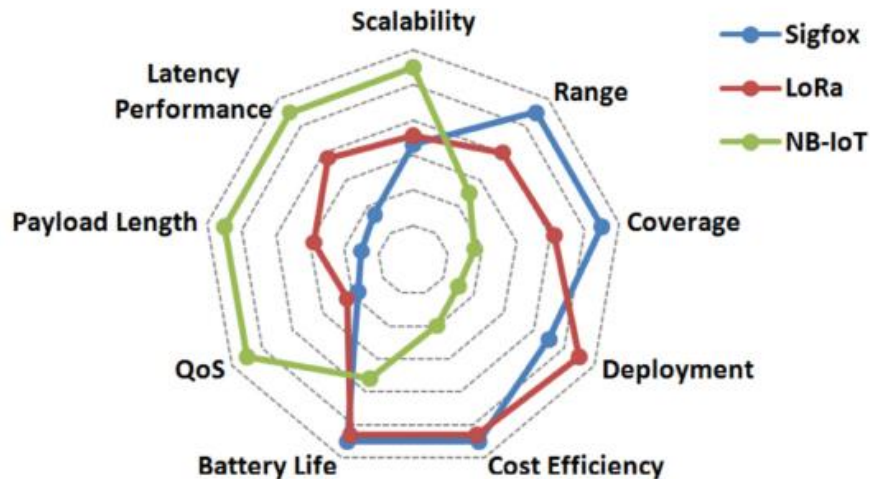


Figura 28 Comparativa de las tecnologías NB-IOT, SigFox y LoRa [1]

Los factores tenidos en cuenta en esta comparación son escalabilidad, rango, cobertura, implementación o despliegue, costo-eficiencia, vida de la batería, QoS (calidad de servicio), tamaño carga útil (Payload-Length), latencia. De la figura 28, se pueden intuir cuales son las mejores y peores características de LoRa respecto a otras tecnologías. LoRa destaca en los parámetros vida de la batería, costo – eficiencia, implementación o despliegue; mientras que sus puntos débiles son escalabilidad, latencia , carga útil y QoS (calidad de servicio), de estas últimas, son de resaltar los factores escalabilidad y QoS , los cuales están en

estudio y se busca en un futuro mejorar este aspecto [48]. En cuanto a latencia se debe decir que este factor es implícito a las tecnologías LPWAN por lo que no es muy relevante en este contexto, además teniendo en cuenta que una baja latencia y poco tamaño de carga útil son los parámetros por los cuales LoRa puede permitirse un menor consumo, bajo costo y gran eficiencia; por lo cual se puede afirmar que las grandes debilidades de LoRa son escalabilidad (debido al aumento de colisiones en interferencia a medida que crece la red) y QoS.

7.4 ¿LoRa y LoRaWAN son interesantes en el ámbito IoT?

En la sección aplicaciones, se pudo ver como LoRa está incursionando cada vez más en campos que han sido dominados por otro tipo de tecnologías, y como estos sectores ven con buenos ojos las particularidades de esta tecnología. A lo largo de la discusión tenida hasta el momento, ha quedado en evidencia la dificultad que tiene LoRa al momento de ser escalable. En el documento *Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?*, Georgiou-Raza [23], concluye con optimismo, que LoRa posee cualidades únicas con las cuales esta tecnología puede mitigar este inconveniente, que coincide con lo dicho por Konstantin-Juha [24]. Con lo anteriormente dicho, si LoRa puede ser escalable, sin duda puede ser la red LPWAN líder en aplicaciones IoT.

7.5 Retos

Aparte del reto de ser escalable, LoRa enfrenta otro gran reto el cual es la convergencia con otras tecnologías y en especial con 5G. Hasta el momento no existe un modelo de referencia para IoT [25], pero con la llegada de 5G la necesidad de agrupar todas las tecnologías IoT en un solo modelo estándar, será evidente. La ventaja que posee LoRa, es estar respaldada por una comunidad abierta [38], que puede desarrollar soluciones rápidamente para solventar los desafíos por venir.

