



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, OPCIÓN
INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

Tesis para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN LPWAN”

Presenta:

Lic. Daniel Hernández Rodríguez*

Asesora:

Dra. Josefina Castañeda Camacho

Co-Asesores:

Dr. Víctor Rodolfo González Díaz

M.C. V. Yair Ponce Hiestroza

Tabla de Contenido

Abreviaciones, siglas y acrónimos	8
Resumen	11
Introducción.....	13
Objetivos.....	16
Objetivo General	16
Objetivos Particulares	16
Justificación	17
Descripción.....	17
Organización de la tesis	19
1. Introducción a los sistemas de transmisión LPWAN.....	20
1.1 Redes LPWAN.....	20
1.2 Importancia de las redes LPWAN.....	22
1.3 Implementaciones y limitaciones actuales de las redes LPWAN.....	25

2. Estructura LPWAN	28
2.1 Estándares LPWAN	28
2.2 Tecnologías LPWAN	30
2.2.1 Sigfox	32
2.2.2 LoRa	33
2.2.3 NB – IOT	35
2.3 Términos de los parámetros de calidad del IoT	36
3. Diseño de una red LPWAN	38
3.1 LoRaWAN	38
3.1.1 Formato de paquete de datos	40
3.1.2 Tiempo en el aire	41
3.2 Modulación de LoRaWAN	44
4. Parámetros de análisis de calidad de una red	47
4.1 Pérdidas de propagación	47
4.2 Probabilidad de pérdida de enlace mediante modelo Log – Distance	48
4.3 Modelo Okumura – Hata	52
4.4 Relación señal a ruido	55
5. Resultados	56
5.1 Simulación de la modulación <i>chirp</i>	58
5.2 Datos obtenidos	65
5.3 Simulación de la potencia recibida	67

Conclusiones y trabajo a futuro	73
Bibliografía	76
Apéndices.....	81
A. Simulaciones en MATLAB	81
A.1 Código 1: Creación de las señales	81
A.2 Código 2: Pérdidas por propagación para el modelo Okumura – Hata.....	82
A.3 Código 3: Pérdidas por propagación para el modelo Log – Distance	83
Anexos	84
A. Publicaciones	84
Anexo A: Artículo 1	85
Anexo A: Artículo 2	91
Anexo A: Artículo 3	100
B. Conferencia	101

Índice de Figuras

Fig. 1 Comparación de tecnologías de comunicación.....	21
Fig. 2 Crecimiento de los dispositivos IoT entre el 2015 y el 2025.....	23
Fig. 3 Crecimiento del mercado global para LPWAN entre los años 2017 y 2023....	24
Fig. 4 Estándares LPWAN y las empresas que los desarrollan.	29
Fig. 5 Tecnologías emergentes LPWAN.	30
Fig. 6 Protocolo de comunicación de SigFox.	33
Fig. 7 Protocolo de comunicación de LoRaWAN.	34
Fig. 8 Protocolo de comunicación de NB-IoT.....	35
Fig. 9 Arquitectura de una red LoRa.....	39
Fig. 10 Downlink y uplink entre end node y gateway en esquema half - duplex.....	40
Fig. 11 Modo encabezado explícito	41
Fig. 12 Modo encabezado implícito.....	41
Fig. 13 Esquema que representa el ToA de una transmisión de datos	41
Fig. 14 Ejemplo de preámbulo de la comunicación LoRaWAN.....	43
Fig. 15 Representación de la sincronización mediante el preámbulo para la comunicación LoRaWAN.....	43
Fig. 16 Ejemplo de Upchirp y Downchirp, gráficas de tiempo vs amplitud	44
Fig. 17 Diagrama de bloques del transceptor LoRa.....	46
Fig. 18 Esquema de la distancia entre la antena y el end device.....	48
Fig. 19 Región de celdas hexagonales.	51
Fig. 20 Ambiente de simulación 3D.....	51
Fig. 21 Diagrama de flujo de la simulación del cálculo de la probabilidad de pérdida de enlace de comunicación.	52
Fig. 22 Ilustración de los parámetros usados en el modelo Okumura - Hata	54

Fig. 23 Gráficas de la frecuencia instantánea y la señal de upchirp	58
Fig. 24 Gráficas de la frecuencia instantánea y señal del símbolo LoRa enviado.....	59
Fig. 25 Gráficas de la frecuencia instantánea y la señal enviada.....	60
Fig. 26 Gráficas de la frecuencia instantánea y la señal de downchirp.....	61
Fig. 27 Gráfica de la señal con las inferencias vs tiempo.....	62
Fig. 28 Gráficas de la frecuencia instantánea y la señal dechirped.....	63
Fig. 29 Espectrograma de los símbolos enviados	64
Fig. 30 Espectrograma de las señales chirp enviadas.....	64
Fig. 31 Señales enviadas para los símbolos 0, 60 y 120 con un factor de dispersión de 8.	65
Fig. 32 Usuarios generados aleatoriamente, en rojo se marca la zona de 60° abarcada por la antena.	67
Fig. 33 Gráficas de distancia en metros vs potencia en watts para los usuarios fijos y móviles de la simulación para el modelo log - distance.....	69
Fig. 34 Gráficas de distancia en metros vs potencia en watts para los usuarios fijos y móviles de la simulación para el modelo Okumura - Hata.	69
Fig. 35 Potencia recibida para Log - Distance y Okumura - Hata para usuarios móviles en un radio de 100 metros.....	70
Fig. 36 Potencia recibida para Log - Distance y Okumura - Hata para usuarios móviles en un radio de 1000 metros.....	70

Índice de Tablas

Tabla 1 Comparación de las tecnologías LPWAN: Sigfox, LoRaWAN y NB – IoT.	14
Tabla 2 Comparación de las tecnologías LPWAN (Sigfox, LoRa y NB – IoT).....	31
Tabla 3 Rangos abarcados por la tecnología LoRa en diferentes ambientes.	39
Tabla 4 Parámetros usados para el cálculo del tiempo de envío de la carga útil.....	42
Tabla 5 Parámetros mínimos y máximos del modelo Okumura - Hata.....	55
Tabla 6 Parámetros modificables en la simulación	56
Tabla 7 Porcentaje de recepción exitosa y SNR promedio para diferentes desviaciones estándar y factores de dispersión.	66
Tabla 8 Resultados obtenidos para LoRaWAN mediante log - distance.....	71
Tabla 9 Resultados obtenidos para LoRaWAN mediante Okumura - Hata.....	72

Abreviaciones, siglas y acrónimos

3GPP: 3rd Generation Partnership Project / Proyecto Asociación Tercera Generación

ARIB: Association of Radio Industries and Businesses / Asociación de Industrias y Negocios de Radio

BPSK: Binary Phase Shift Keying / Modulación por desplazamiento de fase binaria

CCSA: China Communications Standards Association / Asociación de Estándares de Comunicaciones de China

CRC: Cyclic Redundancy Check / Verificación de redundancia cíclica

CSS: Chirp Spread Spectrum / Chirrido de Espectro Ensanchado

DBPSK: Differential Binary Phase Shift Keying / Modulación por Desplazamiento de Fase Binario Diferencial

ETSI: European Telecommunication Standards Institute / Instituto de Estándares Europeos de Telecomunicaciones

FDMA: Frequency Division Multiple Access / Acceso múltiple por división de frecuencia

FSCM: Frequency Shift Chirp Modulation / Modulación por desplazamiento de frecuencia de chirrido

GFSK: Gaussian Frequency Shift Keying / Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana

GSM: Global System for Mobile communications / Sistema global para las comunicaciones móviles

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers / Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

IETF: Internet Engineering Task Force / Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet

IoT: Internet of Things / Internet de las Cosas

ISM: Industrial Scientific and Medical / Industrial Científico y Médico

LoRa: Long Range / Rango amplio

LoRaWAN: Long Range Wide Area Network / Red de largo alcance y rango amplio

LPWAN: Low Power Wide Area Network / Red de baja potencia y largo alcance

M2M: Machine to Machine / Máquina a máquina

LTE

MAC: Media Access / Acceso de medios

de parte de 3GPP

NB-IoT: Narrow Band – Internet of Things / Banda estrecha – Internet de las Cosas

NFC: Near Field Communication / Comunicación de Campo Cercano

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access / Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales

RFID: Radio Frequency Identification / Identificación por Radiofrecuencia

RSSI: Received Signal Strength Indicator / Indicador de fuerza de la señal recibida

SNR: Signal – to – Noise Ratio / Relación Señal a Ruido

TDOA: Time Difference of Arrival / Diferencia en Tiempo de llegada

ToA: Time on Air / Tiempo en el Aire

TSDSI: Telecommunications Standards Development Society, India / Sociedad Desarrolladora de Estándares de Telecomunicaciones, India

TTA: Telecommunications Technology Association / Asociación de Tecnología de Telecomunicaciones

TTC: Telecommunication Technology Committee

Ubicación / Comité de Tecnologías de Telecomunicaciones

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying / Modulación por desplazamiento de fase

UNB: Ultra Narrow Band / Banda ultra estrecha

WSN: Wireless Sensor Networks / Redes de sensores inalámbricos

Resumen

Este trabajo presenta el planteamiento y el diseño de un sistema de transmisión para redes LPWAN; se especifica la elección de uso de tecnología y se describe el proceso de creación de una herramienta de simulación para generar la señal que será modulada, la cual incluye, el transmisor y el receptor, así como funciones para calcular factores de interés para el análisis de la red.

Se muestran además las tecnologías más utilizadas en LPWAN, indicando las ventajas y desventajas que tiene cada una; las cuales a su vez centran su campo de aplicación en sistemas específicos que pueden ser determinados por ubicación (rural o urbana), dependencia del consumo energético (requieren o no tener una fuente de alimentación conectada permanentemente) y costo (el cual determinará la infraestructura y limitaciones de ancho de banda, además de la seguridad derivada de la robustez que se puede ofrecer en caso de que sean bandas gratuitas o de pago).

Se realiza un estudio del estado del arte para comprender los alcances, beneficios y limitaciones de lo que se ha publicado, modelado, simulado e implementado en torno a esta tecnología por diferentes autores, con el objetivo de proponer mejoras a las propuestas actuales mediante la herramienta de simulación realizada en este trabajo.

A lo largo del trabajo se describen las ecuaciones que representan de forma matemática los procesos físicos involucrados en la transmisión y recepción de señales

inalámbricas, tales como señales portadoras de la modulación, generación de ruido blanco, interferencias, pérdida por propagación, entre otros.

Finalmente se muestran los resultados obtenidos mediante la herramienta de análisis desarrollada en el software MATLAB con el objetivo de compararlos con lo reportado en la literatura para validar su funcionamiento en torno a modelar y simular la tecnología LPWAN, en particular LoRaWAN.

Introducción

En el área de redes, la tecnología ha crecido de manera exponencial en los últimos años, se pronosticaba que en el 2020 más de 20 mil millones de dispositivos estuvieran conectados mediante comunicaciones de radio, mientras que para finales de 2022 se espera que alrededor de 29 mil millones de dispositivos estén conectados a Internet y para el 2030 este número crecerá hasta alcanzar los 125 mil millones esta situación ha obligado a redefinir la manera de diseñar y administrar los sistemas de comunicación debido a que las tecnologías celulares como 2G, 3G y 4G implican un alto consumo de energía, lo cual disminuye su autonomía limitando las aplicaciones en las que pueden ser implementadas y el número de suscriptores que pueden ser atendidos [1-3].

Las redes de largo alcance y baja potencia o como se conocen en inglés *Low Power Wide Area Networks* (LPWAN) surgen como una solución a estos problemas debido a características fundamentales como el alcance que pueden abarcar, el cual va de 10 a 40 km en zonas rurales y de 1 a 5 km en zonas urbanas, además de su bajo costo que optimiza su escalabilidad [1], [2].

Las redes LPWAN se pueden considerar como una evolución de las *Wireless Sensor Networks* (WSN) o Redes de Sensores Inalámbricas para aplicaciones de Internet de las Cosas y 5G [2].

Existen múltiples compañías desarrollando estándares de LPWAN, entre ellas se encuentran: IEEE, ETSI, 3GPP, IETF y LoRa Alliance; a su vez, hay tres tecnologías líderes en el uso de LPWAN, las cuales son: SigFox, LoRa y NB-IoT. Todas ellas ofrecen soluciones eficientes para conectar dispositivos inteligentes y autónomos y sus principales propiedades se muestran en la Tabla 1 [5-6].

Tabla 1 Comparación de las tecnologías LPWAN: Sigfox, LoRaWAN y NB - IoT. Obtenida de [3].

	Sigfox	LoRaWAN	NB - IoT
Banda	Europa: 868 MHz Norteamérica: 902 MHz	Europa: 433 y 868 MHz Norteamérica: 915 MHz	LTE con licencia
Ancho de banda	100 Hz	125 – 500 kHz	180 kHz
Modulación	UL: UNB DBPSK DL: GFSK	LoRa	BPSK / QPSK
Tasa de datos	UL: 100 bps DL: 600 bps	300 bps – 37.5 kbps	UL: 20 kbps DL: 250 bps
Carga útil máxima	UL: 12 bytes DL: 8 bytes	250 bytes	125 bytes
MAC	ALOHA	LoRaWAN	UL: SC – FDMA DL: OFDMA
Topología	Estrella	Estrella	Red celular

Cuando se diseña un sistema LPWAN es necesario considerar las características y necesidades propias de la tecnología, las cuales pueden dividirse en las siguientes categorías:

- Características de tráfico.
- Capacidad y densificación.
- Eficiencia de energía.

- Cobertura.
- Ubicación.
- Seguridad y privacidad.
- Costo.
- Complejidad del hardware.

Para cada sistema, en función de la aplicación final se tendrá que decidir la prioridad que tendrá cada una de estas categorías, a las cuales se les conocerá como consideraciones de diseño, esto se debe a que en ciertas aplicaciones se requiere la optimización de características específicas [4].

LPWAN jugará un papel importante en las aplicaciones del Internet de las Cosas o como es conocido en inglés *Internet of Things* (IoT), gracias a esto, su rango de implementación es extenso ya que puede ser utilizado en sistemas de monitoreo de infraestructura, seguridad, casas inteligentes, salud, tráfico inteligente, entre otros; por otro lado, también puede ser implementado en los sistemas de redes de cuarta generación (4G) e incluso en los de quinta generación (5G) [5].

Por esto, se propone diseñar, evaluar, simular y validar un sistema de transmisión LPWAN que cumpla con las normas, estándares y especificaciones que regulan esta tecnología y que, a su vez, pueda ser aplicado a un entorno 5G.

Objetivos

Objetivo General

- Diseñar un sistema de transmisión LPWAN que se ajuste a los requerimientos del entorno 5G.

Objetivos Particulares

1. Investigar y definir los principios de operación de las redes LPWAN en función de las normas que las regulan.
2. Definir la estrategia de diseño y el modelo matemático de la red LPWAN para evaluar el ancho de banda, tiempo de latencia de los paquetes, velocidades de transmisión de las redes heterogéneas y ultradensas en un entorno 5G.
3. Diseñar una herramienta de análisis a través de una simulación que permita evaluar la red LPWAN en términos de las métricas de calidad.
4. A partir del diagrama de bloques del sistema de transmisión hacer una propuesta de simulación para su futura integración.
5. Evaluar el desempeño de una red LPWAN incluyendo la modulación *Chirp Spread Spectrum* y las implicaciones a nivel interferencia cuando múltiples dispositivos operan dentro de ella.
6. Validar los parámetros de calidad de las simulaciones comparándolas contra lo reportado en la literatura.

Justificación

La evolución de las redes móviles de comunicación nunca se detiene y por esto es importante crear sistemas que se adapten a las nuevas tecnologías y que aprovechen las ventajas que éstas nos ofrecen, en este caso se hará uso de las redes 5G que actualmente representan la última tecnología de transmisión de información; para diseñar un sistema que permita la transmisión de datos mediante LPWAN, considerando los estándares y protocolos que lo conforman.

La tecnología de redes se puede dividir respecto a su alcance, siendo esta clasificación: RFID y NFC de contacto próximo (0 a 10 metros), Bluetooth y ZigBee de corto alcance (10 a 100 metros), IEEE802.11 y Super Wi-Fi de corto/medio alcance (100 a 1000 metros), ZigBee NAN, 3G, 4G y Wi-SUN de medio alcance (hasta 10 kilómetros) y finalmente las redes LPWAN como SigFox, LoRa, NB-IoT e IEEE 802.15.4k/g de largo alcance (más de 100 kilómetros); gracias a esto, con LPWAN se puede crear un sistema que abarque un rango amplio [4], [6].

Al diseñar un sistema LPWAN dentro de ambientes 5G se abre la posibilidad de aplicarlo en diversas áreas. Actualmente, existen diferentes publicaciones con propuestas, diseños e implementaciones de proyectos que utilizan esta tecnología para aplicaciones de monitoreo del aire, plataformas de rastreo, monitoreo de agua, de redes de distribución de energía, entre otras [9-12].

Descripción

El presente trabajo revisa el estado del arte de las redes LPWAN, así como las normas que las regulan, de esta forma se definirán los principios de operación, protocolos, estándares y especificaciones que serán tomados en cuenta. Se estudian los

modelos de capas de las redes de baja potencia para largo alcance, así como su topología y arquitectura. Se investiga sobre las opciones de tecnologías patentadas y las que están basadas en estándares.

Se analizan las distintas propuestas de soluciones de parte de los proveedores como son IEEE, ETSI, 3GPP, LoRa, entre otros, enfocados en ambientes 5G e IoT para posteriormente definir la estrategia a seguir para diseñar una red LPWAN que funcione en estos entornos.

Se crea una estrategia para evaluar la red LPWAN a partir de un modelo matemático considerando las características principales de las redes presentadas en la introducción y se diseña una plataforma de simulación que permite evaluar la red LPWAN creada en términos de sus métricas de calidad, considerando su cobertura, efectividad respecto al costo, capacidad y densificación, escalabilidad, entre otros, para de esta forma validar los resultados comparando con la información investigada y recopilada de la literatura.

Se diseña una propuesta de simulación para la futura integración del sistema, posteriormente se evalúa el desempeño de la red incluyendo la modulación *Chirp Spread Spectrum* y las implicaciones a nivel interferencia cuando múltiples dispositivos operan dentro de ella.

En este trabajo se presenta inicialmente una introducción a los sistemas de transmisión de LPWAN donde se describen las características principales de este tipo de redes, los estándares y compañías enfocadas en el desarrollo de esta tecnología y los parámetros de calidad que se consideran en el diseño de redes LPWAN, posteriormente se describe el proceso del diseño de la red LPWAN donde se profundiza en la tecnología elegida, el formato del paquete de datos, modelos de pérdidas por propagación *Log –*

Distance y *Okumura – Hata*, definiciones matemáticas para el cálculo de la probabilidad de pérdida de enlace y la relación señal a ruido. Finalmente se presentan los resultados obtenidos de la modulación, pérdidas por ruido y propagación, tiempo en el aire y potencia de la señal recibida mediante nuestra herramienta de simulación, así como su comprobación mediante una comparación con lo reportado en la literatura. Finalmente se dan a conocer las conclusiones determinadas en la realización del presente trabajo, así como las propuestas para continuar con este tema en trabajos a futuro.

Organización de la tesis

En el Capítulo 1 se presenta una introducción a la tecnología LPWAN, sus principales características, la importancia de su implementación en los paradigmas actuales de las tecnologías de comunicación inalámbrica y los alcances, aportes y limitaciones encontradas en la literatura publicada.

En el Capítulo 2 se profundiza en las principales empresas, estándares y tecnologías de las redes LPWAN, así como las semejanzas y particularidades de cada una de ellas.

En los Capítulos 3 y 4 se hace un estudio del diseño de la red, así como los detalles de la implementación realizada en este trabajo, los parámetros analizados y la explicación de la importancia de cada uno.

En el Capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos mediante la herramienta de simulación desarrollada

Por último, se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro.

Capítulo 1

Introducción a los sistemas de transmisión LPWAN

En este capítulo se presentan las redes LPWAN, sus principales usos, características y en qué tipo de aplicaciones pueden ser implementadas, además se justifica la importancia de este tipo de tecnología debido al crecimiento que ha tenido el tamaño del mercado en los últimos años, finalmente se realiza un análisis de algunos de los artículos y trabajos publicados, así como sus alcances y problemáticas o limitaciones.

1.1 Redes LPWAN

Las aplicaciones enfocadas al IoT regularmente involucran sensores con requisitos específicos como largo alcance, baja velocidad de datos y bajo consumo de energía, sin embargo, gran parte de las tecnologías utilizadas como ZigBee o Bluetooth no están adaptadas para escenarios que requieren de largo alcance [7]; además las soluciones basadas en comunicaciones celulares como 2G, 3G y 4G sacrifican el

consumo energético a cambio de aumentar su cobertura, lo cual, a su vez implica un problema para aplicaciones como monitoreo en zonas agrícolas donde no se puede tener acceso a fuentes de alimentación; es por esto que surge una tecnología de comunicación inalámbrica conocida como red LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) cuyo objetivo es satisfacer estos requerimientos de diseño [6].

En la Fig. 1 se observa una gráfica comparativa basada en la tasa de transmisión de datos y el rango que manejan diferentes tecnologías de comunicación inalámbrica, donde se puede corroborar que LPWAN está ubicado en las redes de largo alcance y que a su vez transmite una baja tasa de transmisión de datos, lo cual reduce el consumo energético [1].

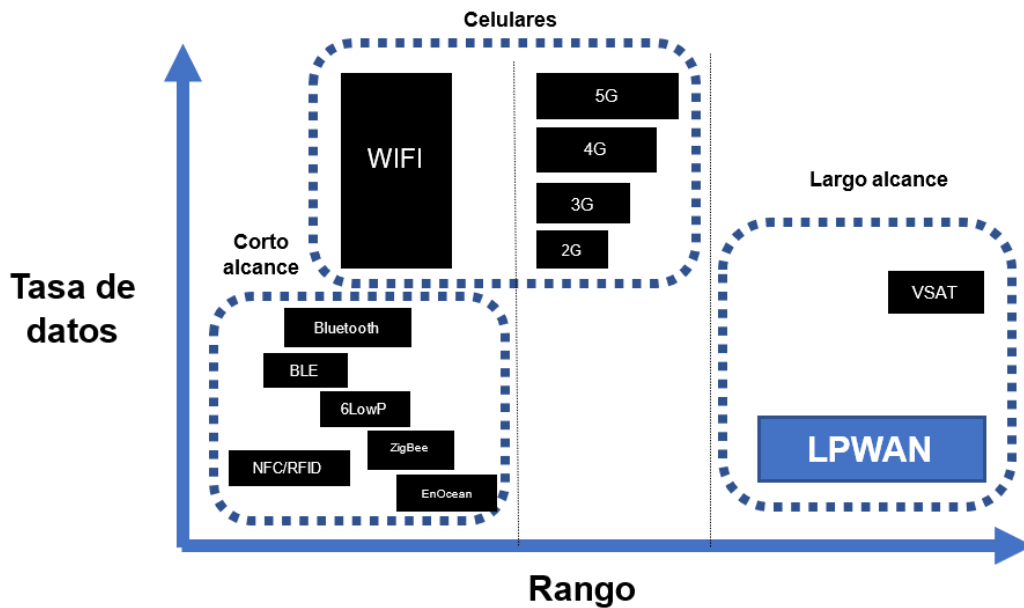


Fig. 1 Comparación de tecnologías de comunicación

Gracias a las características de las redes LPWAN estas pueden ser usadas para aplicaciones como: [8-10]

- Utilidades inteligentes.
- Salud e higiene.
- Seguridad.
- Eficiencia.
- Agricultura.

La mayoría de los diseños de LPWAN publicados son usados en implementaciones de monitoreo de sistemas tales como Monitoreo de sistemas de aire o diseño de un robot de monitoreo de agua de río; así como implementaciones con usuarios móviles tales como rastreo de plataformas de experimentos. Además, existen implementaciones donde se utiliza más de una tecnología LPWAN realizando soluciones mixtas para aplicaciones como monitoreo en tiempo real de la potencia de distribución de redes [11-14].

1.2 Importancia de las redes LPWAN

Una de las áreas de implementación más factibles para la tecnología LPWAN es el Internet de las Cosas, y éste a su vez, tiene el potencial para mejorar la calidad de los servicios ofrecidos por diversas empresas permitiendo aprovechar sus características principales para interconectar a una gran cantidad de personas mediante dispositivos inteligentes, mayor tasa de transferencia de datos, eficientizar el uso de ancho de banda e incrementar las capacidades de seguridad en el receptor. Gracias a esto los dispositivos interconectados han aumentado y se espera que en el 2025 sean alrededor de 75.44 miles de millones, tal como se muestra en la Fig. 2.

Las aplicaciones del IoT abarcan salud inteligente, transportación inteligente, agricultura inteligente, operaciones de rescate, logística, ciudades inteligentes, industria, edificios inteligentes, electrónica de consumo, seguridad, rastreo, entre otros. Es por esto, que es importante que la tecnología desarrollada sea capaz de cumplir con los requerimientos del Internet de las Cosas, con el objetivo de poder ser implementada de manera eficiente [15].

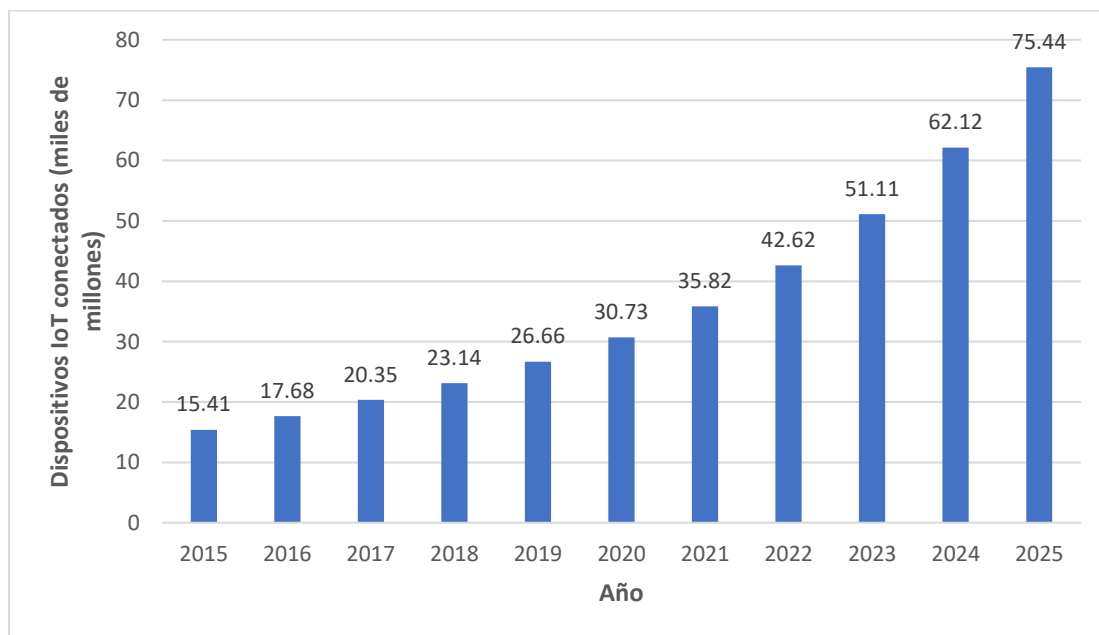


Fig. 2 Crecimiento de los dispositivos IoT entre el 2015 y el 2025

Debido a las características de las redes LPWAN su implementación puede ser utilizada no solo en 5G sino también en IoT, gracias a esto el uso de esta tecnología ha crecido desde el 2017, lo cual, a su vez, genera que las herramientas de análisis para el óptimo desempeño de las simulaciones e implementaciones generadas con esta tecnología sean de suma importancia. En la Fig. 3 se observa que entre los años 2017 y 2023 la tasa de crecimiento anual compuesto o (CAGR por sus siglas en inglés) es del 109%, es decir, el crecimiento es muy acelerado [16].

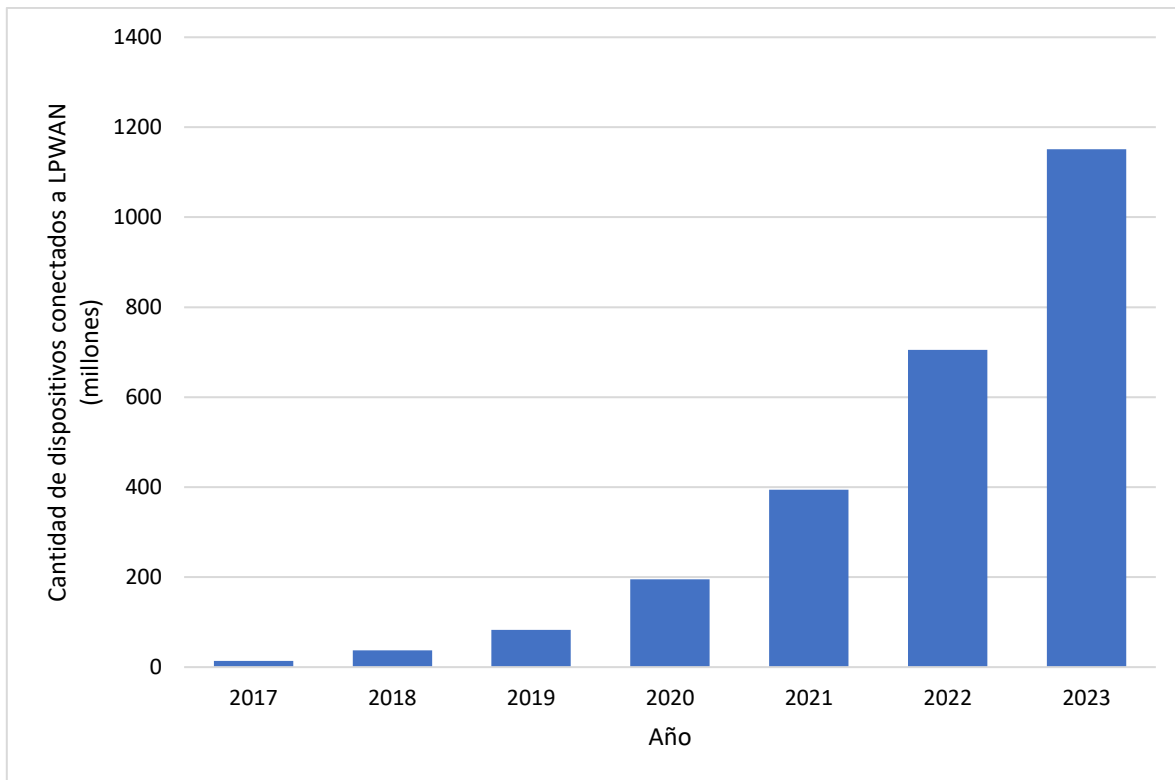


Fig. 3 Crecimiento del mercado global para LPWAN entre los años 2017 y 2023

Debido al aumento de dispositivos, el gasto anual sobrepasará los 4.5 miles de millones de dólares para el 2023.

El estudio de mercado se llevó a cabo incluyendo 9 segmentos industriales en todo el mundo, los cuales son:

- Agricultura y silvicultura
- Construcción e infraestructura
- Salud
- Hogar y consumo
- Industria

- Ventas
- Ciudades inteligentes
- Transporte, cadena de distribución y logística
- Utilidades

Se consultaron más de 150 compañías (entre ellas AT&T, China Mobile, Cisco, Ericsson, Huawei Technologies, Ingenu, Microchip, NXP, Nokia, NXP, Qualcomm y Samsung), se entrevistaron más de 40 industrias, se utilizó información de más de 10 conferencias con expertos en el área en 5 regiones diferentes. Se analizaron las 7 principales tecnologías LPWAN: Sigfox, LoRa, RPMA, Weightless, LTE-M y EC-GSM). Durante el estudio se demostró que Asia del Pacífico es la región líder en adaptabilidad a tecnologías LPWAN [17].

1.3 Implementaciones y limitaciones actuales de las redes LPWAN

A pesar de las ventajas que ofrecen las redes LPWAN es importante considerar que al ser una tecnología reciente y en desarrollo la información referente a sus especificaciones de implementación es limitada, en general, solo una pequeña parte de las publicaciones relacionadas incluyen detalles sobre implementación, la mayoría de ellos permanecen en una etapa de análisis o propuesta.

Una de las principales tecnologías LPWAN utilizada es LoRaWAN, los diseños publicados en torno esta tecnología están enfocados en la implementación de monitoreo de sistemas debido a su tasa de transferencia de datos que va desde los 300 bps hasta

37.5 kbps, la cual es menor si se compara con otras tecnologías tales como WiFi o redes celulares, por lo tanto se reduce el campo a implementaciones que no requieran el envío de imagen, video o sonido, es decir, que se enfoque al monitoreo de sensores cuya información enviada es de menor tamaño comparada al contenido multimedia. A continuación, se presentan algunos de los trabajos actuales, así como sus alcances y limitaciones.

Existen aplicaciones como un sistema de monitoreo de la calidad de aire en ambientes IoT, donde se recolecta información recurrentemente sobre la calidad de este parámetro mediante sensores, la cual se transmite mediante LPWAN, analizándose y procesándose en la nube IoT. Este es uno de pocos trabajos en los cuales existe una implementación, sin embargo, no hay detalles sobre el hardware o software [11].

Otras propuestas de implementación solo se han quedado en fase de diseño, como un sistema de monitoreo de agua de río [12].

Uno de los principales problemas de LoRaWAN es su aplicación en dispositivos móviles, en virtud de que los resultados no son óptimos, en estos casos es conveniente un tipo diferente de tecnología LPWAN como Sigfox, tal es el caso de aplicaciones para el rastreo de plataformas [13].

Las redes LoRaWAN no solo pueden ser implementadas en ambientes IoT sino en ambientes de redes 5G, ampliando el campo de utilidad de esta tecnología [5].

Los resultados publicados en su mayoría utilizan el modelo de pérdidas *Log – Distance* y reportan problemas como la reducción de la probabilidad de recibir correctamente la información en distancias mayores a 100 metros, esta situación es

contradictoria ante el hecho de que las redes LPWAN deben ser estables y permitir la comunicación en rangos del orden de kilómetros [18].

En la literatura existe poca información que facilite la implementación, ya que no se comparten las especificaciones técnicas. En este trabajo se estudia y analiza el comportamiento de las redes LPWAN, sus especificaciones, los parámetros fundamentales y diseño de su simulación. Adicionalmente, se propone una mejora en los resultados mayores a 100 metros mediante un modelo de propagación diferente al utilizado en la mayoría de las herramientas actuales como LoRaSim.

Capítulo 2

Estructura LPWAN

Conocer los principales estándares que rigen la comunicación de las tecnologías de redes inalámbricas es crucial para poder elegir la que mejor se adecúe a las necesidades específicas de cada proyecto, es por esto que en este capítulo se analizan las empresas que han desarrollado estándares para las redes LPWAN, posteriormente se hace un resumen de las principales tecnologías junto con sus principales características y los parámetros de calidad que serán de utilidad para elegir la tecnología que mejor se adapte a las necesidades.

2.1 Estándares LPWAN

Existe una gran cantidad de esfuerzos enfocados en la estandarización de LPWAN, algunas empresas como el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), el *European Telecommunications Standard Institute* (ETSI), *The Third Generation Partnership Project* (3GPP) junto con consorcios industriales como *Weightless-SIG*, *LoRa Alliance* y *Dash7 Alliance* están trabajando en esto con la finalidad de que, a largo plazo, la adopción de los estándares reduzca esta

diversificación del mercado LPWAN y a su vez permita una coexistencia entre múltiples tecnologías. En la Fig. 4 se observan los estándares con base en las compañías que los están desarrollando, las tres compañías líderes en el sector de estas redes son: IEEE, LoRa Alliance y 3GPP [19].

IEEE se está empeñando en reducir el consumo de potencia y extender el rango de sus estándares 802.15.4 y 802.11 mediante un conjunto de nuevas especificaciones para las capas físicas (PHY) y de acceso de medios (MAC) [20].

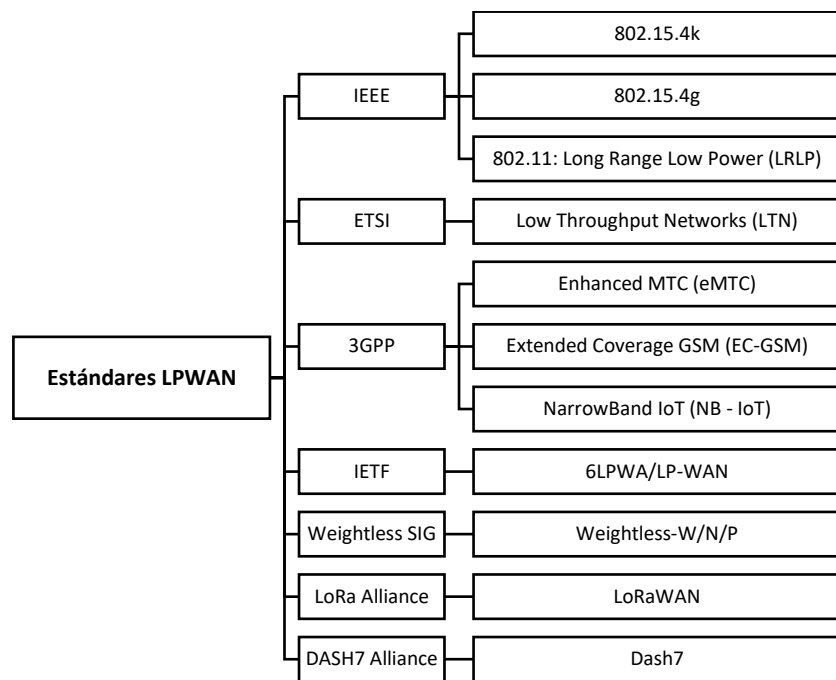


Fig. 4 Estándares LPWAN y las empresas que los desarrollan. Obtenida de [8]

LoRa Alliance es una asociación sin fines de lucro comprometido en establecer el despliegue a larga escala de las redes LPWAN para aplicaciones de IoT mediante el desarrollo y promoción del estándar abierto LoRaWAN, cuyo objetivo es, mediante la estandarización y la certificación de esquemas acreditados, lograr la interoperabilidad necesaria para que las redes LPWAN puedan escalar, haciendo de LoRaWAN la solución más utilizada a nivel mundial [21].

3rd Generation Partnership Project (Proyecto Asociación de Tercera Generación) o conocido por sus siglas 3GPP es una unión de siete organizaciones de estándares en las telecomunicaciones los cuales son ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA y TTC que provee a sus miembros un ambiente estable para producir su propia tecnología [22].

2.2 Tecnologías LPWAN

Debido al crecimiento que ha tenido LPWAN existen diversas empresas que han optado por desarrollar tecnología para este tipo de comunicación, en la Fig. 5 se muestran algunas de ellas [19].

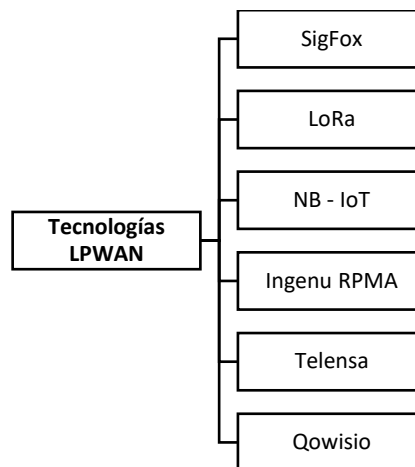


Fig. 5 Tecnologías emergentes LPWAN. Obtenida de [8].

Dentro de esta diversidad hay tres que son las que lideran el mercado, cada una de ellas se enfoca en aplicaciones específicas y se plantea la resolución de casos particulares, bajo características que satisfacen en mayor o menor medida las planteadas por LPWAN.

En la Tabla 2 se puede observar una comparativa entre cada una de estas tecnologías (Sigfox, LoRa y NB – IoT), considerando algunos datos de interés en el estudio de las telecomunicaciones [1].

Tabla 2 Comparación de las tecnologías LPWAN (Sigfox, LoRa y NB – IoT)

	SigFox	LoRa	NB-IoT
Modulación	BPSK	CSS	QPSK
Frecuencia	Bandas ISM sin licencia (868MHz en Europa, 915MHz en Norteamérica y 433MHz en Asia)	Bandas ISM sin licencia (868MHz en Europa, 915MHz en Norteamérica y 433MHz en Asia)	Banda de frecuencia LTE con licencia
Ancho de banda	100 Hz	250 kHz y 125 kHz	200 kHz
Máxima velocidad de datos	100 bps	50 kbps	200 kbps
Bidireccional	Limitado / Half - duplex	Si / Half - duplex	Si / Half - duplex
Mensajes máximos por día	140 (UL) / 4 (DL)	Ilimitado	Ilimitado
Tamaño máximo de carga útil	12 bytes (UL) / 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes
Rango	10 km (urbano) / 40km (rural)	5 km (urbano) / 20 km (rural)	1 km (urbano) / 10 km (rural)
Inmunidad a la interferencia	Muy alta	Muy alta	Baja
Autenticación y encriptación	No soportado	Si (AES 128b)	Si (encriptación LTE)
Tasa de datos adaptable	No	Si	No
Handover	End-devices no se unen a estaciones base simples	End-devices no se unen a estaciones base simples	End-devices se unen a estaciones base simples
Ubicación	Si (RSSI)	Si (TDOA)	No
Permite redes privadas	No	Si	No
Estandarización	Sigfox está colaborando con ETSI en la estandarización de las redes basadas en Sigfox	LoRa - Alliance	3GPP

A continuación, se mencionan estas tecnologías líderes junto con sus características principales.

2.2.1 Sigfox

Es una tecnología enfocada en aplicaciones que requieren una baja tasa de transferencia de información, está basada en el uso de una banda de tipo UNB (*Ultra Narrow Band*) o banda Ultra Estrecha. En la Fig. 6 se puede observar la pila del protocolo de comunicación de SigFox [23].

Sus principales características son [6]:

- Conectividad IoT basada en su propia tecnología patentada.
- Modulación en una banda ultra estrecha (100 Hz).
- Utilización de la frecuencia de manera eficiente y de tal forma que el sistema experimente poco nivel de ruido.
- Esquema *half – duplex* que implica que la comunicación *downlink* solamente puede realizarse después de la *uplink*.
- No soporta acuse de recibido (*acknowledge*).
- Cada mensaje *end – device* (dispositivo final) es transmitido por defecto tres veces sobre diferentes frecuencias.

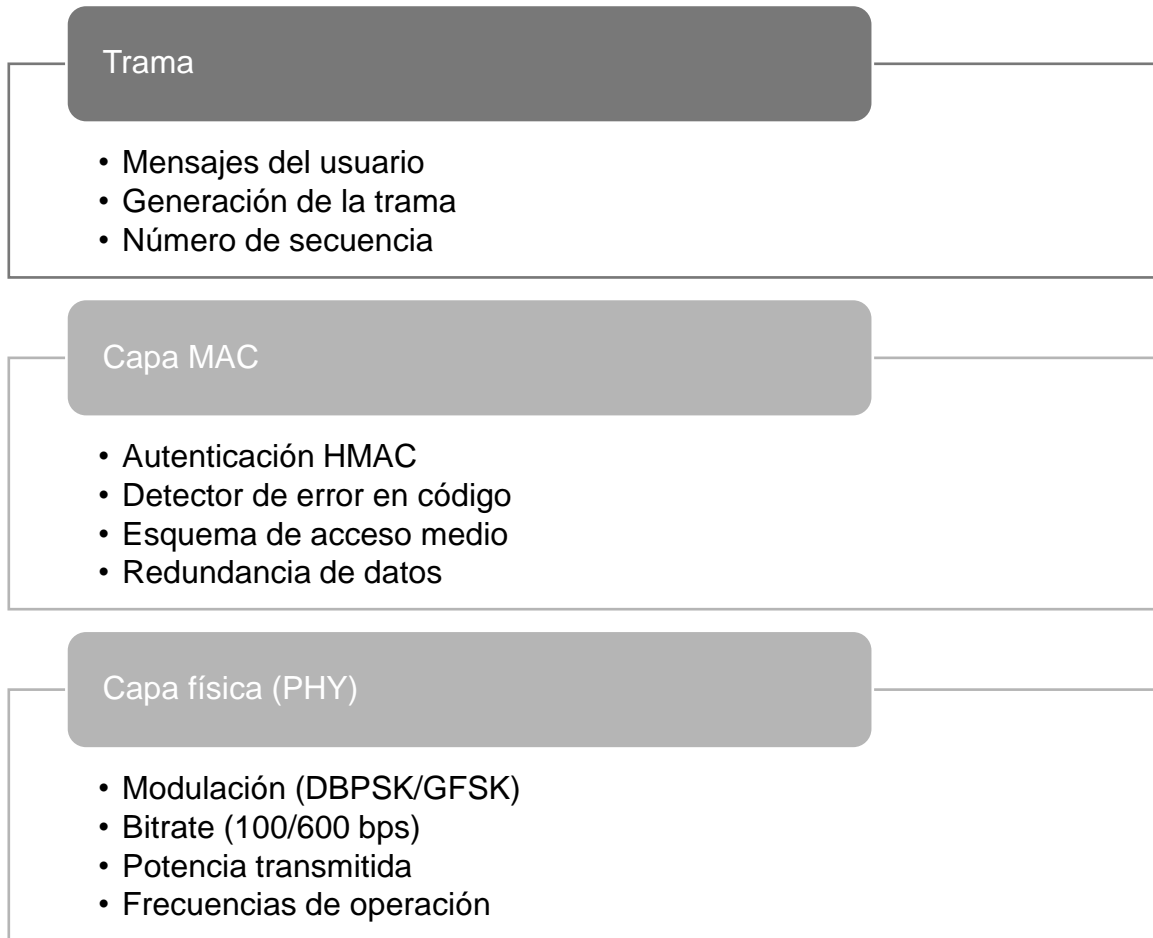


Fig. 6 Protocolo de comunicación de SigFox. Basada en [12].