8 CONCLUSIÓN

LoRaWAN es una de esas soluciones emergentes que soportan muchas aplicaciones inteligentes [49]. No es de sorprender esta afirmación, puesto que LoRaWAN es una tecnología que se encuentra en desarrollo con presencia en varios países, soportada por una comunidad, que aumenta en número cada vez más, y por sus cualidades tales como bajo costo, fácil implementación, mínimo consumo energético, inmunidad al ruido, seguridad en sus conexiones y estándares establecidos (protocolos LoRaWAN), está haciendo frente a otras tecnologías líderes en el sector como NB.IoT y Sigfox. A pesar de los esfuerzos y la aceptación que ha tenido LoRa, su gran falla es su escalabilidad, es decir, cuando se conecta un gran número de dispositivos, empiezan a surgir problemas como colisiones de datos, que provocan ineficiencias en la red. Actualmente se ha realizado propuestas para solucionar este desafío [24], [49], pero, hasta que no se solucione este inconveniente, las aplicaciones de LoRa seguirán siendo una intranet de las cosas. Otro gran desafío que afronta, relacionado con sus protocolos LoRaWAN, es la llegada de 5G, ya que esta es la tecnología llamada a ser la “panacea” de las telecomunicaciones; promete unificar todas las tecnologías incluyendo IoT en una sola red y por lo tanto todos los estándares deben ser compatibles con esta, incluyendo LoRaWAN, para la cual no existe un estándar de convergencia con otras redes. Por lo dicho anteriormente, es evidente que LoRa no es perfecta y aún debe enfrentarse a grandes desafíos por venir, pero son innegables las grandes bondades que ofrece a sectores que se ven obligados cada día a adaptarse a esta nueva tendencia llamada Internet de las cosas.

9 REFERENCIAS

- [1] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, and Fernand Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT," *Research Centre for Automatic Control of Nancy*, vol. 5, no. 1, pp. 1-7, Mar. 2017. [Online]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953>, [DOI]. 10.1016/j.ict.2017.12.005
- [2] Juan David Velásquez, "Una Guía Corta para Escribir Revisiones Sistemáticas de Literatura Parte 3," *Revista DYNA - Facultad de Minas*, vol. 82, no. 189, pp. 9-12, 2015. [Online]. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/48931/50329>, [DOI]. 10.15446/dyna.v82n189.48931
- [3] Jetmir Haxhibeqiri, Eli De Poorter, Ingrid Moerman, and Jeroen Hoebeke, "A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology," *Sensors*, vol. 18, no. 11, pp. 1,3,5, Noviembre 2018. [Online]. <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3995>, [DOI]. 10.3390/s18113995
- [4] Ignacio Ordóñez, "Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red LoRaWAN y de los dispositivos LoRa," 2017. [Online]. <http://hdl.handle.net/10609/64365>
- [5] M. Saari, A. Muzaffar bin Baharudin, P. Sillberg, S. Hyrynsalmi, and W. Yan, "LoRa — A survey of recent research trends," in *2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, Opatija, Croacia, 2018. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8400161>, [DOI]. 10.23919/MIPRO.2018.8400161
- [6] Lavric Alexandru and Popa Valentin, "LoRa wide-area networks from an Internet of Things perspective," in *2017 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Targoviste, Rumania, 2017. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8166397>, [DOI]. 10.1109/ECAI.2017.8166397
- [7] Lavric Alexandru and Popa Valentin, "Internet of Things and LoRaTM Low-Power Wide-Area Networks Challenges," in *ECAI 2017 - International Conference – 9th Edition*, Targoviste, Rumania, 2017. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8166405>, [DOI]. 10.1109/ECAI.2017.8166405
- [8] Lavric Alexandru and Popa Valentin, "A LoRaWAN: Long range wide area networks study," in *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, Iasi, Romania, 2017. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8123360>, [DOI]. 10.1109/SIELMEN.2017.8123360
- [9] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, and Fernand Meyer, "Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT," in *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, Atenas, 2018. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8480255>, [DOI]. 10.1109/PERCOMW.2018.8480255
- [10] Augustine Ikpehai et al., "Low-Power Wide Area Network Technologies for Internet-of-Things: A Comparative Review," in *IEEE Internet of Things Journal*, Nov. 2018. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8550722>, [DOI]. 10.1109/JIOT.2018.2883728
- [11] Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei, and Seung-Hoon Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," *ICT Express*, vol. 3, no. 1, pp. 14-21, Mar. 2017. [Online]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>, [DOI]. 10.1016/j.ict.2017.03.004
- [12] Joseph Finnegan and Stephen Brown. (2018, Feb.) A Comparative Survey of LPWA Networking. [Online]. <https://arxiv.org/abs/1802.04222>
- [13] Hai Wang and Abraham O. Fapojuwo, "A Survey of Enabling Technologies of Low Power and Long Range Machine-to-Machine Communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2621 - 2639, June 2017. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7962157>, [DOI]. 10.1109/COMST.2017.2721379
- [14] Yonghua Song, Jin Lin, Ming Tang, and Shufeng Dong, "An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN," *Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 460-466, Aug. 2017. [Online]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917306057>, [DOI]. 10.1016/J.ENG.2017.04.011
- [15] Lishan Bao et al., "Coverage Analysis on NB-IoT and LoRa in Power Wireless Private Network," *Procedia Computer Science*, vol. 131, pp. 1032-1038, 2018. [Online]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187705091830632X>, [DOI]. 10.1016/j.procs.2018.04.252
- [16] Xihai Zhang et al., "A Low-Power Wide-Area Network Information Monitoring System by Combining NB-IoT and LoRa," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 590-598, Feb. 2019. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8386654>, [DOI]. 10.1109/JIOT.2018.2847702
- [17] Juha Petäjajarvi, Konstantin Mikhaylov, Matti Hämäläinen, and Jari Iinatti, "Evaluation of LoRa LPWAN technology for