2.2.2 LoRa

LoRa es una tecnología inalámbrica que ha sido enfocada en los sistemas de IoT y de *Machine-to-Machine* (M2M) debido a sus especificaciones de largo alcance y baja potencia. LoRa define la capa física mientras que LoRaWAN define la capa MAC (*Media Access Control*) de un sistema [24]. En la Fig. 7 se observa el protocolo de comunicación de LoRa donde se puede observar la capa que se asocia con LoRa (Física) y las capas que se asocian con LoRaWAN (MAC y de Aplicación) [25].

Sus características principales son [6]:

- Es una capa física que modula las señales en bandas sin licencia en el orden de sub-GHz.
- La comunicación bidireccional utiliza la modulación CSS (Chirp Spread Spectrum) para señales con bandas estrechas.
- La comunicación basada en LoRa utiliza un protocolo llamado LoRaWAN estandarizado por LoRa Alliance.
- Utiliza recepción redundante, lo que mejora el radio de recepción del mensaje, pero aumenta costo ya que requiere múltiples estaciones base.
- Provee varias clases de *end – device* para satisfacer diferentes requerimientos de las aplicaciones IoT.

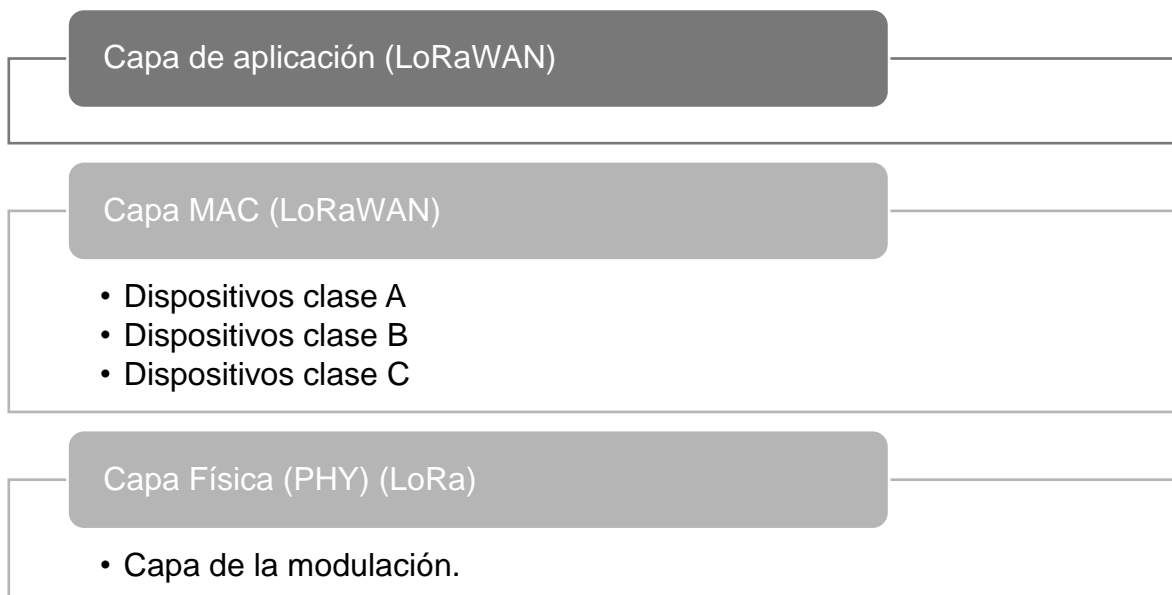


Fig. 7 Protocolo de comunicación de LoRaWAN. Basada en [14].

2.2.3 NB – IOT

NB-IoT es un sistema de banda angosta para IoT construido con las funcionalidades ya existentes de las redes LTE, motivo por el cual, es posible reutilizar el hardware e incluso compartir el espectro sin interferencias causadas por la coexistencia, lo cual implica que puede ser desplegado a un bajo costo y de manera rápida utilizando la infraestructura ya existente [26]. En la Fig. 8 se observa el protocolo de comunicación de NB-IoT.

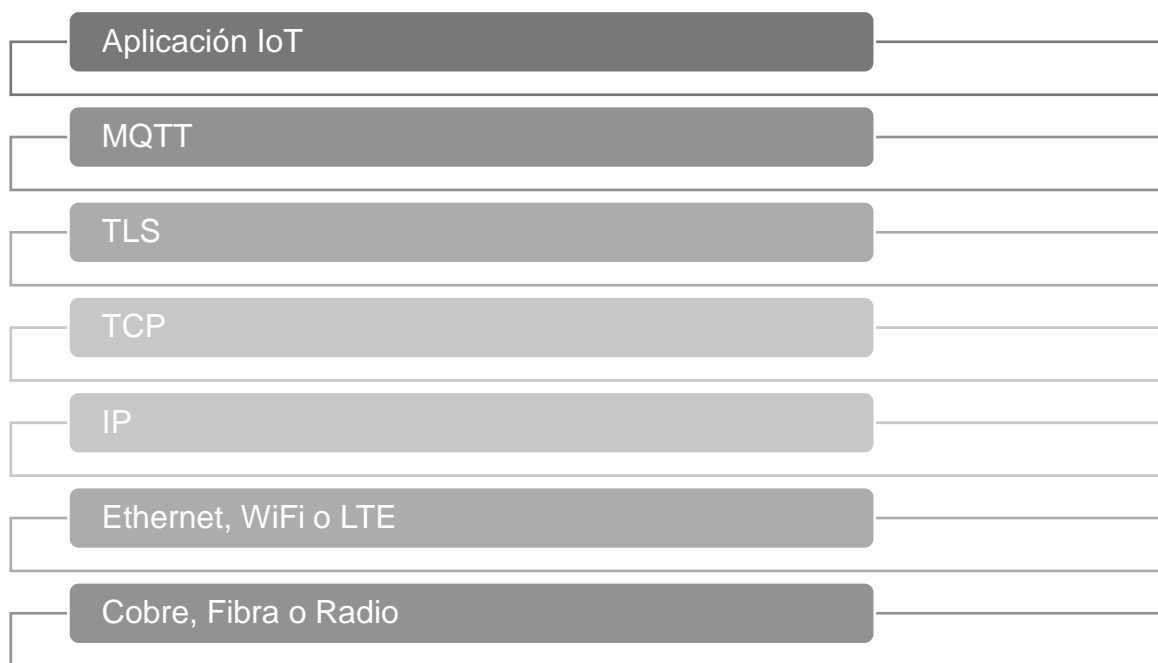


Fig. 8 Protocolo de comunicación de NB-IoT. Basada en [27].

Sus características más importantes son [6]:

- Tecnología IoT de banda estrecha que puede coexistir con GSM y LTE en bandas de frecuencia con licencia y de ancho de banda de 200 KHz.
- Diferentes modos de operación:

- Stand – alone: Posible escenario de la utilización de las frecuencias utilizadas actualmente por GSM.
- Guard – band: Utilizando los recursos no usados dentro de la guard-band de portadores LTE.
- In – band: Utilizando los bloques de recursos dentro de un portador LTE.
- 3GPP recomiendo integrarlo con las redes celulares LTE, por lo tanto, puede ser implementado con mejores de software e infraestructura existente de LTE.
- Reduce las funcionalidades del protocolo LTE a lo mínimo y las optimiza para las aplicaciones IoT.
- Puede alcanzar un tiempo de vida de las baterías de hasta 10 años transmitiendo un promedio de 200 bytes por día.

2.3 Términos de los parámetros de calidad del IoT

Es importante considerar que cada tipo de red debido a su aplicación constará de métricas que determinarán la utilidad de las tecnologías, para IoT en LPWAN las-más importantes son:

- **Calidad de servicio:** Depende del tipo de banda sobre la que se enviará la información, si es una banda sin licencia la calidad del servicio puede ser menor debido a que al ser compartida podrá recibir interferencia de otras señales e incluso disminuir su seguridad por la misma razón; para las redes que trabajan en espectros con licencia la calidad aumenta al reducir los dispositivos sobre el espectro.

- **Vida de la batería y latencia:** Dependiendo la aplicación del sistema puede ser más o menos importante el tiempo de vida de la batería, por ejemplo, en aplicaciones alejadas de las zonas urbanas, es decir, para fines agropecuarios el tiempo de vida de la batería debe ser mayor debido a que es probable que no pueda disponer de una fuente de alimentación, comparado con una aplicación en un edificio, donde tener acceso a esta fuente es más simple.
- **Escalabilidad y longitud de carga útil:** Algunas tecnologías presentan limitaciones en la cantidad de mensajes que pueden enviarse al día, es por esto que la carga útil debe aprovecharse totalmente para no desaprovechar los mensajes de *uplink*, además de que la escalabilidad va a depender de la infraestructura que ocupe la tecnología.
- **Cobertura de red y rango:** Determina la superficie que se puede cubrir con cada estación base, y cuantas estaciones deberían construirse para satisfacer la demanda de la red.
- **Modelo de despliegue:** Dependerá del nivel de madurez de la tecnología, esto implicará en cuantos países se encuentra y en caso de globalizar la tecnología como podrá abarcar la mayor cantidad de zonas a nivel mundial.
- **Costo:** Existen aplicaciones donde el costo puede ser crucial para que el sistema sea óptimo, y por lado contrario, en otras, el costo puede pasar a segundo término, es por esto, que de este factor pueden depender algunos de los otros factores, y se deberá tomar en cuenta para elegir la tecnología tanto el costo por estación como el costo por dispositivo y en el caso de las redes de espectro con licencia, el costo de ancho de banda [6].

Capítulo 3

Diseño de una red LPWAN

Considerando las capacidades y enfoques de cada una de las tecnologías se decidió trabajar con LoRaWAN de LoRa Alliance debido a que opera en bandas ISM sin licencia y la diversidad de enfoques en cuanto a sus aplicaciones se abarca tanto para entornos *Machine-to-Machine* como el Internet de las Cosas, en este capítulo se describe el proceso del diseño de la red.

3.1 LoRaWAN

LoRa (*Long Range*) Alliance es una tecnología inalámbrica desarrollada por Cycleo, la cual en 2012 fue adquirida por *Semtech Corporation*. Los estándares LoRaWAN son líderes en temas globales de IoT debido a su flexibilidad para aplicaciones estáticas y móviles, así como sus certificaciones que garantizan interoperabilidad [28].

Las redes LoRa típicas se conforman de una topología tipo estrella como se muestra en la Fig. 9 entre los *end devices* y los *gateways*, además de que puede requerirse un servidor LoRa. En esta configuración los *end devices* se comunican con los *gateways* mediante LoRaWAN y estos a su vez con el servidor LoRa [29].

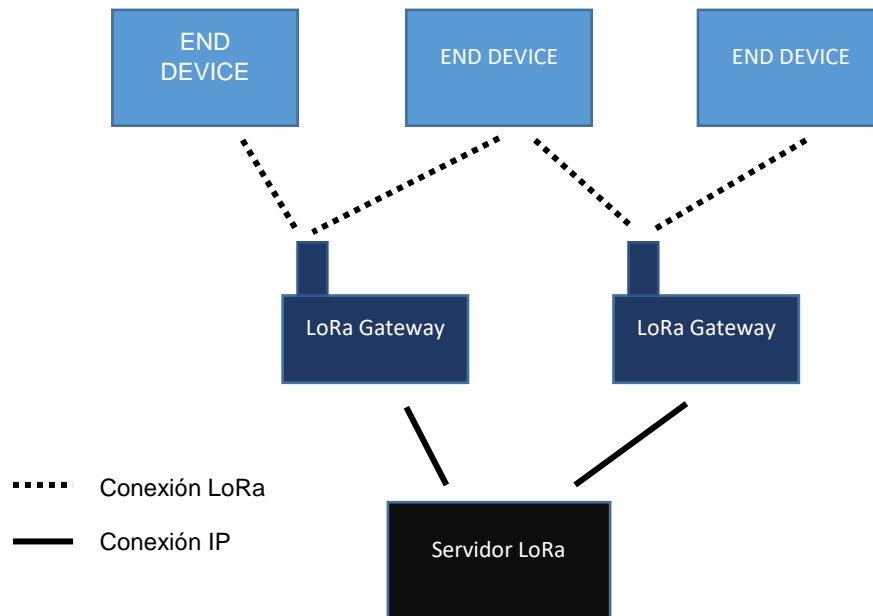


Fig. 9 Arquitectura de una red LoRa. Basada en [15].

La Tabla 3 muestra el rango que puede ser cubierto por la tecnología LoRa en diferentes ambientes.

Tabla 3 Rangos abarcados por la tecnología LoRa en diferentes ambientes.

Ambiente	Rango (km)
Áreas urbanas (edificios y ciudades)	2 – 5
Áreas rurales (campo)	5 – 15
Línea directa	> 15

Debido a que la arquitectura que utiliza la tecnología LoRaWAN es de tipo estrella la comunicación entre los *end nodes* y los *gateways* es bidireccional, es decir,

tanto el *end node* como el *gateway* pueden enviar y recibir información. La comunicación establecida—del *end node* hacia el *gateway* se conoce como ***uplink***, mientras que la que realiza el *gateway* hacia el *end node* se llama ***downlink***, tal como se muestra en la Fig. 10 [28].

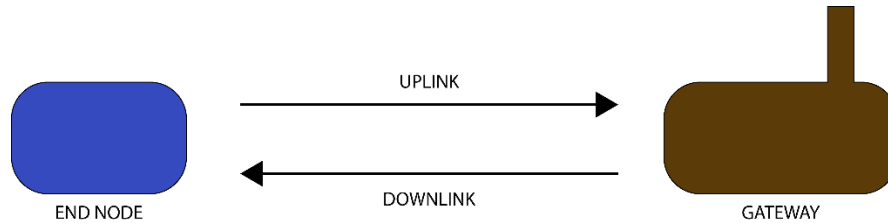


Fig. 10 Downlink y uplink entre end node y gateway en esquema half - duplex

3.1.1 Formato de paquete de datos

La información que se envía debe estar contenida dentro de un formato específico para que tanto el transmisor como el receptor puedan interpretarla de forma adecuada, este formato está constituido por el preámbulo que sirve para la sincronización de la señal, la carga útil y la verificación de redundancia cíclica o CRC (*Cyclic Redundancy Check*) por sus siglas en inglés. En el caso de LoRaWAN existen dos modos de envío de información: el modo de encabezado explícito en el cual se especifica el tamaño de la carga útil y las especificaciones del CRC (marcados de color verde en la Fig. 11), mientras que el modo con el encabezado implícito tomará los valores por defecto; estos se muestran en las Fig. 11 y Fig. 12 respectivamente donde se puede observar que de color negro se marca el preámbulo, de color verde la sección opcional usada en el modo de encabezado explícito y en color azul las partes que deben estar presentes [30].



Fig. 11 Modo encabezado explícito



Fig. 12 Modo encabezado implícito

3.1.2 Tiempo en el aire

El tiempo que se requiere para que un paquete de datos llegue del nodo sensor al *gateway* es conocido como Tiempo en el Aire o ToA por sus siglas en inglés (*Time on Air*), el cual está representado en la Fig. 13. La duración dependerá de los parámetros configurados para la transmisión y están definidos por la ecuación (1) [31].

$$T_{paquete} = T_{preambulo} + T_{carga\ util} \quad (1)$$

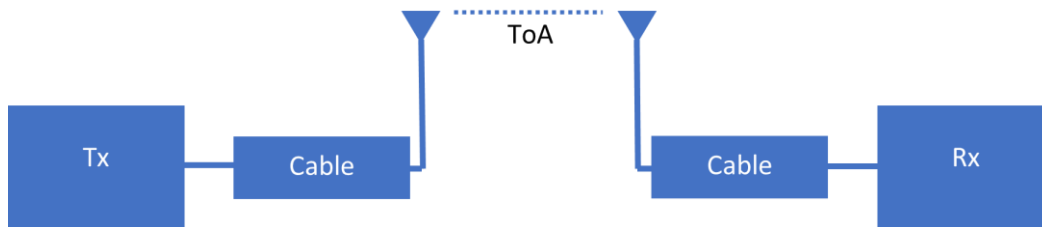


Fig. 13 Esquema que representa el ToA de una transmisión de datos

Donde el tiempo de la carga útil o *payload* y el tiempo del preámbulo están descritos en las ecuaciones (2) y (3) respectivamente. En la Tabla 4 se especifican-cada uno de los parámetros utilizados.

$$T_{carga\ util} = T_{simbolo} \cdot 8 + \max\left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2DE)}\right) \cdot (CR + 4) \quad (2)$$

$$T_{preambulo} = (n_{preambulo} + 4.25) \cdot T_s \quad (3)$$

Donde el tiempo de cada símbolo T_s , es la duración que tarda un símbolo en ser enviado; está representado en la Fig. 14 y descrito por la ecuación (4).

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (4)$$

Tabla 4 Parámetros usados para el cálculo del tiempo de envío de la carga útil

Símbolo	Descripción	Valores predeterminados
Ts	Tiempo de símbolo en segundos	NA
PL	Carga útil en bytes	NA
SF	Factor de dispersión	7 – 12
CRC	Verificación de redundancia cíclica	1: Habilitado (LoRaWAN) 0: Deshabilitado
H	Encabezado	1: Deshabilitado (implícito) 0: Habilitado (explícito) (LoRaWAN)
DE	Optimización de la tasa de datos	1: Habilitado 0: Deshabilitado
CR	Tasa de codificación	1, 2, 3 o 4; por defecto en LoRaWAN 1

El preámbulo es utilizado para la sincronización previa a la recuperación de datos y consiste en una cantidad específica de señales de *upchirp* seguidas por una de *downchirp* como se observa en la Fig. 14. Cuando el receptor comienza a recibir la señal espera a que transcurra el tiempo asociado a la cantidad de símbolos indicada, una vez pasado este periodo analiza la información y verifica si la señal recibida

coincide con una señal de *upchirp*, en caso contrario ajusta el tiempo de inicio de recepción del símbolo como se observa en la Fig. 15 para comenzar a recibir la carga útil.

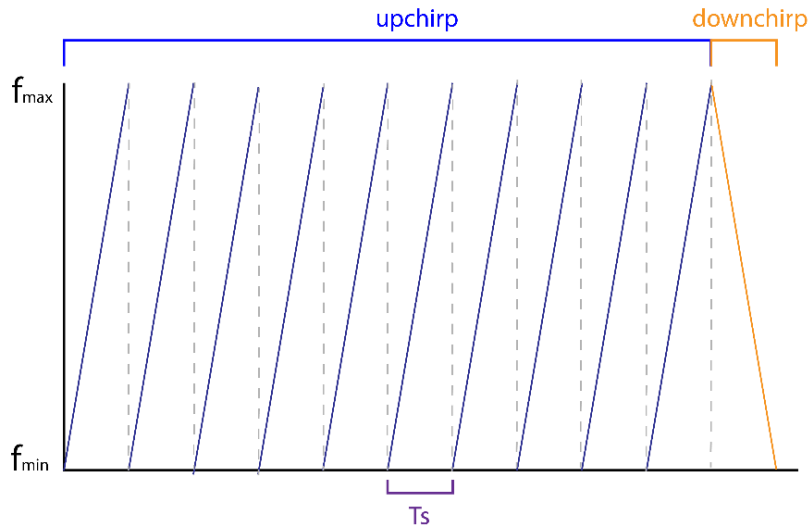


Fig. 14 Ejemplo de preámbulo de la comunicación LoRaWAN

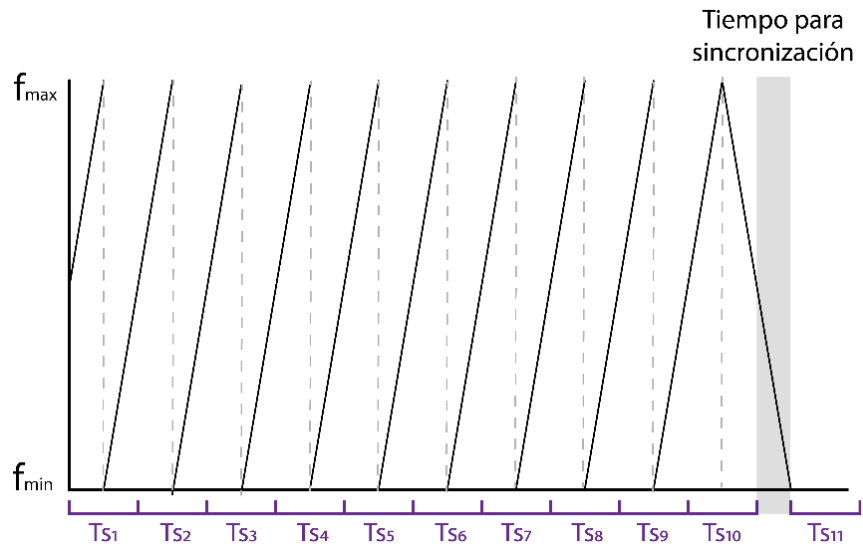


Fig. 15 Representación de la sincronización mediante el preámbulo para la comunicación LoRaWAN

3.2 Modulación de LoRaWAN

La tecnología LoRaWAN utiliza un tipo de modulación patentada, sin embargo, esta patente no provee detalles en término de ecuaciones o procesamiento de señales, aun así, muchos autores la asemejan a *Chirp Modulation* (Modulación Pulsada) y en particular como *Frequency Shift Chirp Modulation* (Modulación Pulsada por Corrimiento de Frecuencia) (*FSCM*) [32].

Este tipo de modulación se basa en señales llamadas *chirp*, las cuales consisten en una señal que se modifica en frecuencia dentro de un ancho de banda, yendo desde una frecuencia mínima hasta una frecuencia máxima durante un tiempo específico; este proceso puede realizarse de forma ascendente (*upchirp*) o de forma descendente (*downchirp*) tal como se muestra en la Fig. 16.

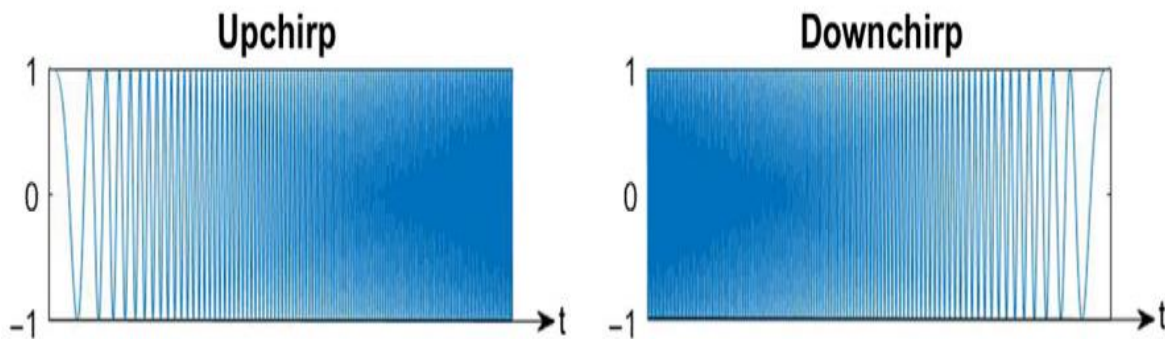


Fig. 16 Ejemplo de *Upchirp* y *Downchirp*, gráficas de tiempo vs amplitud. Obtenido de [4].

En la modulación *Chirp Spread Spectrum* se envía cada símbolo sobre una señal de *upchirp*, la cual dependerá del valor del Factor de Dispersión (*Spread Factor* (SF))

usado, el cual puede ir de $SF = 7$ hasta $SF = 12$, la cantidad de chips o símbolo enviado será igual a 2^{SF} (desde 128 hasta 4096). La relación entre la tasa de símbolos $R_s = BW/2^{SF}$ y la tasa del chip R_c dependerá del ancho de banda (BW) y está dada por las ecuaciones (5) y (6) [4].

$$R_c = 2^{SF} R_s \quad (5)$$

$$R_c = BW \quad (6)$$

Una señal *chirp* lineal está expresada por la ecuación (7).

$$c(t) = \begin{cases} \exp(2\pi j(at + b)t), & -\frac{T_s}{2} \leq t \leq \frac{T_s}{2} \\ 0, & \text{otros casos} \end{cases} \quad (7)$$

Donde, $at + b = f_{min} + \frac{f_{max} - f_{min}}{T_s} t$, siendo f_{min} y f_{max} las frecuencias mínimas y máximas respectivamente de la señal y T_s la duración de un símbolo.

En la literatura no hay diagramas a bloques que especifiquen por completo el sistema del transceptor LPWAN y las afectaciones de la señal durante el envío de información. En este trabajo se propone el diagrama a bloques del transmisor y receptor; adicionalmente, para su análisis, se incluyen algunas afectaciones que impactan en la calidad de la señal al ser enviada inalámbricamente. A continuación, se describe cada fase del diagrama a bloques mostrado en la Fig. 17, el cual es el fundamento de la simulación.

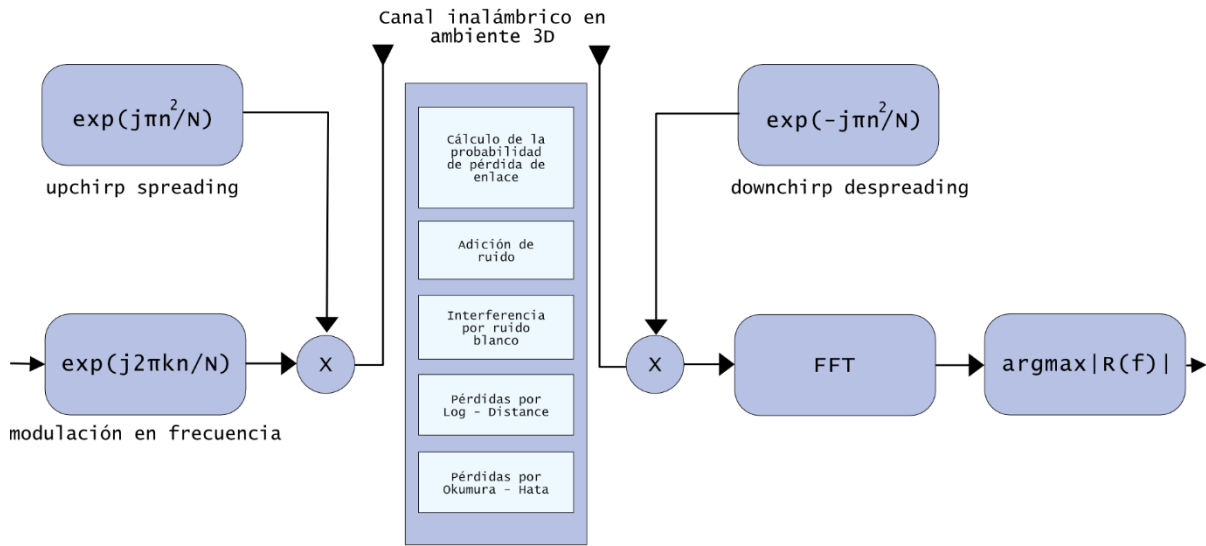


Fig. 17 Diagrama de bloques del transceptor LoRa. Basado de [33].

Para la generación (transmisor) y recuperación (receptor) se implementa un mapeo de bit a símbolo, que será el responsable de tomar la cadena de bits que se requiere enviar y buscará en una memoria el valor equivalente para generar el chirp adecuado, posteriormente se multiplicará con la señal portadora que equivale a una señal de *upchirp*. En el receptor podemos encontrar un bloque de sincronización que se encargará de escoger el tiempo en el que la señal está en sincronía con los *chirps* para posteriormente realizar la demodulación que consiste en multiplicarla por una señal *downchirp*. A continuación, se realiza una correlación por medio de una transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*) y se busca en qué punto se encuentra la correlación máxima, es decir, la mayor relación entre la señal recibida y las posibles señales que se puede recibir, el punto donde la correlación sea mayor indicará el símbolo que fue recibido [33].

Capítulo 4

Parámetros de análisis de calidad de una red

El diseño y construcción de una simulación que represente de forma óptima el envío de una señal inalámbrica debe incluir las principales afectaciones que la señal experimenta durante el trayecto del transmisor al receptor, en este capítulo se presentan los principales fenómenos que pueden modificar una señal.

4.1 Pérdidas de propagación

Uno de los parámetros analizados en este trabajo se deriva de las afectaciones que sufre una señal al ser transmitida de forma inalámbrica, esta pérdida de potencia de la señal se debe a factores como la distancia entre la antena y el dispositivo final, altura de las antenas, altura de los dispositivos, entre otros; y está modelado a través de ecuaciones matemáticas. Este análisis se conoce como el modelo de pérdidas de propagación, en el presente trabajo se utilizan los modelos *log – distance* y Okumura – Hata para calcular la probabilidad de pérdida de enlace.

4.2 Probabilidad de pérdida de enlace mediante modelo Log – Distance

En una red de comunicación inalámbrica es fundamental asegurar la calidad de los enlaces de comunicación considerando efectos que intervendrán en el envío de la señal. Estos efectos implicarán una probabilidad de que el enlace de la comunicación se pierda (*Outage probability*) [34].

La probabilidad de pérdida de enlace estará afectada inicialmente por la potencia recibida por el usuario, la cual está definida por la ecuación (8).

$$P_{rxM} = \frac{P_{tx}G_{tx}G_{rx}}{d^\mu} 10^{\frac{\zeta}{10}} \quad (8)$$

donde, P_{tx} es la potencia de transmisión, G_{tx} y G_{rx} son las ganancias de las antenas transmisora y receptora respectivamente, d es la distancia entre el *gateway* (la antena) y *end node* (el nodo final) (mostrada en la Fig. 18), μ es el exponente de pérdidas por propagación y ζ es la variable característica aleatoria Gaussiana de la distribución log-normal que modela el efecto de desvanecimiento o *shadowing*.

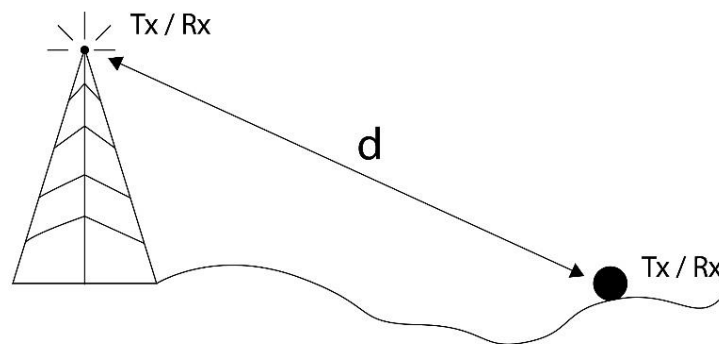


Fig. 18 Esquema de la distancia entre la antena y el end device.

Para la evaluación de la ganancia de la potencia transmitida se considera una función parabólica expresada por la ecuación (9), la cual indica la ganancia en función del ángulo entre la dirección de máxima radiación de la antena y el usuario $\phi_{l,n}$.

$$G_{tx}(\phi_{l,n}) = \begin{cases} 1 - \frac{(1-q)}{\left(\frac{\pi}{3}\right)^2} \phi_{l,n}^2; & \text{si } |\phi_{l,n}| \leq \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \frac{\pi}{3} \\ p; & \text{si } |\phi_{l,n}| > \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \frac{\pi}{3} \end{cases} \quad (9)$$

donde, q representa el nivel de la ganancia de la antena (normalizado a la máxima ganancia) en un sector de 60° y p representa el promedio de la ganancia normalizada de los lóbulos laterales [35].

Cada tecnología tiene asociada una sensibilidad, que es la potencia mínima con la que la señal podrá ser recuperada una vez que se recibe, ésta dependerá de factores como la modulación. Por lo tanto, la probabilidad de pérdida de enlace se puede considerar como la probabilidad de que la potencia recibida sea mayor que la potencia mínima y está descrita por la ecuación (10).

$$P(P_{rxM} > P_{min}) = \int_{P_{min}}^{\infty} f_{P_{rxM}}(x) dx \quad (10)$$

Resolviendo la ecuación (10), se obtiene la ecuación (11) [36]:

$$P(P_{rxM} > P_{min}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{P_{min}-m_p}{\sigma_p}}^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du = Q\left(\frac{P_{min}-m_p}{\sigma_p}\right) \quad (11)$$

donde,

$$m_p = 10 \log \left(\frac{P_{tx} G_{tx} G_{rx}}{d^\mu} \right) + m_\zeta$$

$$\sigma_p^2 = E\{P_{rxM} dB^2\} - E^2\{P_{rxM} dB\} = \sigma_\zeta$$

Para evaluar el comportamiento de la red se diseñó una simulación mediante eventos discretos Montecarlo utilizando el software MATLAB, la cual permite simular los efectos de *shadowing*, pérdidas según la distancia, ganancia de la antena (en función de la posición del usuario) y distribución 3D de usuarios. Para el escenario de simulación se considera un ambiente dividido en celdas microcelulares modeladas como prismas hexagonales los cuales se muestran en la Fig. 19.

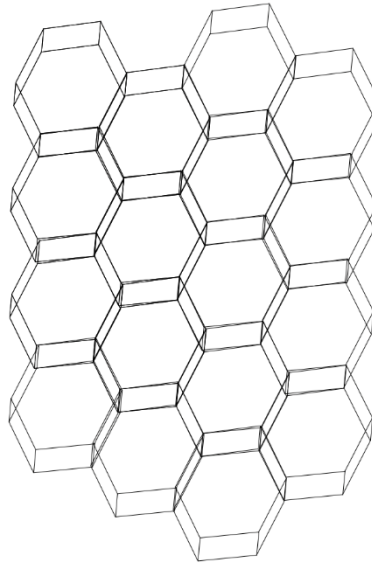


Fig. 19 Región de celdas hexagonales.

La simulación se desarrolla en una sola celda con un radio variable y una altura de 15 metros. Se considera una sectorización de 120° marcada en color rojo en la Fig. 20.

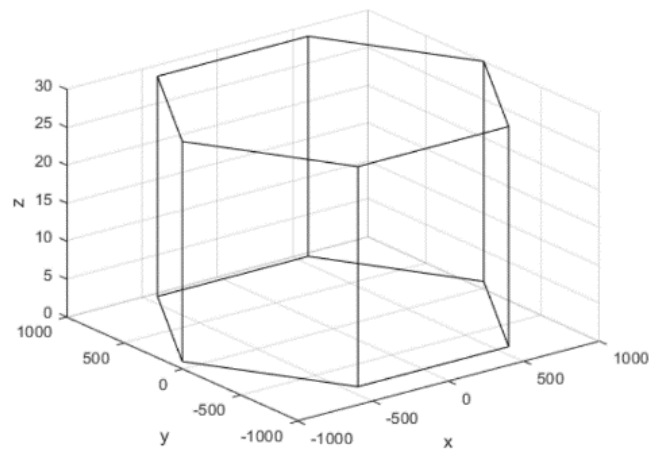


Fig. 20 Ambiente de simulación 3D.

La Fig. 21 muestra un diagrama de flujo que indica el proceso del entorno de simulación creado para calcular y graficar la probabilidad de pérdida de enlace.

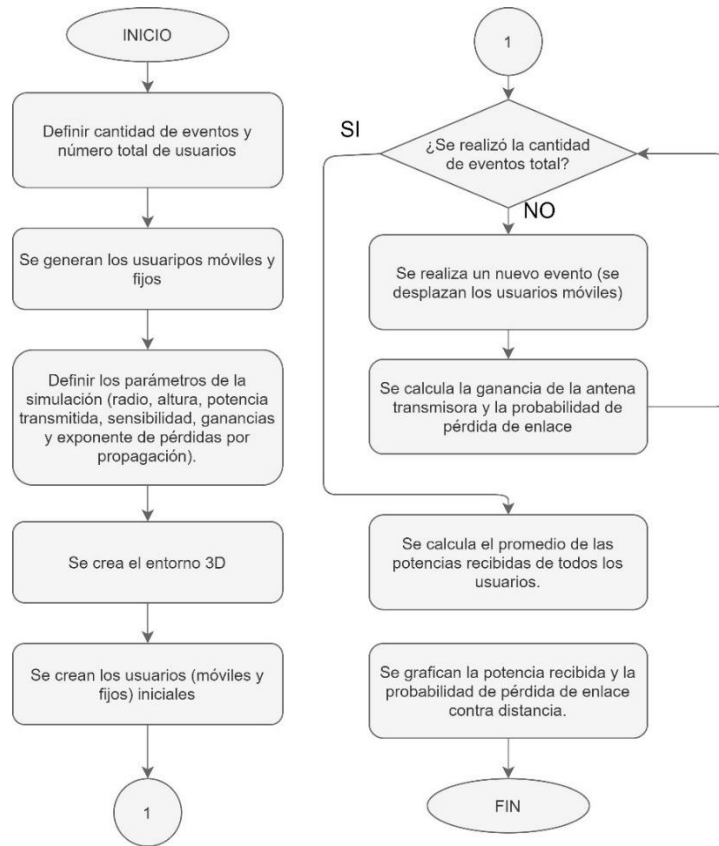


Fig. 21 Diagrama de flujo de la simulación del cálculo de la probabilidad de pérdida de enlace de comunicación.

4.3 Modelo Okumura – Hata

Es importante considerar que las pérdidas por propagación pueden ser analizadas mediante diferentes modelos, en esta sección se presenta el modelo Okumura – Hata.

Cuando se estudia la escalabilidad de LoRaWAN se requiere garantizar la recepción de la señal en distancias del orden de kilómetros debido a que es uno de los parámetros principales de las tecnologías LPWA.

Los modelos usados en simulaciones de LoRaWAN están basados en mediciones empíricas, por lo tanto, al realizar el análisis por medio de log – distance se observa una pérdida de la señal cuando la distancia se vuelve mayor a 100 metros, es por esto por lo que se propone el uso del modelo Okumura – Hata, el cual mejora considerablemente los resultados obtenidos [37].

El modelo Okumura – Hata está basado en datos empíricos que puede ser usado para modelar la propagación de señales móviles de radio tanto para áreas rurales como urbanas o suburbanas gracias a que cuenta con un factor de corrección para adaptarse a los diversos ambientes de análisis, además parámetros como altura de la antena, altura de los dispositivos finales y frecuencia [38].

La ecuación (12) describe el comportamiento del camino máximo de pérdidas o MPL por sus siglas en inglés (*Maximum Path Loss*).

$$MPL_{dB} = A + B \log(d) + C \quad (12)$$

Donde A, B y C se describen a continuación:

$$A = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) \quad (13)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log(h_b) \quad (14)$$

$$C = 0 \quad (15)$$

Donde C depende del ambiente elegido, en este caso, para áreas metropolitanas su valor es cero, f_c representa la frecuencia central dada en MHz, d representa la distancia en kilómetros, h_b la altura de la antena o *gateway* en metros, h_m la altura del dispositivo en metros y $a(h_m)$ es la función que representa el factor de corrección debido a la altura de la antena y dependerá de la frecuencia a la que se está trabajando como se observa en la ecuación (16) [37].

$$a(h_m) = \begin{cases} 8.29(\log(1.54 h_m)^2) - 1.1 & \text{para } f_c \leq 200 \text{ MHz} \\ 3.2(\log(11.75 h_m)^2) - 4.97 & \text{para } f_c \geq 400 \text{ MHz} \end{cases} \quad (16)$$

Gracias a este modelo se puede analizar el desempeño de la red a distancias del orden de kilómetros con mayor precisión comparado con otros modelos [39].

En la Fig. 22 se muestran gráficamente los parámetros utilizados para calcular los diferentes valores del modelo, en ella se observa la altura de la antena, la altura del dispositivo y la distancia.

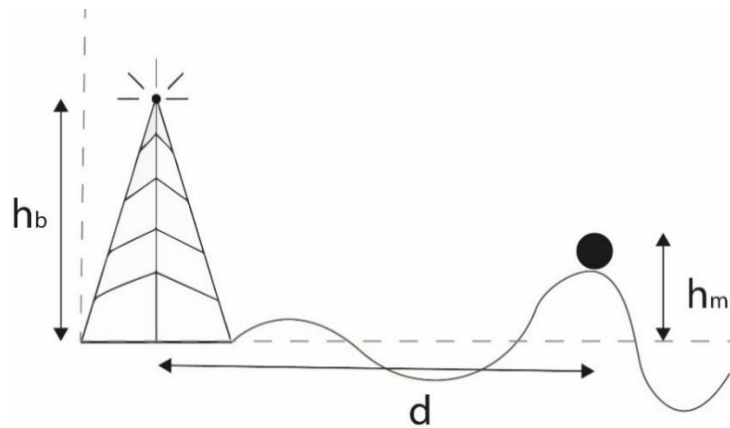


Fig. 22 Ilustración de los parámetros usados en el modelo Okumura - Hata

En la Tabla 5 se observan los parámetros máximos y mínimos para que un sistema pueda ser analizado mediante este modelo.

Tabla 5 Parámetros mínimos y máximos del modelo Okumura - Hata

Parámetro	Abreviación	Valor mínimo	Valor máximo
Frecuencia	f	150 MHz	1500 MHz
Altura de la antena	h_b	30 m	200 m
Altura del dispositivo	h_m	1 m	10 m
Distancia	d	1 km	20 km

4.4 Relación señal a ruido

Existen diversos parámetros que deben ser tomados en cuenta para garantizar la calidad de las señales, uno de ellos es la relación que existe entre la señal y el ruido recibido conocido como relación señal a ruido o SNR por sus siglas en inglés (*Signal – to – noise Ratio*) el cual está definido como el radio entre la potencia de la información deseada y la potencia no deseada producida por el ruido de fondo expresado en decibeles [40]. Esta relación está dada por la ecuación (17).

$$SNR = \frac{\text{Potencia requerida}}{\text{Potencia del ruido}} = 10 \log \frac{\text{Potencia requerida}}{\text{Potencia del ruido}} \text{ dB} \quad (17)$$

El desempeño de un sistema puede ser evaluado en términos de la relación señal a ruido [41].

Capítulo 5

Resultados

Se diseñó y construyó una simulación para el análisis mediante el software MATLAB utilizando la versión de uso académico en la cual se pueden seleccionar los parámetros que definen las señales LoRaWAN, mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6 Parámetros modificables en la simulación

Parámetro	Límite u opciones de valores
Radio	0 – 10000 metros
Altura del dispositivo	0 – 50 metros
Altura de la estación base	0 – 50 metros
Frecuencia	NA
Modelo de propagación	Okumura – Hata / Log – Distance
Factor de dispersión	7 - 12
Ancho de banda	NA
<i>Upchirps</i> en el preámbulo	Por defecto: 8
Tamaño de carga útil	NA
Ganancia de la antena receptora	NA
Exponente de pérdidas	NA

Mediante estos parámetros se obtienen las gráficas e información enumeradas a continuación:

1. Entorno 3D con usuarios móviles y fijos.
2. Espectrograma y gráfica contra tiempo de la señal *upchirp*.
3. Espectrograma y gráfica contra tiempo de los símbolos enviados.
4. Espectrograma y gráfica contra tiempo de las señales enviadas.
5. Gráfica contra tiempo de la señal después de ser modificada por las interferencias.
6. Espectrograma y gráfica contra tiempo de la señal *downchirp*.
7. Espectrograma y gráfica contra tiempo de las señales demoduladas.
8. Gráfica comparativa de la potencia recibida comparada con la sensibilidad para usuarios móviles y usuarios fijos.
9. Porcentaje de datos recibidos correctamente.
10. SNR promedio.

A continuación, se explican en detalle los resultados obtenidos.