- remote health and wellbeing monitoring," in *2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, Worcester, MA, USA, 2016. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7498898>, [DOI]. 10.1109/ISMICT.2016.7498898
- [18] Konstantin Mikhaylov, Abdul Moiz, Ari Pouttu, José Manuel Martín Rapún, and Sergio Ayuso Gascon, "LoRa WAN for Wind Turbine Monitoring: Prototype and Practical Deployment," in *2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, Moscú, Rusia, 2018. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8631240>, [DOI]. 10.1109/ICUMT.2018.8631240
- [19] Valentin Alexandru Stan, Radu Serban Timnea, and Razvan Andrei Gheorghiu, "Overview of high reliable radio data infrastructures for public automation applications: LoRa networks," in *2016 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Ploiesti, Romania, 2016. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7861130>, [DOI]. 10.1109/ECAI.2016.7861130
- [20] Ange Ouya et al., "An efficient electric vehicle charging architecture based on LoRa communication," in *2017 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Dresden, Germany, 2017. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8340723>, [DOI]. 10.1109/SmartGridComm.2017.8340723
- [21] Michele Luvisotto, Federico Tramarin, Lorenzo Vangelista, and Stefano Vitturi, "On the Use of LoRaWAN for Indoor Industrial IoT Applications," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, pp. 1-11, 2018. [Online]. <https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2018/3982646/abs/>, [DOI]. 10.1155/2018/3982646
- [22] Shengyang Li, Usman Raza, and Aftab Khan, "How Agile is the Adaptive Data Rate Mechanism of LoRaWAN?," Toshiba Research Europe Ltd., Telecommunications Research Laboratory, Bristol, UK, 2018. [Online]. <https://arxiv.org/pdf/1808.09286.pdf>
- [23] Orestis Georgiou and Usman Raza, "Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?," Toshiba Telecommunications Research Laboratory, 2017. [Online]. <https://arxiv.org/pdf/1610.04793.pdf>
- [24] Mikhaylov Konstantin, Petaejaejaervi Juha, and Haenninen Tuomo, "Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology," in *22th European Wireless Conference*, Oulu, Finland, 2016, pp. 119–124., [DOI]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7499263>
- [25] Alhamedi Adel H, A Idosari Hamoud M, Snasel Vaclav, and Abraham Ajith, "Internet of Things Communication Reference Model," in *2014 Sixth international Conference on Computational Aspects of Social Networks (CASoN)*, Porto, Portugal, 2014. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6920423>, [DOI]. 10.1109/CASoN.2014.6920423
- [26] F. Sforza, "Communications system US Patent ," US8406275, Marzo 26, 2013.
- [27] Nitin Naik, "LPWAN Technologies for IoT Systems: Choice Between Ultra Narrow Band and Spread Spectrum," in *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, Roma, Italia, 2018. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8544414>, [DOI]. 10.1109/SysEng.2018.8544414
- [28] datasheet SX1276. Mouser. [Online]. <https://www.mouser.com/ds/2/761/sx1276-944191.pdf>
- [29] Gateway Datasheet. Cisco. [Online]. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/se/internet-of-things/datasheet-c78-737307.html>
- [30] Semtech Corporation, "AN1200.22 Lora Modulation Basics," 2015. [Online]. <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>
- [31] Keith E Nolan, Wael Guibene, and Mark Y. Kelly, "An evaluation of low power wide area network technologies for the Internet of Things," in *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Paphos, Cyprus, 2016. [Online]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7577098/>, [DOI]. 10.1109/IWCMC.2016.7577098
- [32] Semtech Corporation, "Note AN1200.13, "SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem Designer's Guide",". [Online]. <https://www.semtech.com/uploads/documents/LoraDesignGuide STD.pdf>
- [33] O.B. Seller and N Sornin, "Low Power Long Range Transmitter US Patent," 9,252,834, Febrero 2, 2016.
- [34] Umber Noreen, Ahc`ene Bounceur, and Laurent Clavier, "A Study of LoRa Low Power and Wide Area," in *3rd International Conference on Advanced Technologies*, Fez, Marruecos, 2017. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8075570>, [DOI]. 10.1109/ATSIP.2017.8075570
- [35] lora-alliance.org. [Online]. <https://lora-alliance.org/>
- [36] Lorenzo Vangelista, Andrea Zanella, and Michele Zorzi, "Long-Range IoT Technologies: The Dawn of LoRa," in *Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures: First International Conference, FABULOUS 2015*, Ohrid, Republica de Macedonia, 2015, pp. 51-58. [Online]. https://www.researchgate.net/publication/300111853_Long-Range_IoT_Technologies_The_Dawn_of_LoRa
- [37] N.SORNIN, "LoRaWAN™ 1.1 Specification," 2017. [Online]. https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_v1.1.pdf