5.1 Simulación de la modulación *chirp*

Una parte importante de la simulación es la creación de las señales *upchirp*, *downchirp* y el símbolo a enviar; esto se realizó utilizando el software MATLAB mediante un algoritmo basado en las ecuaciones para describir el *chirp*. En la Fig. 23 se observa una gráfica de la frecuencia instantánea del *upchirp* y otra gráfica de la señal basada en la ecuación (18); se puede observar como la señal va cambiando su frecuencia a lo largo del tiempo desde un valor mínimo hasta un valor máximo para posteriormente repetir el proceso; en total se observan tres chirps.

$$upchirp = e^{(j\pi n^2/N)} \quad (18)$$

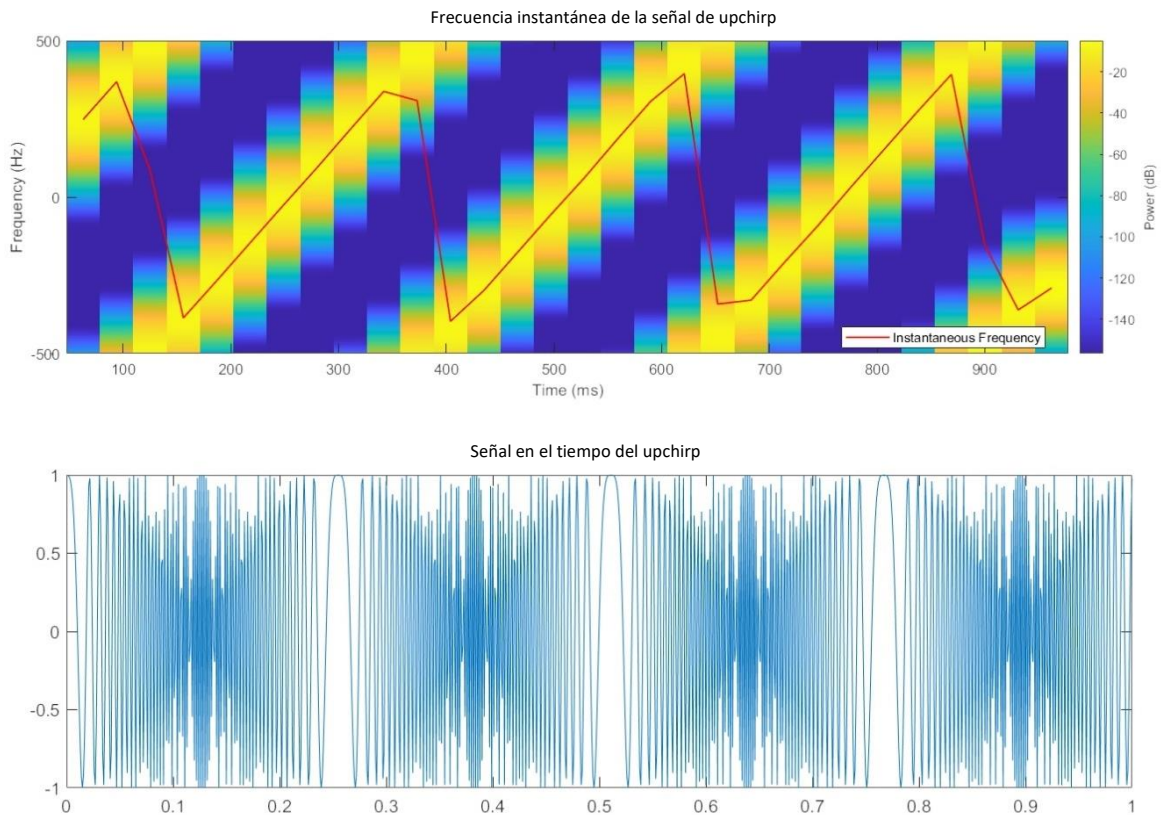


Fig. 23 Gráficas de la frecuencia instantánea y la señal en el tiempo de *upchirp*

Una vez creada la señal de *upchirp* se genera la señal del símbolo a enviar basado en la ecuación (19), la cual dependerá de la información que se requiera enviar y estará acotada por 2^{SF} , en este ejemplo se utiliza un factor de dispersión $SF = 8$; por lo tanto, es posible enviar hasta 256 símbolos diferentes. En la Fig. 24 se observa la frecuencia instantánea que es una constante y la señal generada para enviar el símbolo 256.

$$\text{Símbolo LoRa} = e^{\left(\frac{j\pi kn}{N}\right)} \quad (19)$$

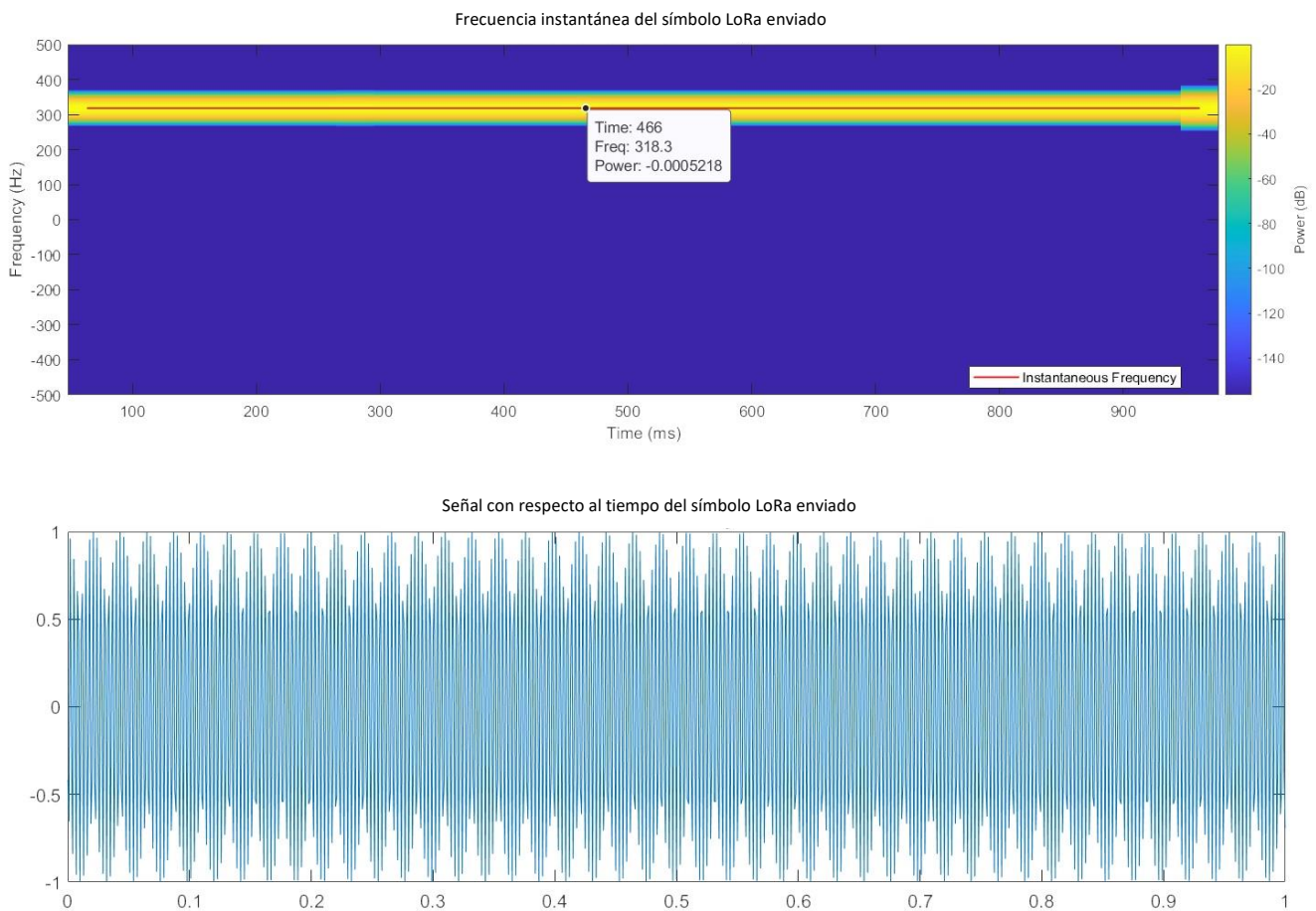


Fig. 24 Gráficas de la frecuencia instantánea y señal en el tiempo del símbolo LoRa enviado

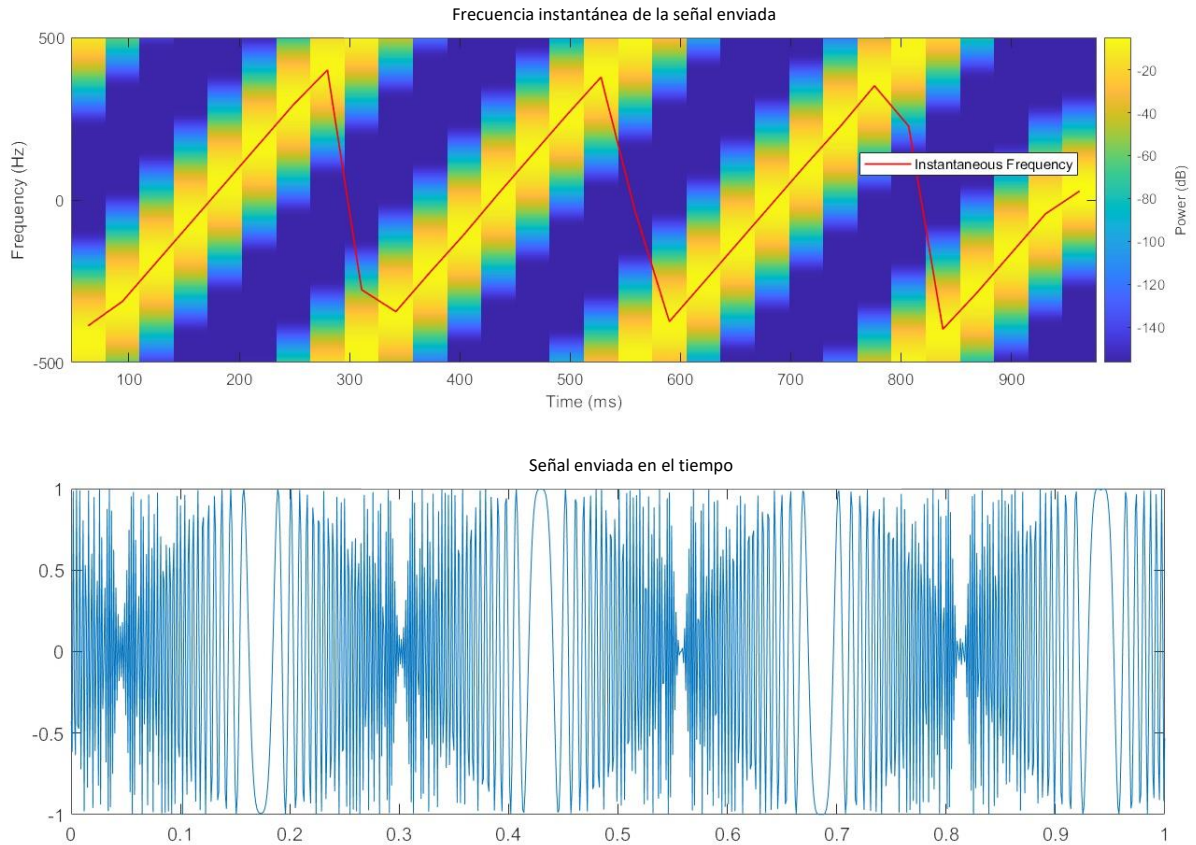


Fig. 25 Gráficas de la frecuencia instantánea y la señal enviada

El receptor debe generar una señal de *downchirp*, la cual está descrita en la ecuación (21), y se muestra en la Fig. 26, donde se puede observar que justamente va reduciendo su frecuencia hasta llegar a una frecuencia mínima para posteriormente saltar a la frecuencia máxima esto lo hace tres veces, lo cual indica que se están generando tres *downchirps*.

$$\text{downchirp} = e^{\left(\frac{-j\pi n^2}{N}\right)} \quad (21)$$

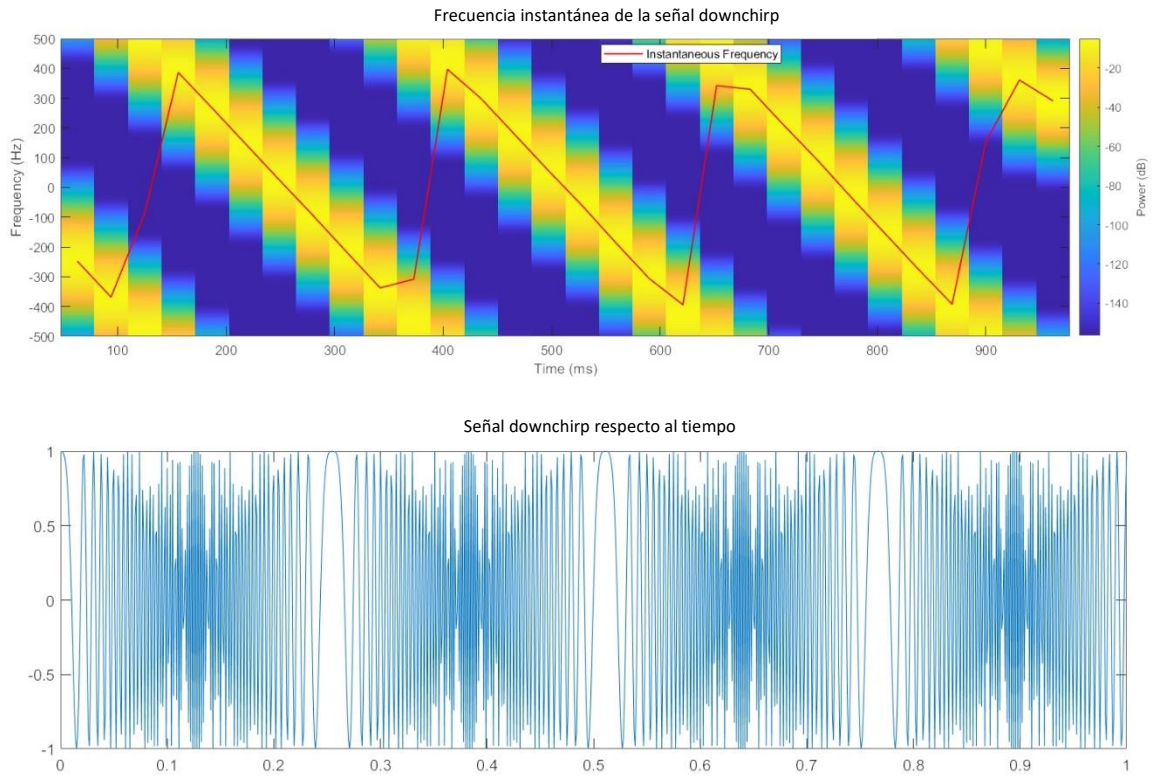


Fig. 26 Gráficas de la frecuencia instantánea y la señal de downchirp

En la Fig. 27 se observa la señal a lo largo del tiempo después de haber pasado por las interferencias referentes a ruido blanco y pérdidas por propagación, en la cual se puede ver el decaimiento de la potencia debido a la distancia utilizada ($d = 10 \text{ km}$).

Finalmente, la señal recibida se multiplica por el *downchirp* para recuperar la señal original como se observa en la Fig. 28, esta señal se conoce como *dechirped*.

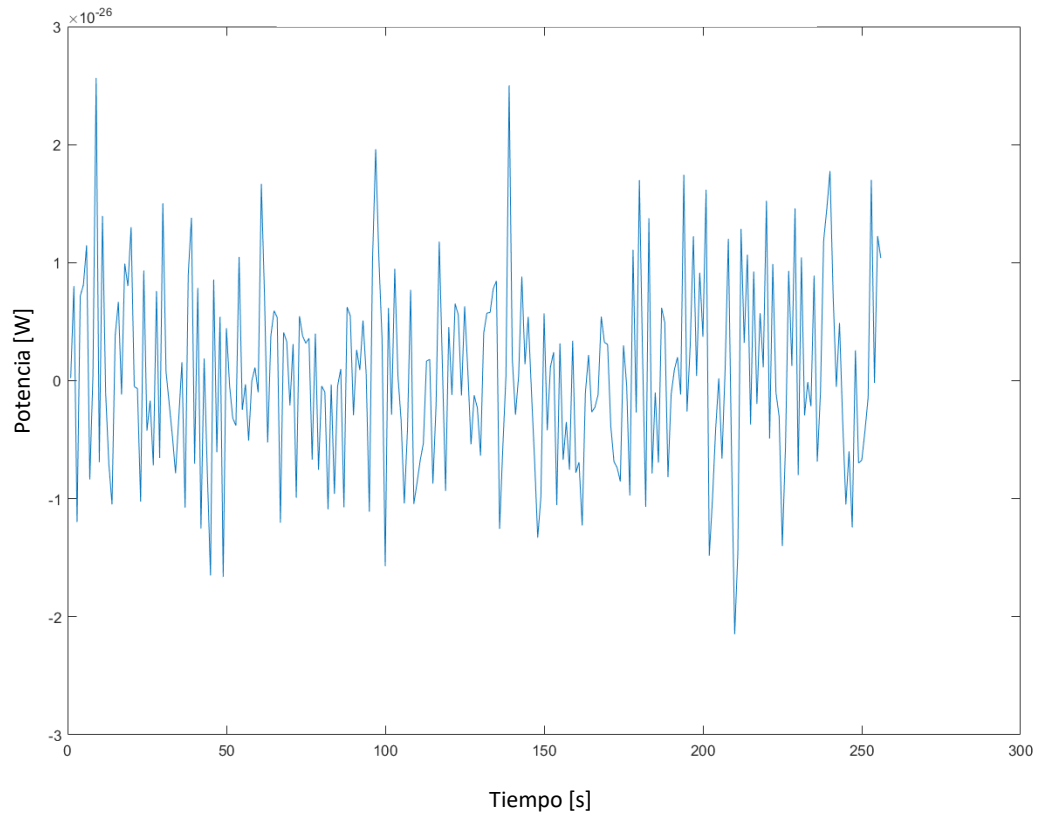


Fig. 27 Gráfica de la señal con las inferencias vs tiempo

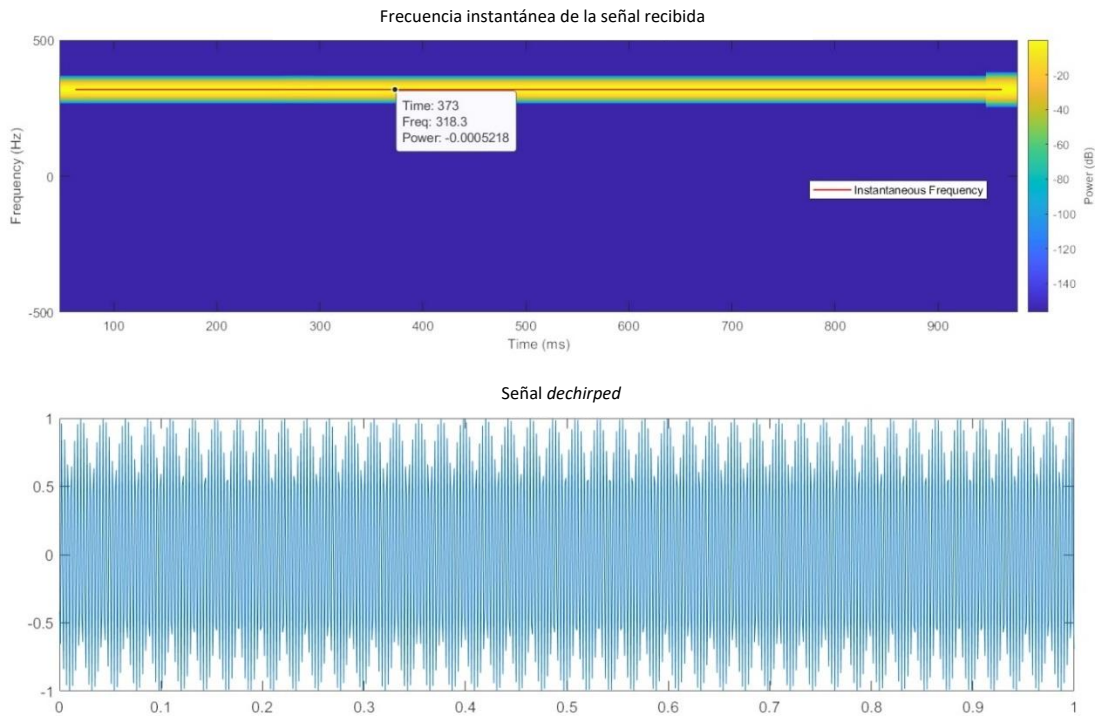


Fig. 28 Gráficas de la frecuencia instantánea y la señal dechirped

Se realizaron diversas pruebas utilizando diferentes parámetros, en las Fig. 29 y Fig. 30 se muestran las gráficas de los espectrogramas de los símbolos y de la señal enviada respectivamente, en ella se puede observar la forma de los *chirps* cuando se generan y envían 30 símbolos aleatorios.

En la Fig. 31 se muestra un acercamiento a tres de las señales enviadas con un factor de dispersión de 8. En rojo el símbolo 0, en negro el símbolo 60 y en rosa el símbolo 120. Se puede observar que cada una de las señales tiene la misma duración de tiempo, lo que cambia es la frecuencia inicial y la frecuencia final, las cuales van a depender del símbolo enviado, en el caso del símbolo 0 se genera una señal igual a la señal base del *chirp*, es decir, va desde la frecuencia mínima hasta la frecuencia máxima, en el caso de los símbolos 60 y 120 cada uno tiene su frecuencia inicial, la cual es igual a su frecuencia final, la señal aumenta hasta llegar a la f_{max} y en ese punto baja hasta la f_{min} para continuar incrementando hasta la frecuencia final.