- [38] LoraAlliance Work Group, "A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™," 2015. [Online]. <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>
- [39] Cristian Yamiith Burbano Ordoñez, "Implementación de una Red de Sensores Inalámbricos LPWAN Mediante Módulos LoRa para el Monitoreo de la Calidad del Agua en 2 Ríos," *Repositorio Universidad Distrital Francisco de de Caldas*, July 2017. [Online]. <http://hdl.handle.net/11349/6433>
- [40] LoRa Alliance, "LoRaWAN Security Full End-to-End Encryption for IoT Application Providers," 2017. [Online]. https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lora_alliance_security_whitepaper.pdf
- [41] China Energy Engineering Corporation (CEEC). (2019, Apr.) CEEC. [Online]. http://en.ceec.net.cn/art/2019/4/4/art_138_1872678.html
- [42] Iven Mareels et al., "On making energy demand and network constraints compatible in the last mile of the power grid," *Annual Reviews in Control*, vol. 38, no. 2, pp. 243-258, 2014. [Online]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578814000418>, [DOI]. 10.1049/PBRN006E_ch2
- [43] Jun Zou, Hai Yu, Weiwei Miao, and Chengling Jiang, "Packet-Based Preamble Design for Random Access in Massive IoT Communication Systems," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 11759 - 11767, 2017. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7954579>, [DOI]. 10.1109/ACCESS.2017.2717818
- [44] Li Da Xu, Wu He, and Shancang Li, "Internet of Things in Industries: A Survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233 - 2243, 2014. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6714496>, [DOI]. 10.1109/TII.2014.2300753
- [45] Jorge Navarro-Ortiz, Sandra Sendra, Pablo Ameigeiras, and Juan M. Lopez-Soler, "Integration of LoRaWAN and 4G/5G for the Industrial Internet of Things," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 2, pp. 60-67, Feb. 2018. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8291115>, [DOI]. 10.1109/MCOM.2018.1700625
- [46] Samaneh Movassaghi, Mehran Abolhasan, Justin Lipman, David Smith, and Abbas Jamalipour, "Wireless Body Area Networks: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1658 - 1686, 2014. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6710228>, [DOI]. 10.1109/SURV.2013.121313.00064
- [47] Tallal Elshabrawy and Joerg Robert, "Capacity Planning of LoRa Networks With Joint Noise-Limited and Interference-Limited Coverage Considerations," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 11, pp. 4340 - 4348, 2019. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8633860>, [DOI]. 10.1109/JSEN.2019.2897156
- [48] Thiemo Voigt, Martin Bor, Utz Roedig, and Juan Alonso. (2016, Nov.) Mitigating Inter-network Interference in LoRa Networks. [Online]. <https://arxiv.org/abs/1611.00688>
- [49] Aamir Mahmood et al., "Scalability Analysis of a LoRa Network Under Imperfect Orthogonality," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 3, pp. 1425 - 1436, 2019. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8430542>, [DOI]. 10.1109/TII.2018.2864681
- [50] Semtech Corporation, "Note AN1200.17, "SX1272/3/6/7/8: LoRa Energy Consumption Design",". [Online]. https://www.semtech.com/uploads/documents/LoraLowEnergyDesign_STD.pdf
- [51] Jin-Taek Lim and Youngnam Han, "Spreading Factor Allocation for Massive Connectivity in LoRa Systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 800 - 803, Apr. 2018. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8268120>, [DOI]. 10.1109/LCOMM.2018.2797274
- [52] Marianela Del Cisne Carrión González, "Desarrollo De Una Pasarela LORA y Evaluación de Prestaciones," *UPV*, May 2017. [Online]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/91597>
- [53] Pierre Neumann, Julien Montavont, and Thomas Noël, "Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study," in *2016 IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, New York, 2016. [Online]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7763213>, [DOI]. 10.1109/WIMOB.2016.7763213