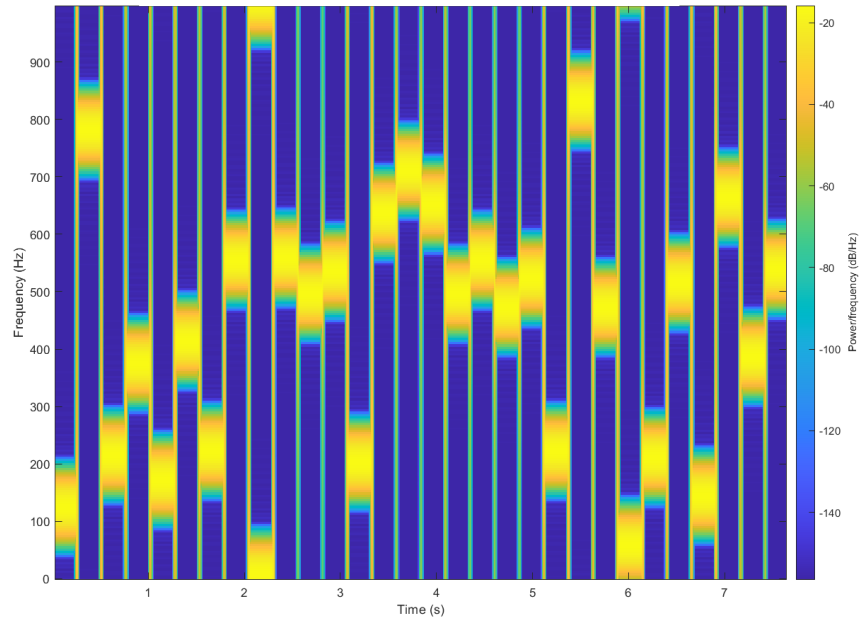


Fig. 29 Espectrograma de los símbolos enviados

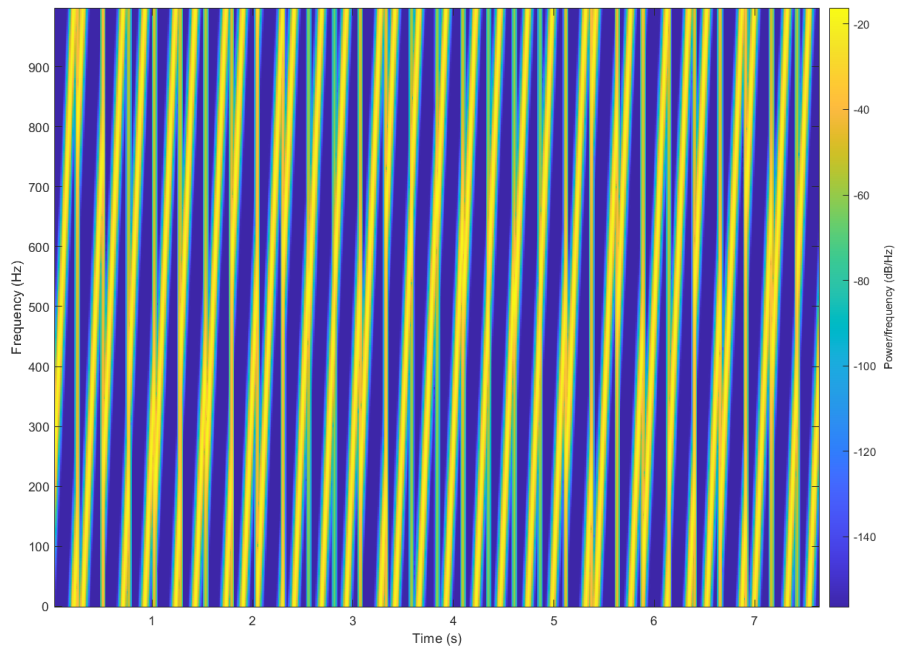


Fig. 30 Espectrograma de las señales chirp enviadas

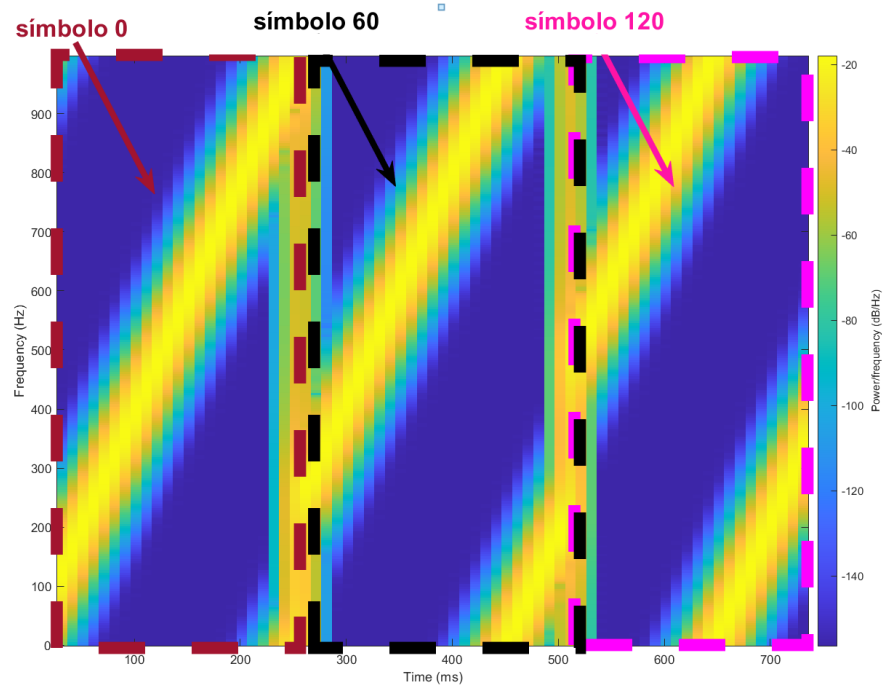


Fig. 31 Señales enviadas para los símbolos 0, 60 y 120 con un factor de dispersión de 8.

5.2 Datos obtenidos

Es importante considerar diferentes parámetros para analizar el funcionamiento del sistema, en este trabajo se calculan los siguientes:

- Coincidencias entre los símbolos enviados y recibidos.
- Porcentaje de recepción exitosa.
- SNR promedio lineal y en decibeles.

En la Tabla 7 se muestran los valores obtenidos con diferentes valores de factor de dispersión y de desviación estándar para la generación del ruido blanco. Se puede verificar que a mayor factor de dispersión se aumenta la posibilidad de recibir exitosamente la señal a pesar del ruido blanco y la distancia.

Tabla 7 Porcentaje de recepción exitosa y SNR promedio para diferentes desviaciones estándar y factores de dispersión.

Factor de dispersión	Distancia [km]	Cantidad de símbolos	Desviación estándar del ruido blanco	Porcentaje de recepción exitosa	SNR promedio [dB]
7	10	1000	0	100%	0
	10	1000	3	100%	-2.7
	10	1000	7	23%	-6.1
8	10	1000	0	100%	0
	10	1000	3	100%	-3.1
	10	1000	7	46%	-5.9
9	10	1000	0	100%	0
	10	1000	3	100%	-3.1
	10	1000	7	94%	-5.6
10	10	1000	0	100%	0
	10	1000	3	100%	-3
	10	1000	7	100%	5.6
11	10	1000	0	100%	0
	10	1000	3	100%	-3.1
	10	1000	7	100%	-5.66
12	10	100	0	100%	0
	10	100	3	100%	0
	10	100	7	100%	-5.22

5.3 Simulación de la potencia recibida

La potencia recibida y la probabilidad de pérdida de enlace se presenta con respecto a la distancia asumiendo que la ganancia máxima del sector principal es $p = -4 \text{ dB}$ mientras que la de los lóbulos laterales es $p = -15 \text{ dB}$; además se consideran los parámetros de potencia de transmisión $P_{tx} = 20 \text{ mW}$ y la sensibilidad $P_{min} = 1 \text{ pW}$, en esta simulación se obtienen los valores para una generación aleatoria usuarios considerando a su vez 1000 eventos en los cuales los usuarios móviles se desplazan libremente, la cantidad de usuarios móviles y fijos es decidida de manera aleatoria de forma que simule las posiciones aleatorias de los móviles en una aplicación real en un radio de 100 metros.

En la Fig. 32 se observan las posiciones 3D finales de los usuarios, las cuales fueron generadas aleatoriamente dentro de una zona particular de cobertura de la antena.

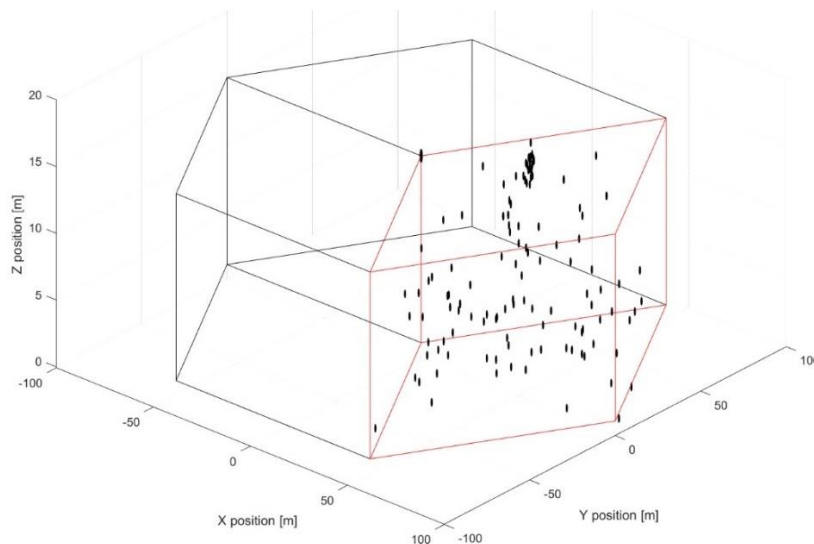


Fig. 32 Usuarios generados aleatoriamente, en rojo se marca la zona de 60° abarcada por la antena.

La Fig. 33 y Fig. 34 muestran la distancia contra la probabilidad de pérdida de enlace para los usuarios fijos (en rojo) y los usuarios móviles (en azul) para los modelos *log – distance* y Okumura – Hata respectivamente. Como la probabilidad es cercana al 98% para el modelo *log – distance* entonces la potencia recibida estará en su mayoría por encima del umbral de la P_{min} . En el caso del modelo Okumura – Hata los valores son cercanos al 100%, es decir, la probabilidad de pérdida de enlace es mínima. Para el caso de *log – distance* se observan los datos hasta 100 metros y para Okumura – Hata hasta 200 metros.

En las Fig. 35 y Fig. 36 se observan en las gráficas en color rojo la potencia recibida por medio del modelo Log – Distance y en azul con el modelo Okumura – Hata, donde se puede comparar el nivel donde se encuentra cada modelo en relación con la sensibilidad del sistema marcada con una línea horizontal negra, para un límite de 100 metros y de 1000 metros respectivamente. Se puede observar que cuando se sobrepasa una distancia de alrededor de 300 metros el modelo Log – Distance indica que la potencia de la recepción es menor a la sensibilidad, lo cual significa que la probabilidad de recepción exitosa se reduce de forma considerable, contradiciendo directamente la característica de usuarios “Prx > Pmin” de redes LPWAN; mientras que para el modelo Okumura – Hata al llegar a 1 kilómetro de distancia todavía no se acerca al umbral de la sensibilidad.

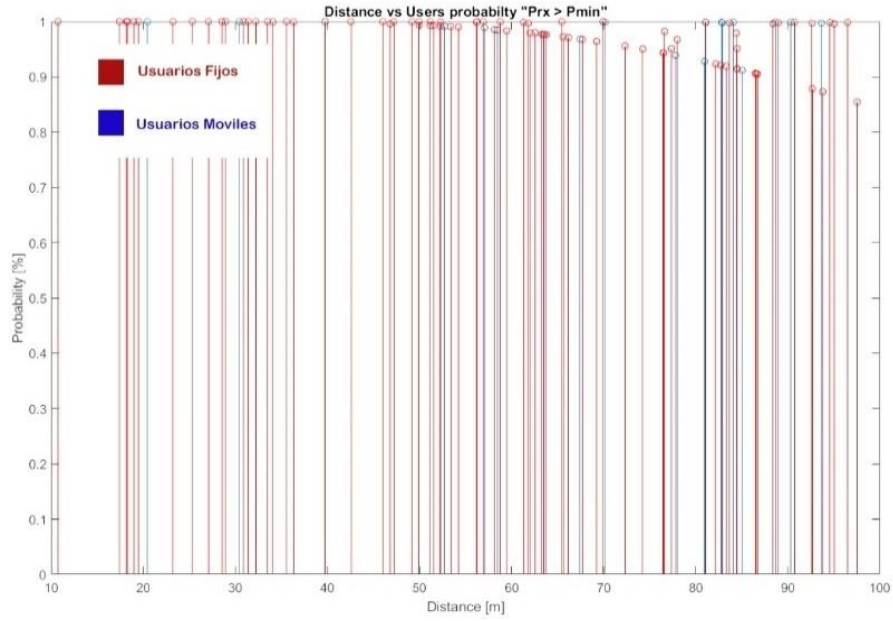


Fig. 33 Gráficas de distancia en metros vs potencia en watts para los usuarios fijos y móviles de la simulación para el modelo log - distance.

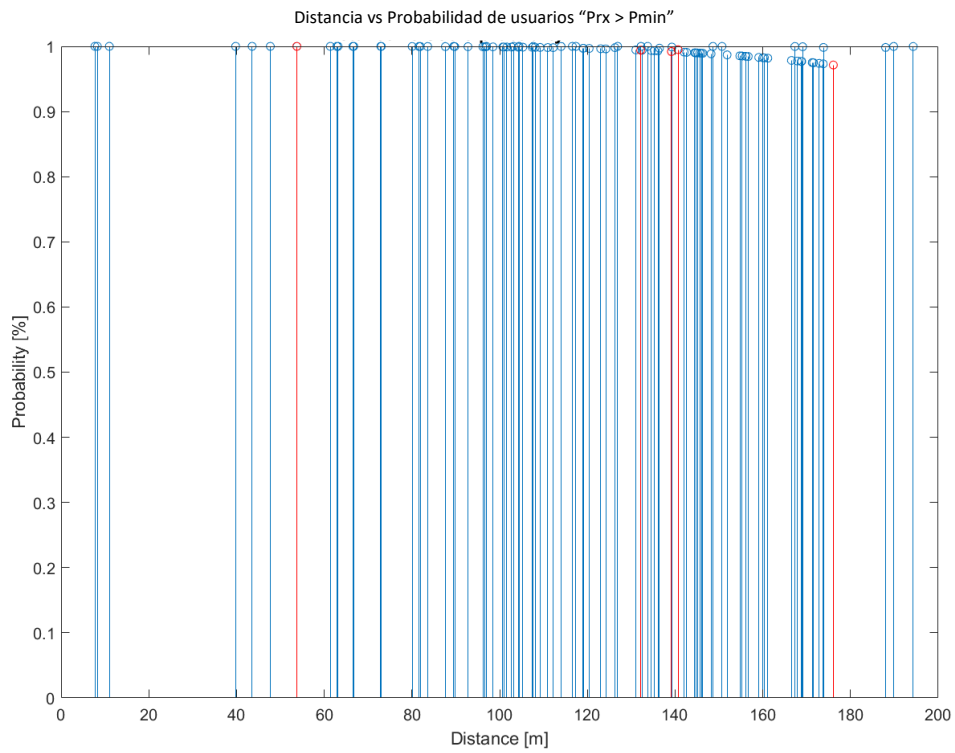


Fig. 34 Gráficas de distancia en metros vs potencia en watts para los usuarios fijos y móviles de la simulación para el modelo Okumura - Hata.

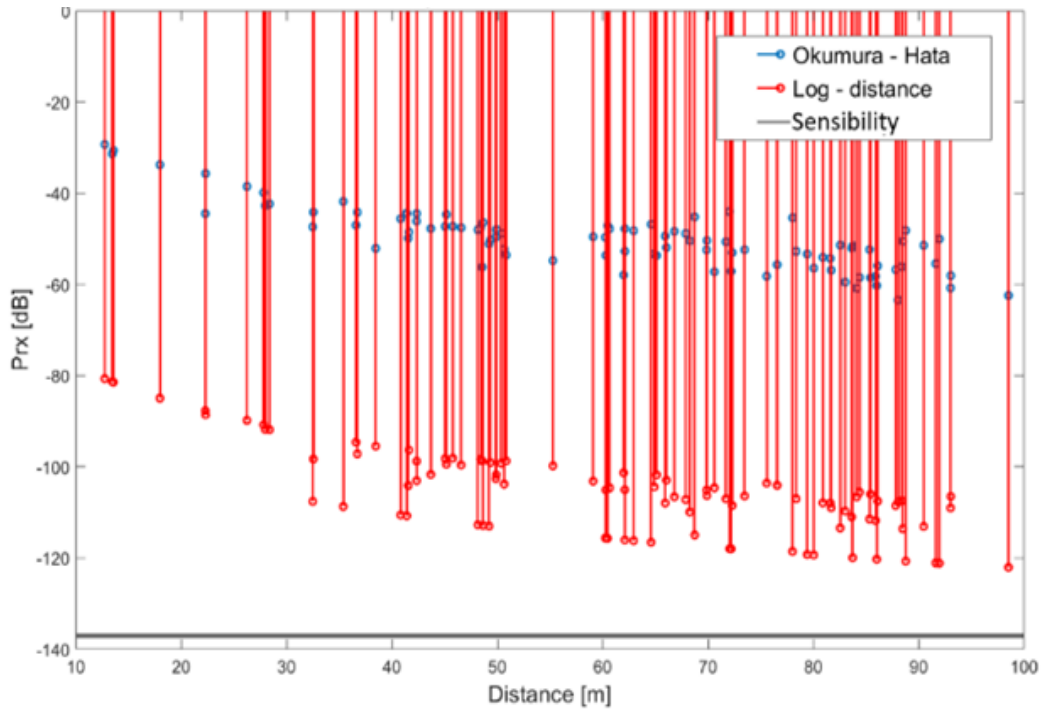


Fig. 35 Potencia recibida para Log - Distance y Okumura - Hata para usuarios móviles en un radio de 100 metros.

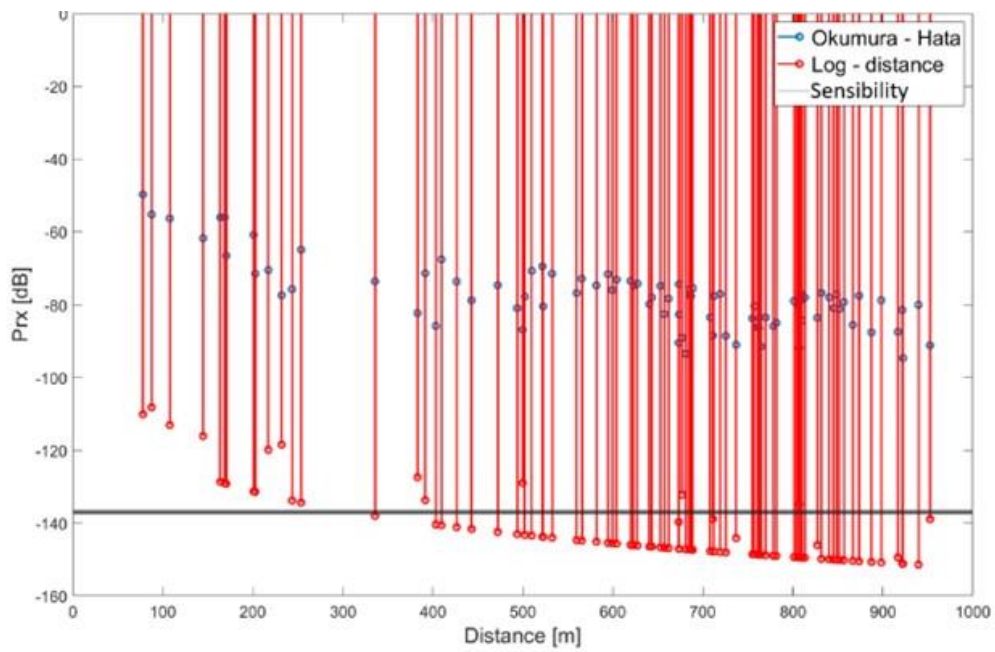


Fig. 36 Potencia recibida para Log - Distance y Okumura - Hata para usuarios móviles en un radio de 1000 metros.

En la Tabla 8 y

Tabla 9 se describen los resultados para la probabilidad de pérdida de enlace y la potencia promedio de los usuarios móviles y fijos que fueron obtenidos en la simulación utilizando el modelo log – distance y Okumura – Hata respectivamente. Se puede observar que a medida que aumenta el radio también lo hace la probabilidad de pérdida de enlace mientras que la cantidad de usuarios no afecta de forma significativo.

En comparación de ambos modelos se observa que en el caso de Okumura – Hata se mejora considerablemente la probabilidad de pérdida de alcance, lo cual confirma las ventajas de realizar el análisis con este modelo cuando se toman en cuenta distancias mayores.

Tabla 8 Resultados obtenidos para LoRaWAN mediante log - distance

Número de usuarios	Número de eventos	Radio [m]	Prx promedio (usuarios fijos) [W]	Prx promedio (usuarios móviles) [W]	Prx promedio [W]	Probabilidad de pérdida de enlace
10	1000	100	1.94e-9	3.89e-10	1.16e-9	1.9%
50	1000	100	8.89e-9	9.68e-10	4.93e-9	1.1%
100	1000	100	5.75e-8	4.58e-9	3.10e-8	2.5%
1000	1000	100	6.42e-7	1.14e-8	3.26e-7	1.9%
100	1000	200	1.62e-9	3.64e-11	8.20e-10	41.1%
100	1000	400	1.93e-12	7.04e-12	4.48e-12	82.3%
100	1000	500	6.33e-10	1.01e-13	3.16e-10	89.7%
100	1000	1000	2.79e-13	2.83e-14	1.54e-13	97.7%

Tabla 9 Resultados obtenidos para LoRaWAN mediante Okumura - Hata

Número de usuarios	Número de eventos	Radio [m]	Prx promedio (usuarios fijos) [W]	Prx promedio (usuarios móviles) [W]	Prx promedio [W]	Probabilidad de pérdida de enlace
10	1000	100	8.90e-21	5.05e-22	4.70e-21	0%
50	1000	100	3.39e-19	6.19e-21	1.73e-19	0%
1000	1000	100	1.97e-20	1.88e-20	1.92e-20	0.01%
100	1000	200	1.22e-21	3.09e-23	6.24e-22	1%
100	1000	400	2.66e-23	1.76e-24	1.43e-23	9%
100	1000	500	4.50e-24	8.30e-25	2.66e-24	22%
100	1000	1000	4.33e-24	2.89e-25	2.31e-24	46%

Conclusiones y trabajo futuro

Las redes LPWAN conforman un gran avance en torno a las tecnologías de comunicación debido a las principales características descritas en su nombre, en este trabajo se observa inicialmente que la correcta implementación de esta tecnología puede resolver los problemas relacionados a los requerimientos de las redes actuales. La información relativa a este tema es todavía escasa y reciente, y la implementación o diseño lo es aún más; lo cual torna difícil la investigación, por lo que el trabajo desarrollado es de suma importancia y puede funcionar como una base sólida para trabajos posteriores debido a la especificación de los modelos matemáticos y su simulación basados en el desarrollo a bloques del transceptor de la tecnología LoRaWAN facilitando de esta forma el análisis previo al desarrollo, diseño e implementación de un sistema LPWAN.

El modelo de pérdidas por propagación más utilizado en las investigaciones de redes LPWAN y en las herramientas de simulación más utilizadas como LoraSIM es el Log – Distance, sin embargo, al ejecutar las primeras corridas y a partir de una investigación más profunda respecto al tema fue claro que no cumplía con los requisitos

de cobertura de las redes LPWAN del orden de kilómetros. En el análisis se incluyó entonces, el modelo de propagación Okumura – Hata obteniéndose mejores resultados en distancias mayores a 300 metros.

En el análisis de la probabilidad de pérdida de enlace con el modelo Log – Distance se obtuvo una probabilidad del 40% cuando la distancia era mayor a 200 metros lo cual implica que no es una tecnología adecuada para largas distancias, considerando que LoRaWAN fue creada justamente para cubrir áreas del orden de kilómetros tal como su nombre lo indica. Sin embargo, al realizar el análisis con Okumura – Hata se observó que la probabilidad a la misma distancia (200 metros) es cercana al 1%, por lo tanto, en el estudio de redes LPWAN se propone la utilización del modelo Okumura – Hata, confirmándose lo antes descrito.

Al comparar los resultados obtenidos con los reportados en la literatura en torno a temas de redes LPWAN se puede observar que los valores de la simulación se acercan y funcionan según los parámetros de las especificaciones de esta tecnología, lo cual a su vez valida la simulación y permite que esta herramienta pueda ser implementada en trabajos futuros para hacer un análisis particular de redes LoRaWAN para sus diversas aplicaciones. Nuestra propuesta contribuye de forma significativa en el proceso de construcción y eventual implementación de estas tecnologías aun protegidas para la mejora de los entornos de IoT y de 5G.

Este trabajo forma parte de un área de estudio muy amplia e integral, que incluye desde la programación hasta el diseño de circuitos integrados. Por ello, se deja para trabajos futuros:

La implementación de la herramienta de simulación en lenguaje Python para reducir la dependencia a un software externo como MATLAB y generar una aplicación independiente.

La profundización en torno a los motivos por los que se sigue utilizando el modelo Log – Distance en las herramientas de análisis actuales y de qué forma se podrían actualizar para mejorar su análisis y desempeño.

El desarrollo de un sistema digital para implementación a nivel circuito integrado de la fase de modulación y demodulación *Chirp Spread Spectrum*

Bibliografía

- [1] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel y F. Meyer, «A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,» *ICT Express*, 2018.
- [2] A. Kosari y D. D. Wentzloff, «MURS Band for LPWAN Applications,» de *IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet)*, Orlando, 2019.
- [3] M. Aernouts, R. Berkvens, K. Van Vlaenderen y M. Weyn, «Sigfox and LoRaWAN Datasets for Fingerprint Localization in Large Urban and Rural Areas,» *Data Descriptor*, vol. 3, nº 2, p. 13, 2018.
- [4] B. Chaudhari y M. Zennaro, *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, Londres: Elsevier, 2020.
- [5] R. Yasmin, J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov y A. Pouttu, «On the integration of LoRaWAN with the 5G test network,» de *IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, Montreal, 2017.
- [6] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel y F. Meyer, «Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: SigFox, LoRaWAN, and NB-IoT,» de *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops)*, Athens, 2018.

- [7] M. Marín Cava, Sistema de monitorización para elementos móviles IoT mediante redes LPWAN, Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2020.
- [8] R. Sarath Kumar, M. Gokul Prasanth, R. Bharath Kumar, J. Abhishek y D. Ajay, «LPWAN for IoT,» de *2022 International Conference on Advanced Computing Technologies and Applications (ICACTA)*, Coimbatore, 2022.
- [9] J. Jithina y T. Sasipraba, «Indoor air quality monitors using IOT sensors and LPWAN,» de *2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, Tirunelveli, 2019.
- [10] L. Lingling, R. Jiuchun y Z. Qian, «On the application of LoRa LPWAN technology in Sailing Monitoring System,» de *2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, Jackson, 2017.
- [11] K. Zheng, S. Zhao, Z. Yang, X. Xiong y W. Xiang, «Design and implementation of LPWA-Based Air Quality Monitoring System,» *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3238-3245, 2016.
- [12] R. Dwi Lestari, A. Rusdinar, M. Ary Murti, G. Tawaqal y D. Lee, «Design of IoT-Based River Water Monitoring Robot Data Transmission model using Low Power Wide Area Network (LPWAN) communication technology,» de *2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoT&IS)*, Bali, 2019.
- [13] Y. Chung, J. Young Ahn y J. Du Huh, «Experiments of a LPWAN Tracking (TR) Platform Based on Sigfox Test Network,» de *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, 2018.
- [14] G. Del Campo, I. Gomez, G. Cañada y A. Santamaria, «Hybrid LPWAN Communication Architecture for Real-Time Monitoring in Power Distribution Grids,» de *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Limerick, 2019.

- [15] N. Srinivasarao Chilamkurthy, O. Jee Pandey, A. Ghosh, L. Reddy Cenkeramaddi y H.-N. Dai, «Low-Power Wide-Area Networks: A Broad Overview of Its Different Aspects,» *IEEE Access*, vol. 10, pp. 81926-81959, 2022.
- [16] S. Mane, «LPWAN's – overview, market scenario and performance analysis of lora, sigfox using NB-Fi range calculator,» de *2021 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)*, Pune, 2021.
- [17] IoT Analytics, «LPWAN Market Report 2018-2023,» IoT Analytics, 2018.
- [18] K. Mikhaylov, J. Petaejaejaervi y T. Haenninen, «Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology,» de *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference*, Oulu, 2016.
- [19] U. Raza, P. Kulkarni y M. Sooriyabandara, «Low Power Wide Area Networks: An Overview,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, n^o 2, pp. 855-873, 2017.
- [20] IEEE P802.15.4k/D5, IEEE Draft Standard for Local and metropolitan area networks Part15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) Amendment Physical Layer Specifications for Low Energy. Critical Infrastructure Monitoring Networks (LECIM), 2013.
- [21] LoRa Alliance, «LoRa Alliance,» 2021. [En línea]. Available: <https://loralliance.org/>. [Último acceso: 10 octubre 2021].
- [22] 3GPP, «About 3GPP Home,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>. [Último acceso: 10 octubre 2021].
- [23] A. Lavric, A. Petrariu y V. Popa, «SigFox Communication Protocol: The New Era of IoT?,» de *International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)*, Lisboa, 2019.

- [24] A. Zourmand, A. Lai Kun Hing, C. Wai Hung y M. AbdulRehman, «Internet of Things (IoT) using LoRa technology,» de *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, Selangor, 2019.
- [25] A. Lavric y A. Ioan Petrariu, «LoRaWAN communication protocol: The new era of IoT,» de *2018 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, 2018.
- [26] N. Mangalvedhe, R. Ratasuk y A. Ghosh, «NB-IoT deployment study for low power wide area cellular IoT,» de *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Valencia, 2016.
- [27] T Mobile, Narrowband IoT Solution Developer Protocols Guide, 2019.
- [28] L. Alliance, «About LoRa Alliance,» 2021. [En línea]. Available: <https://loralliance.org/about-lora-alliance/>. [Último acceso: 21 agosto 2021].
- [29] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen y W. Mark Townsley, «A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things,» *Enabling the Move from Wireless Sensor Networks to Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 16, nº 9, p. 1466, 2016.
- [30] J. YongSung y K. Yousung, «Implementation of a LoRaWAN protocol processing module on an embedded device using Secure Element,» de *2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*, JeJu, 2019.
- [31] The Things Network, «LoRaWAN airtime calculator,» The Things Network, 2022. [En línea]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/airtime-calculator>LoRaWAN airtime calculator. [Último acceso: 07 febrero 2022].
- [32] L. Vangelista, «Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation,» *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 24, nº 12, pp. 1818-1821, 2017.

- [33] F. d. A. I. Bizon, M. Chafii y G. Fettweis, «In-phase and Quadrature Chirp Spread Spectrum for IoT Communications,» de *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*, Taiwan, 2020.
- [34] Q. Vu Khanh, T. B. Nguyen y N. Dinh Han, «An Advanced Energy Efficient and High Performance Routing Protocol for MANET in 5G,» *Journal of Communications*, vol. 13, n^o 12, pp. 743-749, 2018.
- [35] J. Castaneda Camacho, U. Rios y L. Lara Rodriguez, «Reverse link erlang capacity of multiclass CDMA cellular system considering nonideal antenna sectorization,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 52, n^o 6, pp. 1476-1488, 2003.
- [36] A. Papoulis y U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, New York: McGraw-Hill, 2002.
- [37] S. Francisco, P. Pinho y M. Luís, «Improving LoRa Network Simulator for a More Realistic Approach on LoRaWAN,» de *2021 Telecoms Conference (ConfTELE)*, Leiria, 2021.
- [38] W. C. Lee, *Mobile Communications Engineering Theory and Applications*, Segunda ed., McGraw-Hill, 1998.
- [39] M. Hata, «Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 29, n^o 3, pp. 317-325, 1980.
- [40] Cadence PCB Design & Analysis, «What is Signal to Noise Ratio and How to calculate it?,» [En línea]. Available: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-what-is-signal-to-noise-ratio-and-how-to-calculate-it>. [Último acceso: 11 abril 2022].
- [41] J. Price y T. Goble, *Telecommunications Engineer's Reference Book*, F. Mazda, Ed., 1993.

Apéndices

A. Simulaciones en MATLAB

A.1 Código 1: Creación de las señales

```
index = 1;
for i = 1:1:length(k)
    index = 1;
    for n = 1:1:num_samples
        LoRaSymbol(i,index) = exp(j*2*pi*k(i)*n/N);
        index = index + 1;
    end
end

AllLoRaSended = [];
for i = 1:1:length(k)
    AllLoRaSended = [AllLoRaSended LoRaSymbol(i,:)];
end

index = 1;
for n = 1:1:num_samples
    upChirp(index) = exp(j*pi*(n^2)/N);
    index = index + 1;
end

x_send = [];
for i = 1:1:length(k)
    temp = LoRaSymbol(i,:) .* upChirp;
    x_send = [x_send; temp];
end

X_Sended = [];
for i = 1:1:length(k)
    X_Sended = [X_Sended x_send(i,:)];
end
```

A.2 Código 2: Pérdidas por propagación para el modelo Okumura – Hata

```
function [recibe_OK,MPL,Prx_Okumura,MCL,MND] =  
PathLoss_OkumuraHata(Gtx,Ptx,Grx,d,fc,hb,hm,SF,BW,NF)  
  
if fc <= 200  
    ahm = 8.29*((log10(1.54*hm))^2)-1.1;  
elseif fc >= 400  
    ahm = 3.2*((log10(11.75*hm))^2)-4.97;  
else  
    ahm = 0;  
end  
  
A = 69.55 + 26.16*log10(fc) - 13.82*log10(hb) - ahm;  
B = 44.9 - 6.55*log10(hb);  
C = 0;  
  
MPL = A + B*log10(d/1000) + C; %Estan son las pérdidas en dB  
Prx_Okumura = watt2dB(Ptx,1)+watt2dB(Gtx,1)+watt2dB(Grx,1)+MPL;  
  
if SF == 7  
    SNR = -6;  
elseif SF == 8  
    SNR = -9;  
elseif SF == 9  
    SNR = -12;  
elseif SF == 10  
    SNR = -15;  
elseif SF == 11  
    SNR = -17.5;  
elseif SF == 12  
    SNR = -20;  
else  
    SNR = 0;  
end  
  
S = -174 + 10*log10(BW) + NF + SNR;  
  
MCL = Ptx - S;  
  
MND = 10^((MCL - A)/B) * 1000;  
  
if Prx_Okumura < MCL  
    recibe_OK = 1;  
else  
    recibe_OK = 0;  
end  
end
```

A.3 Código 3: Pérdidas por propagación para el modelo Log – Distance

```
function [recibe_OK,Prx_logdistance] =  
PathLoss_LogDistance(Gtx,Ptx,Grx,d,fc,sens)  
  
lambda = 300 / fc;  
media = 0;  
delta = 8;  
  
mu = 3;  
Prx_logdistance = Ptx*Gtx*Grx/(d^mu)*(lambda/(4*pi))^2;  
Prx_logdistance = watt2dB(Prx_logdistance,1);  
s = watt2dB(sens,1)  
if Prx_logdistance > s  
    recibe_OK = 1  
else  
    recibe_OK = 0  
end  
end
```

Anexos

A. Publicaciones

Se realizaron tres artículos para presentación en congresos internacionales, dos de ellos ya fueron aceptados y publicados, mientras que el tercero está en revisión.

- Artículo 1: *5G Downlink Power Quality Evaluation for 3D Environments* publicado (Evaluación de la calidad en la potencia de bajada 5G para ambientes 3D) en el Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya, del 10 al 11 de noviembre de 2021.
- Artículo 2: *LoRaWAN Downlink Power Quality Evaluation for 3D Environments* (Evaluación de la calidad en la potencia de bajada LoRaWAN para ambientes 3D) en el XII Congreso Nacional de Ciencias de la Computación, CONACIC, del 3 al 7 de octubre del 2022.
- Artículo 3 (en revisión): *Simulation Tool Design for LPWAN Networks in 3D Environments* (Diseño de una herramienta de simulación para redes LPWAN en ambientes 3D).

A continuación, se presentan los artículos 1 y 2, así como la portada del artículo 3:

Anexo A: Artículo 1

Diseminación de la Investigación
en la Educación Superior - Celaya 2021

© Academia Journals 2021

Celaya, Guanajuato, México
10 al 12 de noviembre de 2021

5G Downlink Power Quality Evaluation for 3D Environments

Dra. Josefina Castañeda Camacho¹, Lic. Alejandro Sánchez Mendoza²,
Lic. Daniel Hernández Rodríguez³, Lic. Ralph Saviñon Lopez⁴, M.C. Ana María Rodríguez Domínguez⁵,
M.C. Selene Edith Maya Rueda⁶ y Dr. Gerardo Mino Aguilar⁷

Abstract— 5G networks deployment is imminent, this new technology enhances other communication schemes such as Internet of Things and Machine to Machine applications. Generally, these systems require long communications range, low energy consumption and cost effectiveness. LPWAN and Ad-Hoc networks paradigms include communication technologies that require precise network dimensioning for its correct operation; work presented aims to be a useful guide for network performance evaluation using non-deterministic models. Shadowing effects, distance losses, antenna gain and 3D end devices distribution were considered for the mathematical model. Outage Probability for the received power at the end device for different thresholds, in accordance with different wireless cellular technology was evaluated through discrete events Montecarlo simulations. Lastly a comparison between scenarios is presented, with the goal to define which technology presents better capacity to achieve a successful down link communication.

Keywords— 5G, Power Quality, Network Evaluation, 3D Environment

Introduction

In the past few decades mobile communication has become an irreplaceable tool for connecting people, machines and many other devices through social media, cellular networks, and other wireless technologies, in this way wireless technologies acquired a high relevance in the daily life.

Recently, the imminent deployment of the fifth-generation mobile networks commonly known as 5G, causes an upcoming digital revolution since 5G is designed to bring facilities to create efficient and intelligent networks between smart devices and applications and serve a huge number of users in wide areas and many different environments [1].

5G technology will enhance the development of other technology paradigms such as ad-hoc networks in dynamic scenarios such as smart cities and smart transportation, massive Internet of Things that introduces the ultra-dense network problem and wide area networks prioritizing battery autonomy in the end user's devices.

Since the imminent deployment of the fifth generation of mobile communications lots of protocols and technologies are emerging and some other that already existed are capable to adapt to the new needs that are incoming, for example LoRaWan is a specification dedicated to low power wide area networks, ZigBee is another case of existing technologies working in 5G context specifically for IoT applications and finally IEEE 802.11 standard and its variations are applied for ad-hoc networks and other networking techniques.

For all these cases it is fundamental to ensure network links quality even more if critical scenarios in which these networks are applied are considered. In this work down link quality is evaluated for ZigBee, LoRaWan and 802.11 schemes, concretely the outage probability when end users move in a 3D environment employing non-deterministic models for down link characterization [2].

¹ Dra. Josefina Castañeda Camacho is Professor at “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México josefinacastaneda@yahoo.com.mx

² Ing. Alejandro Sánchez Mendoza is Student of the “Maestría en Ingeniería Electrónica” at “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México alejandro.sanchezme@alumno.buap.mx

³ Lic. Daniel Hernández Rodríguez is Student of the “Maestría en Ingeniería Electrónica” at “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México daniel.hernandezrodriguez@viep.com.mx (autor correspondiente)

⁴ Lic. Ralph Saviñon Lopez is Student of the “Maestría en Ingeniería Electrónica” at “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México. ralph.savinonlopez@viep.com.mx

⁵ M.C. Ana María Rodríguez Domínguez is Professor at “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México anamaria.rodriguez@correo.buap.mx

⁶ M.C. Selene Edith Maya Rueda is Professor at “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México selene.maya@correo.buap.mx

⁷ Dr. Gerardo Mino Aguilar is Professor at “Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México gerardo.mino@correo.buap.mx

This work is structured as follows. Second section presents the mathematical model of our system. Third section includes the simulation set-up and results and finally the conclusions.

Mathematical model

In our simulation the coexistence of mobile and fixed end devices with a defined and undefined trajectory is analyzed. This analysis implies the received power evaluation considering the shadowing effects, distance losses, antenna gain (as a function of the user position) and 3D end devices distribution.

Inside the simulation the coexistence of mobile and fixed end devices is analyzed. Mobile devices movement is set on randomly in all three axes X,Y and Z. The analysis implies the received power evaluation considering the shadowing effects, distance losses, antenna gain (as a function of the user position) and 3D end devices distribution. The received power is expressed in the equation (1).

$$P_{RxM} = \frac{P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx}}{d^\mu} 10^{\frac{\zeta}{10}} \tag{1}$$

where P_{Tx} is the transmission power, G_{Tx} and G_{Rx} are the antenna gains for the transmitter and the receiver respectively, d is the distance between the antenna and the end device, μ is the propagation losses exponent and ζ is the characteristic Gaussian random variable of the log-normal distribution which models the shadowing effects as shown in Figure 1.

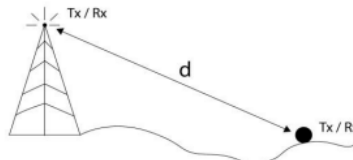


Figure 1. Scheme of the distance between the antenna and the end device.

The transmitted antenna gain is considered as a parabolic function which depends on the angle $\phi_{l,n}$ between the end device and the antenna, this function is expressed in equation (2).

$$G_{Tx}(\phi_{l,n}) = \begin{cases} 1 - \frac{(1-q)}{\left(\frac{\pi}{3}\right)^2} \phi_{l,n}^2; & \text{si } |\phi_{l,n}| \leq \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \frac{\pi}{3} \\ p; & \text{si } |\phi_{l,n}| > \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \frac{\pi}{3} \end{cases} \tag{2}$$

where q represents the gain level of the antenna at a 60° sector and p is the mean normalized gain of the side lobes [3].

In this simulation it has been evaluated the probability of the received power to be higher than the threshold given by the sensibility to guarantee the recovery of the signal and the link quality. This probability is given by the equation (3).

$$P(P_{rxM} > P_{min}) = \int_{P_{min}}^{\infty} f_{P_{rxM}}(x) dx \tag{3}$$

Solving equation (3), we have the equation (4) [4].

$$P(P_{rxM} > P_{min}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{P_{min}-m_p}{\sigma_p}}^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du = Q\left(\frac{P_{min}-m_p}{\sigma_p}\right) \quad (4)$$

where,

$$m_p = 10 \log\left(\frac{P_{tx}G_{tx}G_{rx}}{d^\mu}\right) + m_\zeta$$

$$\sigma_p^2 = E\{P_{rxM} dB^2\} - E^2\{P_{rxM} dB\} = \sigma_\zeta$$

In addition, the battery lifetime is associated with the energy consumption of the end devices. Battery capacity is measured in mAh (milliAmperes / hour), with a capacity between 3000 and 4500 mAh for current mobiles [5]. Battery life is how long a battery lasts until you replace it with a new one. Battery life is how long a mobile device works without recharging. The useful life of the battery is related to the chemical age, the number of charge cycles, and other factors, in this situation it is considered important to make an adequate consumption in the equipment without consuming excessive power to increase the life of the battery [6].

Simulation Set-Up

Simulation Scenario

We have developed a discrete event Montecarlo simulation to evaluate the equation (4). For the simulation scenario, we are considering a communication environment divided in microcellular cells modeled as hexagonal prisms as shown in Fig. 2.

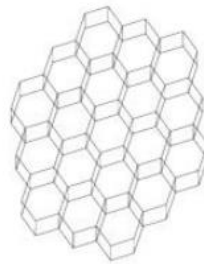


Fig. 2 Hexagonal cells region.

The simulation occurs in a single cell with a 1km radius and 10 meters height. Also, considering a 120 degrees sectorization remarked in red. This sector matches with the antenna propagation pattern placed in the center of the cell (black dot); this scenario is shown in Figure 3.

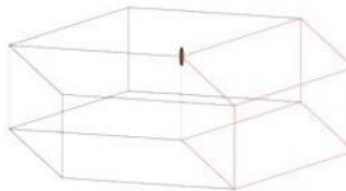


Figure 3. Simulation 3D environment.

Once the simulation environment was set three experiments were run, all of them use the mathematical model presented before. The first one corresponding to the LoRaWAN scenario, the second one to the ZigBee technology and the third one to the IEEE 802.11p standard which sensitivities and transmission powers described in the Table 1.

Table 1. Parameters of each technology.

Technology	Power transmitted [mW]	Sensitivity [W]
LoRaWAN [7]	20	1e-12
ZigBee [8]	63	7.9e-14
IEEE 802.11 [9]	316	1.99e-13

Results

Mean Prx and Outage Probability

To obtain the results of the simulation for the different technologies (LoRaWAN, ZigBee and IEEE 802.11), distance from 100 to 2000 meters were considered, for the mobile devices scenarios, with 1000 events.

The Figure 4 represents the 3D environment with 100 users, where the relation of the mobile and the fix users was randomly chosen within a radius of 100 meters. For the mobile users only, its last position is illustrated.

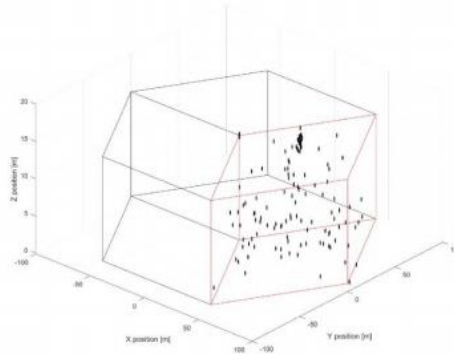


Figure 4. 3D environment for 100 users inside a radius of 100 meters.

The Figure 5 shows the Distance vs Probability for the fix (red) and mobile (blue) users. As the probability is almost equal to 100%, then the power received is always above the P_{min} threshold.

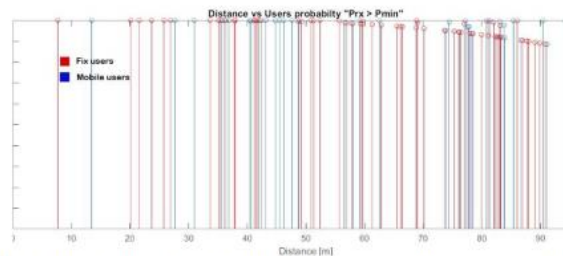


Figure 5. Distance vs Users " $P_{rx} > P_{min}$ " probability, with a radius of 100 meters for LoRaWAN technology.

If the radius is incremented, then the distance will increment as well causing that the probability of $P_{rx} > P_{min}$ decrease as shown in Figure 6, this will occur for the fix users (red) and the mobile users (blue).

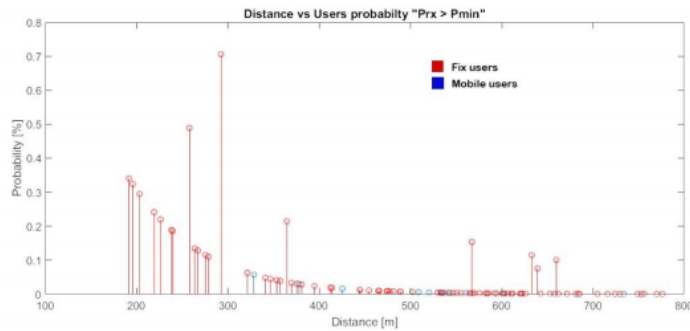


Figure 6. Distance vs Users " $P_{rx} > P_{min}$ " probability with a radius of 800 meters for LoRaWAN technology.

Finally, the Table 2, Table 3 and Table 4 describes the results for the outage probability and the mean power of the mobile and the fixed devices that were obtained.

Table 2. Results obtained for the LoRaWAN technology.

Number of users	Number of events	Radius [m]	Mean Prx (fix users) [W]	Mean Prx (mobile users) [W]	Mean Prx [W]	Outage Probability
10	1000	100	1.94e-9	3.89e-10	1.16e-9	1.9%
50	1000	100	8.89e-9	9.68e-10	4.93e-9	1.1%
100	1000	100	5.75e-8	4.58e-9	3.10e-8	2.5%
1000	1000	100	6.42e-7	1.14e-8	3.26e-7	1.9%
100	1000	200	1.62e-9	3.64e-11	8.20e-10	41.1%
100	1000	400	1.93e-12	7.04e-12	4.48e-12	82.3%
100	1000	500	6.33e-10	1.01e-13	3.16e-10	89.7%
100	1000	1000	2.79e-13	2.83e-14	1.54e-13	97.7%

Table 3. Results obtained for the ZibBee technology.

Number of users	Number of events	Radius [m]	Mean Prx (fix users) [W]	Mean Prx (mobile users) [W]	Mean Prx [W]	Outage Probability
10	1000	100	1.38e-10	1.76e-10	1.57e-10	0.1%
50	1000	100	9.96e-8	1.24e-8	5.60e-8	0.1%
100	1000	100	1.65e-7	4.92e-8	1.07e-7	0.1%
1000	1000	100	1.35e-6	1.26e-8	6.84e-7	0.1%
100	1000	200	7.32e-9	2.10e-10	3.77e-9	0.6%
100	1000	500	3.93e-10	1.70e-12	1.97e-10	34.7%
100	1000	1000	1.07e-11	2.57e-14	5.38e-12	82.5%
100	1000	2000	1.88e-14	4.65e-15	1.17e-14	99.2%

Table 4. Results obtained for the IEEE 802.11 standard.

Number of users	Number of events	Radius [m]	Mean Prx (fix users) [W]	Mean Prx (mobile users) [W]	Mean Prx [W]	Outage Probability
10	1000	100	4.17e-8	9.64e-10	2.13e-8	0.1%
50	1000	100	3.67e-7	6.71e-7	5.19e-7	0.1%
100	1000	100	1.52e-7	2.03e-7	1.78e-7	0.1%
1000	1000	100	3.25e-6	8.48e-8	1.67e-6	0.1%
100	1000	300	1.18e-8	1.96e-9	6.90e-9	1.2%
100	1000	500	1.93e-9	2.09e-12	9.68e-10	32.2%
100	1000	1000	2.37e-12	1.81e-12	2.09e-12	52.9%
100	1000	2000	4.37e-14	5.46e-11	2.73e-11	85.9%

Conclusions

We have observed for the LoRa technology that the received power above the threshold that guarantees an outage probability lower than 2% is achieved for distances below 100 meters; at ZigBee and IEEE 802.11 technologies this threshold will be overcome for distances above 300 and 200 meters respectively. To achieve higher distances will be necessary to increment the transmitted power level which will impact on the power consumption and the battery life as well. Future works will include other channel effects as fast fading and the SIR (signal to interference ratio) evaluation.

References

- [1] A. Habbal, S. Indidhar Goudar y S. Hassan, «A Context-aware Radio Access Technology selection mechanism in 5G mobile network for smart city applications.» *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 135, pp. 97-107, 2019.
- [2] Q. Vu Khanh, T. B. Nguyen y N. Dinh Han, «An Advanced Energy Efficient and High Performance Routing Protocol for MANET in 5G.» *Journal of Communications*, vol. 13, n° 12, pp. 743-749, 2018.
- [3] J. Castaneda Camacho, U. Rios y L. Lara Rodriguez, «Reverse link erlang capacity of multiclass CDMA cellular system considering nonideal antenna sectorization.» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 52, n° 6, pp. 1476-1488, 2003.
- [4] A. Papoulis y U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, New York: McGraw-Hill, 2002.
- [5] E. López Orgaz, *Estudio del consumo de energía en un dispositivo Android*, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2012.
- [6] Apple, «Batería y rendimiento del iPhone.» 26 october 2021. [En línea]. Available: <https://support.apple.com/es-mx/HT208387>. [Último acceso: 30 october 2021].
- [7] M. Bor y U. Roedig, «LoRa Transmission Parameter Selection.» de *13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, Ottawa, 2017.
- [8] Mouser Electronics, DIGI XBEE® S2C 802.15.4 RF Modules, Digi, 2018.
- [9] Espressif Systems, ESP32 Series, Shanghai: Espressif, 2021.

Anexo A: Artículo 2

LoRaWAN Downlink Power Quality Evaluation for 3D Environments

Daniel Hernández Rodríguez, Josefina Castaneda Camacho,
German Ardul Muñoz Hernández, and Gerardo Mino Aguilar
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, Mexico

{daniel.hernandezrodriguez@viep.com.mx, josefinacastaneda@yahoo.com.mx,
germanardul.munoz@correo.buap.mx, gerardo.mino@correo.buap.mx}

<http://www.buap.mx>

Abstract. The exponential growth of the number of mobile devices has improved the development of technologies adapted to the new environmental requirements, Low Power Wide Area Networks have become an essential area of study and investigation due to its diverse types of applications, including the IoT (Internet-of-Things) environments, sensors monitoring, medical applications, etc. There are some tools for the analysis of the implementation of this technology that helps to identify its advantages and disadvantages within its implementation parameters. This paper presents a downlink power quality evaluation of the received signal in a 3D environment using the LoRaWAN parameters. Two propagation models log-distance and Okumura-Hata are included to measure the outage probability.

Keywords: LPWAN, LoRaWAN, 3D Environment, Network Evaluation

1 Introduction

Low Power Wide Area Networks (LPWAN) are an important type of wireless communications that has been growing up in the last few years due to its applications and advantages. This network technology offers an improvement on the covered area (10 to 40 km in rural areas and 1 to 5 km in urban areas), also its easy scalability at a low cost [1] [2].

Several companies are working with LPWAN networks such as the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), the European Telecommunication Standards Institute (ETSI), 3rd Generation Partnership Project (3GPP), the Internet Engineering Task Force (IETF), and LoRa Alliance. These companies developed their standards. SigFox, LoRaWAN, and NB-IoT, offering efficient solutions to connect multiple smart devices [3] [4].

In a previous paper was presented an outage probability analysis for a 3D environment for some technologies. This paper improves that analysis for LPWAN networks, using the requirements and parameters of the LoRaWAN technology created by LoRa Alliance [5].

When a network is being analyzed there are some affectations that must be included, one of those is the propagation losses that are generated in the wireless environment and it is caused by the distance of the devices, the antenna height, the devices height, and some other environment interferences. This could be done by using some mathematical models that represent these affectations. Most of the LoRaWAN networks simulation tools, such as LoRaSIM uses the log-distance propagation model, but this is a bad approximation for a wide area analysis because it becomes inaccurate at long distances, a more realistic model for these kinds of networks is the Okumura-Hata model which is analyzed further in this paper [6].

This work is structured as follows. Second section presents the mathematical model of our system. Third section includes the simulation set-up and results, and finally in the last section is presented the conclusions.

2 Mathematical model

In our simulation the coexistence of mobile and fixed end devices with a defined and undefined trajectory is analyzed. Inside the simulation the coexistence of mobile and fixed end devices is analyzed. Mobile devices movement is set on randomly in all three axes X, Y and Z. The analysis implies the received power evaluation considering the shadowing effects, distance losses using the log-distance and Okumura-Hata models, antenna gain (as a function of the user position) and 3D end devices distribution. The received power is expressed in the equation (1).

$$P_{RxM} = \frac{P_{Tx} \cdot G_{Tx} \cdot G_{Rx}}{d^\mu} \cdot 10^{\frac{\zeta}{10}} \quad (1)$$

where P_x is the transmission power, G_{Tx} and G_{Rx} are the antenna gains for the transmitter and the receiver respectively, d is the distance between the antenna and the end device, μ is the propagation losses exponent and ζ is the characteristic Gaussian random variable of the log-normal distribution which models the shadowing effects as shown in Fig. 1.

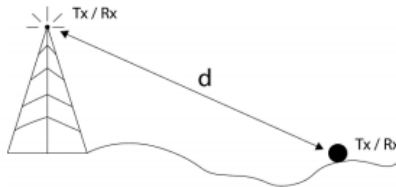


Fig.1. Scheme of the distance between the antenna and the end device

The transmitted antenna gain is considered as a parabolic function which depends on the angle $\phi_{l,n}$ between the end device and the antenna, this function is expressed in equation (2).

$$G_{tx}(\phi_{l,n}) = \begin{cases} 1 - \frac{(1-q)}{(\frac{\pi}{3})^2} \cdot \phi_{l,n}^2 & \text{si } \phi_{l,n} \leq \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \frac{\pi}{3} \\ p & \text{si } \phi_{l,n} > \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \frac{\pi}{3} \end{cases} \quad (2)$$

where q represents the gain level of the antenna at a 60° sector and p is the mean normalized gain of the side lobes [7].

In this simulation it has been evaluated the probability of the received power to be higher than the threshold given by the sensibility to guarantee the recovery of the signal and the link quality. This probability is given by the equation (3).

$$P(P_{rxM} > P_{min}) = \int_{P_{min}}^{\infty} f_{P_{rxM}}(x) dx \quad (3)$$

Solving equation (3), we have the equation (4)

$$P(P_{rxM} > P_{min}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{P_{min}-m_P}{\sigma_P}}^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du = Q\left(\frac{P_{min}-m_P}{\sigma_P}\right) \quad (4)$$

where,

$$\begin{aligned} m_P &= 10 \log\left(\frac{P_{tx} G_{tx} G_{rx}}{d^\alpha}\right) + m_\zeta \\ \sigma_P^2 &= E\{P_{rxM} dB^2\} - E^2\{P_{rxM} dB\} = \sigma_\zeta \end{aligned}$$

The Okumura-Hata is based on empirical data that could be used to model the mobile propagation signals on rural and urban areas as a function of correction factor, the antenna height, end devices height, and the frequency [8]. The equation (7) describes the behavior of the Maximum Path Loss (MPL):

$$MPL_{dB} = A + B \cdot \log(d) + C \quad (5)$$

where, A, B, and C is described as follow:

$$\begin{aligned} A &= 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) \\ B &= 44.9 - 6.55 \log(h_b) \\ C &= 0 \end{aligned}$$

C depends on the chosen environment, in this case, for metropolitan areas, f_c represents the central frequency given in MHz, d represents the distance in kilometers, h_b represents the antenna height or gateway in meters, h_m is the mobile height in meters and $a(h_m)$ is a function that represents the correction factor due to the antenna height and depends on the frequency of the communication, this function is given by the equation (6) [9].

$$a(h_m) = \begin{cases} 8.29(\log(1.54h_m))^2 - 1.1 & \text{para } f_c \leq 200MHz \\ 3.2(\log(11.75h_m))^2 - 4.97 & \text{para } f_c \geq 400MHz \end{cases} \quad (6)$$

The Fig. 2 shows graphically the parameters used to calculate the values of the Okumura-Hata model.

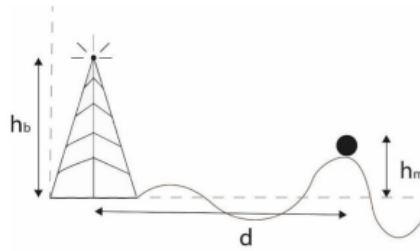


Fig.2. Illustration of the parameters used in the Okumura-Hata model

In the Table 1 are shown the maximum and minimum parameters that could be analyzed using Okumura - Hata model. Due it values, LoRaWAN Network could be analyzed with this model.

Table 1. Maximum and minimum values for Okumura-Hata parameters

Parameter	Symbol	Minimum value	Maximum value
Frequency	f	150 MHz	1500 MHz
Antenna height	h_b	30 m	200 m
Device height	h_m	1 m	10 m

2.1 LoRaWAN Network

For a LoRaWAN simulation some parameters must be considered such as the frequency and bandwidth which depends on the unlicensed Industrial, Scientific and Medical (ISM) bands regulations for different areas, in US the accepted frequency is from 902 MHz to 928 MHz and the bandwidth is 125 kHz or 250 kHz, the spreading factor that defines the number of bits that could be transmitted on each symbol that could take values from 7 to 12, number of preambles that are used for the synchronization of the signal, the payload, the power of the transmitted signal and the sensibility that defines the minimum power level that could be received successfully.

3 Simulation Set-Up

3.1 Simulation Scenario

For the simulation scenario we used the model developed in a previous paper which consider an environment divided in microcellular cells modeled as hexagonal prisms as shown in Fig. 3 [5].

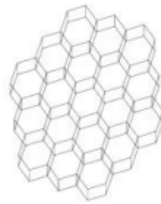


Fig.3. Hexagonal cells region

The simulation occurs in a single cell with an adjustable radius, frequency, antenna height and device height. Considering a 120 degrees sectorization remarked in red color. This sector matches with the antenna propagation pattern placed in the center of the cell (black dot); this scenario is shown in Fig. 4 [5].

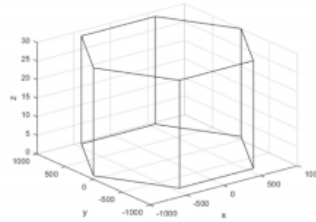


Fig. 4. Simulation 3D environment

Once the simulation environment was set, several experiments were run, all of them using the mathematical model presented before. The value of the different parameters used are shown in the Table 2.

Table 2. Maximum and minimum values for Okumura-Hata parameters

Parameter	Value
Number of users	10-1000
Radius	100 - 1000 m
Frequency	902 MHz
Spreading Factor	12
Bandwidth	125 kHz
Transmission power	25.1mW / 14dB
Sensibility	1.98e-14W

4 Results

The Fig. 5 represent the 3D environment with 100 users, the relation between mobile and fix users was randomly chosen within a radius of 1 km.

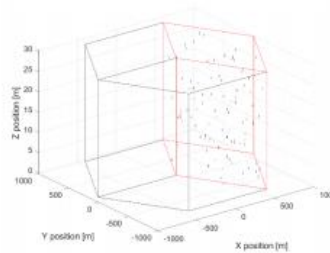


Fig.5. 3D environment for 100 users inside a radius of 1 km

A comparison between both path loss models (Okumura-Hata in blue and log-distance in red) was done using different ratios, in the Fig. 6 is shown the behavior of both models at a 100 meters ratio, the black line represents the sensibility of the system, in this case the result of both models is above the minimum power, therefore the signal will be correctly received.

If the ratio grown the outage probability for both models grown as well, for the log-distance model if the ratio is bigger than 300 meters the losses will be greater than the sensibility, in the Okumura-Hata model the losses at 300 meters are approximately 80 dB which is further from the sensibility (137 dB) as shown in Fig. 7.

The analysis which includes the log-distance and the Okumura-Hata models is presented in Table 3 for the log-distance and in the Table 4 for the Okumura-Hata. These results shown that the Okumura-Hata model works better for long distances.

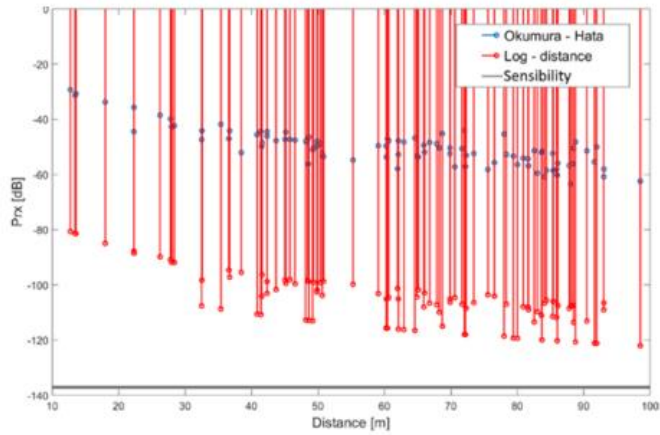


Fig.6. Received power for Log-Distance and Okumura-Hata for mobile users in a 100 meters radius

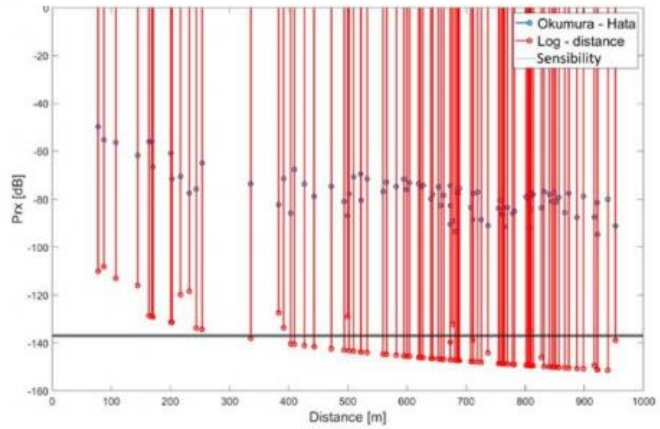


Fig.7. Received power for Log-Distance and Okumura-Hata for mobile users in a 1000 meters radius

Table 3. Results for LoRaWAN using log-distance model

Users	Events	Ratio [m]	Mean Prx [W]	Outage probability
10	1000	100	1.16e-9	1.9%
50	1000	100	4.93e-9	1.1%
100	1000	100	3.10e-8	2.5%
1000	1000	100	3.26e-7	1.9%
100	1000	200	8.20e-10	41.1%
100	1000	400	4.48e-12	82.3%
100	1000	500	3.16e-10	89.7%
100	1000	1000	1.54e-13	97.7%

Table 4. Results for LoRaWAN using Okumura-Hata model

Users	Events	Ratio [m]	Mean Prx [W]	Outage probability
10	1000	100	4.70e-21	0%
50	1000	100	1.79e-19	0%
1000	1000	100	1.92e-20	0.01%
100	1000	200	6.24e-22	1%
100	1000	400	1.43e-23	9%
100	1000	500	2.66e-24	22%
100	1000	1000	2.31e-24	46%

5 Conclusions

We have observed for the log-distance that the outage probability increases over the 40% when the distance is greater than 200 meters which means that is not a reliable technology for long distances, considering that LoRaWAN was created for LPWAN technologies which its name represent wide areas log-distance is not a model that represents its behavior, the opposite occurs with Okumura-Hata which outage probability at the same distance (200 meters) is 1%, therefore in the study of LPWAN networks should be used the Okumura-Hata model.

References

1. Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., Meyer, F.: A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express* (2018)
2. Kosari, A., Wetzloff, D.: MURS Band for LPWAN Applications. *IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet)*. Orlando (2019)
3. Yasmin, R., Petajajarvi, J., Mikhaylov, K., Pouttu, A.: On the integration of LoRaWAN with the 5G test network. *IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*. Montreal (2017)

4. Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., Meyer, F.: Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: SigFox, LoRaWAN, and NB-IoT. IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops). Athens (2018)
5. Castaneda Camacho, J., Hernandez Rodriguez, D., Sanchez Mendoza, A., SavinonLopez, R., Rodriguez Dominguez, A., Maya Rueda, S., Mino Aguilar, G.: 5G Downlink Power Quality Evaluation for 3D Environments. *Diseminacion de la Investigacion en la Educacion Superior. Celaya* (2021)
6. Bor, M., Roedig, U., Voigt, T., Alonso, J.: Do LoRa low-power wide-area networks scale?. MSWiM 16 Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. 11, 59-67 (2016)
7. Habbal, A., Indidhar Goudar, S., Hassan, S.: A Context-aware Radio Access Technology selection mechanism in 5G mobile network for smart city applications. *Journal of Network and Computer Applications*. 135, 97-107 (2019)
8. Lee, C.: *Mobile Communications Engineering Theory and Applications*. McGrawHill (1998)
9. Francisco, S., Pinho, P., Luis, M.: Improving LoRa Network Simulator for a More Realistic Approach on LoRaWAN. *Telecoms Conference (ConfTELE)*. Leiria (2021)

Anexo A: Artículo 3

Simulation Tool Design for LPWAN Networks in 3D Environments

Daniel Hernández Rodríguez, Josefina Castaneda Camacho,

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Puebla, Mexico

{daniel.hernandezrodriguez@viep.com.mx, josefinacastaneda@yahoo.com.mx}

<http://www.buap.mx>

Abstract. *Low Power Wide Area Networks (LPWAN) are a technology that has been growing up exponentially, from 2017 to 2023 its market size grown 109% due to its main characteristics such as possibility to cover up to 40 kilometers with a low power consumption in batteries that could last up to 10 – years, due to its advantages there are several companies developing standards for this technology, three of the most used are SigFox, LoRaWAN and NB-IoT, each one of them has its advantages and drawbacks. In this paper is presented a simulation of a LoRaWAN communication in a 3D environment which consider shadowing effects, propagation losses with Okumura – Hata and Log – Distance models, Chirp Spread Spectrum modulation robustness and outage probability considering the antenna and end – devices height.*

Keywords: *LoRaWAN, CSS, LPWAN, 5G*

State of the art

LPWAN technology has been growing up in the last few years due its characteristics, most of the papers of the works using this technology do not implement the model that they proposed, just are limited to the analysis of the network or the design.

The variety of applications of LPWAN networks is wide, includes agriculture & forestry, building & infrastructure, healthcare,

home & consumer, industrial, retail, smart cities, transportation, supply chain & logistics, and utilities [1]. The three most used LPWAN technologies are LoRaWAN, NB-IoT and SigFox, to choose one of them it depends on the specific application and its requirements.

Most of the designs of LoRaWAN published are used for implementation in monitoring systems because its data rate is from 300 bps to 37.5 kbps which is small compared with other technologies such as WiFi or cellular networks, so it reduces its implementation to applications that do not require to send images or videos. That is the main reason that LoRaWAN is used when a sensor must be monitored in specific applications such as a Based Air Quality Monitoring System as in paper [2], or the Design of a River Water Monitoring Robot in paper [3]. One of the problems of LoRaWAN is that the results obtained when an mobile device is used as in the Internet of Things implementations is not optimal [4], in this cases another technology is used, *4G*, if mobile users are needed as in Experiments of Tracking Platforms the technology used will be SigFox as in paper [5], nevertheless LoRaWAN is an important technology with a great reliability in IoT applications which requires low power consumption and long range deployment [6],

B. Conferencia

- Se impartió una conferencia titulada “¿Qué son las redes LPWAN?” en el Instituto Tecnológico Nacional de México a través del Instituto Tecnológico Superior de Atlixco en modalidad virtual el día 26 de noviembre del 2021.

A continuación, se muestra la constancia de la conferencia:

