



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**“Análisis Experimental de la Movilidad de un Terminal Utilizando el
Protocolo LoRa”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autor:

CHRISTIAN JORGE HEREDIA BARRIGA

Director:

Ing. DANIEL ITURRALDE PIEDRA. Ph. D.

CUENCA, ECUADOR

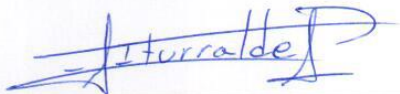
2019

Análisis Experimental de la Movilidad de un Terminal Utilizando el Protocolo LoRa.

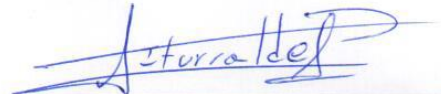
RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis experimental de la movilidad de un terminal utilizando el protocolo LoRa. Se elaboró un modelo experimental de pruebas mediante un nodo móvil, una puerta de enlace, un servidor y una base de datos. Se realizaron pruebas, donde la información fue adquirida, transmitida, procesada, presentada y almacenada. El objetivo principal fue identificar la influencia que tienen, las condiciones de propagación, la velocidad, la distancia y el cambio de celda sobre la potencia recibida y la pérdida de paquetes. Los resultados obtenidos en este trabajo factibilizan el uso de LoRa en aplicaciones de movilidad urbana.

Palabras clave: *LoRa, movilidad, diseño experimental.*



Ing. Daniel Iturralde Piedra. Ph.D
Coordinador de Carrera



Ing. Daniel Iturralde Piedra. Ph.D
Director de Trabajo de Titulación



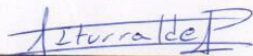
Christian Jorge Heredia Barriga
Autor

Experimental Analysis of the Mobility of a Terminal Using the LoRa Protocol.

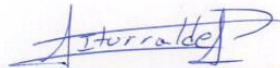
ABSTRACT

This paper presents an experimental analysis of the mobility of a terminal using the LoRa protocol. An experimental test model was developed using a mobile node, a gateway, a server and a database. Tests were performed where the information was acquired, transmitted, processed, presented and stored. The main objective was to identify the influence of propagation conditions, speed, distance and cell switching on the received power and packet loss. The results obtained in this work show the feasibility of using LoRa in urban mobility applications.

Keywords: *LoRa, mobility, experimental design.*



Ing. Daniel Iturralde Piedra. Ph.D
Faculty Coordinator




Ing. Daniel Iturralde Piedra. Ph.D
Thesis Director



Christian Jorge Heredia Barriga
Author



Universidad del Azuay
Dpto. Idiomas



Translated by
Ing. Paúl Arpi

Análisis Experimental de la Movilidad de un Terminal Utilizando el Protocolo LoRa

Christian Jorge Heredia Barriga
Escuela de Ingeniería Electrónica,
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador.
cristianhj93@es.uazuay.edu.ec.

Resumen- En este trabajo se presenta un análisis experimental de la movilidad de un terminal utilizando el protocolo LoRa. Se elaboró un modelo experimental de pruebas mediante un nodo móvil, una puerta de enlace, un servidor y una base de datos. Se realizaron pruebas, donde la información fue adquirida, transmitida, procesada, presentada y almacenada. El objetivo principal fue identificar la influencia que tienen, las condiciones de propagación, la velocidad, la distancia y el cambio de celda sobre la potencia recibida y la pérdida de paquetes. Los resultados obtenidos en este trabajo factibilizan el uso de LoRa en aplicaciones de movilidad urbana.

Palabras Clave- LoRa, movilidad, diseño experimental.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, para la prestación de diferentes servicios públicos y privados, se recurre al Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) como solución en el manejo y gestión de la información. El mayor de los problemas que surge en el uso de esta tecnología es la necesidad de contar con redes de gran cobertura para servicios como transporte, geolocalización, monitoreo ambiental, entre otros. De momento, solo existen las redes de las compañías de servicios de telecomunicaciones que ofrecen los servicios con altos costos, limitando su utilidad en los citados casos.

Paralelamente, en el avance de las tecnologías de la comunicación, el protocolo LoRa se ha presentado como el más eficaz en IoT por su baja tasa de transmisión de datos, gran cobertura y ahorro en el consumo de energía. Por lo tanto, la creación de una red LoRa de gran cobertura llegaría a ser una herramienta útil para la prestación de servicios que funcionan dentro de las ciudades modernas.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende fomentar el crecimiento de las ciudades inteligentes, desarrollando la tecnología IoT para el manejo de datos en la prestación más eficiente de servicios públicos o privados. De la misma manera se ampliarán las facilidades a los usuarios y se dará apertura al crecimiento de nuevas aplicaciones de movilidad dentro de las ciudades.

Se buscan sentar las bases para la creación de redes LoRa (Long Range) exclusivas para IoT y ciudades inteligentes, con costos accesibles para diferentes aplicaciones, y como alternativa a las redes existentes de las operadoras de servicios de telecomunicaciones tradicionales que ofrecen los servicios de datos con costos elevados, ya que están orientadas a la

transmisión de información a altas velocidades. El trabajo plantea enfocarse en estudios de movilidad utilizando el protocolo LoRa, para de esta manera buscar una mejora en la comunicación de servicios de transporte y de movilidad urbana.

Este trabajo se encuentra estructurado de la siguiente manera: La sección II contiene el estado del arte, la sección III especifica el marco teórico con los conceptos más relevantes y necesarios, la sección IV abarca la descripción del sistema, la sección V contiene el análisis de los resultados y la sección VI las conclusiones obtenidas.

II. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se presentan artículos relacionados al tema de este trabajo.

- **Medición de la movilidad del nodo para el protocolo LoRa**

Estudiantes de la Universidad Politécnica de Bucarest desarrollaron la investigación: “Medición de la movilidad del nodo para el protocolo LoRa”. Para lo cual se utilizó un nodo fijo y un nodo móvil, ubicándolos en diferentes zonas de la ciudad de Bucarest, con lo cual se probó la comunicación mientras el nodo móvil circulaba por áreas delimitadas previamente.

Se realizaron las pruebas utilizando el módulo SX1272 conectado a un microcontrolador mediante el protocolo SPI. Se probó inicialmente con una arquitectura basada en Arduino, pero no fue muy útil por su SRAM de 2kB, posteriormente se utilizó una tarjeta STMicroelectronics con un controlador Cortex-M4 ARM el cual fue mucho más poderoso para implementar la capa LORAWAN.

Se midió la máxima distancia que podía alcanzar la comunicación en la ciudad de Bucarest y en el Parque Natural Comana. En la ciudad de Bucarest se colocó el nodo fijo en el onceavo piso de un edificio, y en el Parque Natural Comana, este fue situado a 6m de altura. El nodo móvil fue trasladado alrededor de los nodos fijos durante las pruebas.

En la figura 1 se observa una representación de la distancia y el RSSI (nivel de potencia [dBm]) en función del número de muestras.

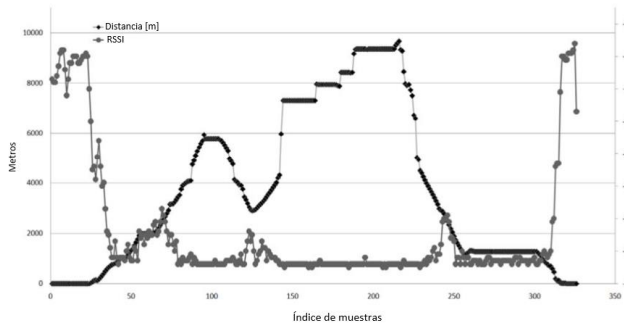


Fig. 1. Gráfico de distancia y RSSI en el Parque Natural Comana.

Con este estudio se lograron alcanzar distancias importantes, se llegó a 4,3 Km en áreas urbanas y 9,7 Km en campo abierto a las afueras de la ciudad. [1]

- **Un estudio de LoRa: redes de largo alcance y baja potencia para Internet de las cosas.**

En el artículo se presenta una visión general de LoRa, un análisis profundo de sus componentes y el rendimiento de la capa física y de enlace de datos.

En la capa física se analiza lo siguiente:

- Descripción general
- Parámetros
- Formato de marco físico
- Evaluación de rendimiento
- Sensibilidad del receptor
- Cobertura de red

Para LoRaWAN se realiza el análisis de:

- Componentes de la red
- Formato de mensaje
- Configuración del dispositivo final
- Comandos MAC
- Rendimiento máximo y MTU de un solo dispositivo
- Capacidad total y carga de canal
- Estimación del rango de colisión
- Rol del servidor web
- Rol del Gateway

Se construyó un sistema de pruebas, con el fin de evaluar la sensibilidad de los receptores de LoRa. Para estas pruebas se utilizó la tarjeta de desarrollo The Freescale KRDM-KL25Z con Semtech SX1276 MBED shield como dispositivo final, como puerta de enlace se utilizó el router industrial Cisco 910, esta puerta de enlace se conectó al servidor provisto por Thingpark a través de Ethernet donde se envió toda la información.

Alrededor de 10000 paquetes fueron enviados desde los dispositivos finales hacia la puerta de enlace, el RSSI (fuerza de la señal recibida) de cada paquete fue capturado mientras los dispositivos finales se mantenían en movimiento. Se colocó la puerta de enlace dentro de una edificación, y los dispositivos finales fuera, en un ambiente urbano. Todos los paquetes fueron enviados con un ancho de banda de 125 kHz, con una tasa de código de 4/5 y con una potencia de transmisión mínima con lo cual se limitó la distancia a cubrir;

como resultado se obtuvo que los paquetes empezaron a perderse a los 100 m. En la figura 2 se muestra un gráfico de RSSI vs factor de propagación.

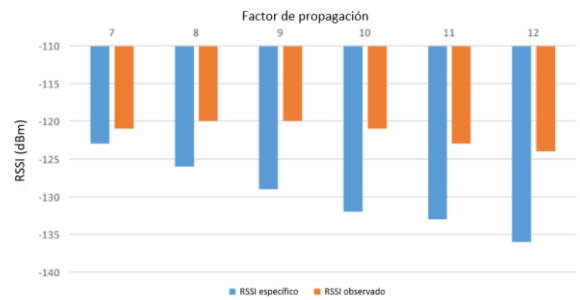


Fig. 2. RSSI en función del factor de propagación.

Para analizar la cobertura de la red se experimentó en un suburbio de París, esta vez se colocó la puerta de enlace en el segundo piso de una casa, cinco diferentes puntos a diferentes distancias fueron elegidos para el dispositivo final, el cual fue transportado en un vehículo. El objetivo de este experimento fue analizar la cobertura de red con diferentes factores de propagación, esto se debió a que en el mundo real los dispositivos finales incrementan el factor de propagación automáticamente si la transmisión falla. En la figura 3 se muestran los resultados.

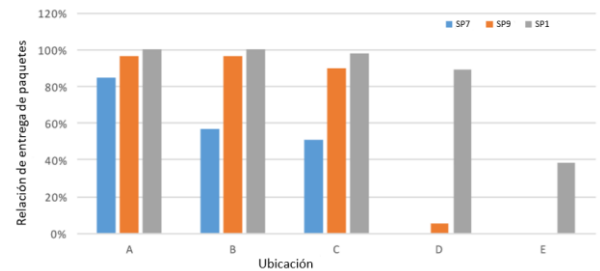


Fig. 3. Factor de propagación incrementando la distancia.

En el análisis de LoRaWAN, el objetivo fue evaluar el rendimiento máximo que se pudo obtener en un solo dispositivo final. Esto se logró haciendo que el dispositivo final envié datos tanto como las limitaciones del canal y del protocolo lo permitan. Se realizaron pruebas con 6 canales de 125 kHz, utilizando factores de dispersión de 7 a 12. Los resultados se observan en la figura 4. [2]

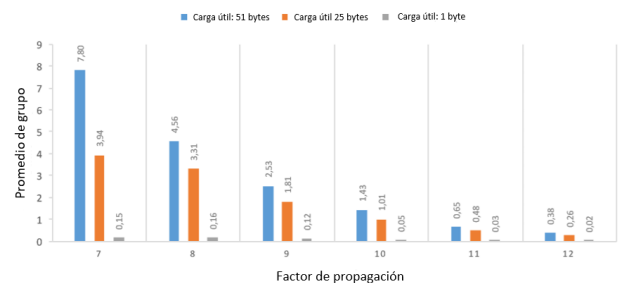


Fig. 4. Rendimiento promedio.

- **Diseño e implementación de un sistema de rastreo de objetos basado en LoRa**

En la Universidad Nacional de Pusan se escribió el artículo “Diseño e implementación de un sistema de rastreo de objetos

basado en LoRa”, en el cual se implementó y se analizó el rendimiento de un sistema de rastreo basado en LoRa a través de la experimentación de campo.

El sistema estuvo estructurado con un dispositivo final, una puerta de enlace, una base de datos, una web de usuario y una aplicación. El dispositivo final estaba compuesto por: un sensor interno de aceleración, un sensor GPS y un módulo LoRa SX1272. Como puerta de enlace, se utilizó Meshlium basado en Linux OS, con un módulo LoRa SX1272 y que además ofrece Bluemix MQTT API como servidor. Para la base de datos se utilizó Mongo DB.

Para el proceso de transmisión se adquirió los datos mediante los dispositivos finales, los cuales enviaron la información a la puerta de enlace utilizando comunicación LoRa. La información fué almacenada en la base de datos y esta fue transferida a Bluemix MQTT API. [3]

- **Sobre la viabilidad de las aplicaciones móviles de detección y seguimiento basadas en LPWAN**

En este artículo, personal de la Universidad de Brescia evaluó el rendimiento de una aplicación LoRaWAN sobre una gran área del mundo real, considerando la movilidad en los nodos.

Se realizó una investigación de redes LPWAN, empezando por un acercamiento a la utilidad de estas en IoT; se elaboró un estado del arte de estudios similares y a base de investigaciones, se redactó un resumen de LoRaWAN, donde se presenta la pila de protocolos y la arquitectura de la red.

Se efectuaron experimentos para poder evaluar el retraso que existe entre un evento que sucede en el campo y la recepción de los datos mediante la aplicación. Todos los datos debieron atravesar el sistema completo de LoRaWAN, el cual está conformado por LoRa Gateway, Network Server y Application Server.

El núcleo del sistema estaba formado por un IoT 2040 de Siemens, que posee un sistema operativo Yocto de Linux. el cual se encontraba conectado con un kit de desarrollo Microchip LoRaWAN.

En conclusión, gracias a todas las pruebas realizadas, se obtuvo que el retraso existente entre la comunicación LoRa es siempre el mismo ya sea con nodos fijos o móviles mientras las variaciones encontradas se deben a la conexión a internet. El retraso promedio es de 300 ms. [4]

- **Desafíos y mejoras en la comunicación con vehículos y dispositivos que se mueven con alta velocidad.**

En este documento elaborado por personal de la Universidad de Ciencias Aplicadas en Frankfurt-Alemania se identifican algunas deficiencias en la comunicación GSM-R para ferrocarriles con usuarios que se encuentran a altas velocidades. Se presentan los diferentes desafíos como: el efecto Doppler, la corta duración en la permanencia de una celda, y el retraso de programación. Para esto se ha diseñado una topología de red especial y un modelo de movilidad. Mediante simulaciones en Matlab y NS2 se demuestra que las soluciones propuestas mejoran la calidad.

Se comprobó que en aplicaciones de alta velocidad un solo medio no puede proporcionar resultados satisfactorios, es necesario un enfoque integrado de la planificación de la red y un manejo de la estructura de movilidad. [5]

- **Estudio de rendimiento del tráfico de Internet en ferrocarriles de alta velocidad.**

En este estudio se realizó un esquema metodológico para la recopilación de información de tráfico, que tiene relación con el comportamiento de los servicios de internet en redes comerciales. Se efectuó el estudio en los trenes de alta velocidad de España, obteniendo como conclusión un método útil para ofrecer información a los operadores ferroviarios, operadores de telecomunicaciones y desarrolladores de software.

Como introducción se plantearon las limitaciones del protocolo de comunicación GSM-R, orientado específicamente para ferrocarriles, y se planteó la necesidad de una transición hacia redes públicas con nuevas tecnologías. De la misma forma se proponen los desafíos que enfrentan estas tecnologías, tales como canales de radio que varían con rapidez en el tiempo, manipuladores frecuentes, efecto doppler y recepción por múltiples rutas. Demostrando la necesidad de una evaluación del rendimiento en la comunicación a bordo de los ferrocarriles de alta velocidad.

Se tomaron en cuenta los efectos de la catenaria en la propagación, concluyendo que mientras que en el espacio libre el coeficiente de propagación es 2, en un entorno móvil en general este coeficiente es 4, y en cambio en los ferrocarriles es de 3,5 lo cual se acerca más al coeficiente de propagación en el espacio libre cuando no se toman en cuenta los efectos de la catenaria.

Se utilizó la herramienta TestelDroid, desarrollada en la universidad de Málaga para capturar el tráfico IP e información adicional en teléfonos Android. Esta evaluación se realizó en una línea ferroviaria de 155 km que se extiende entre las ciudades de Málaga y Córdoba. Se utilizó una fuente de tráfico UDP, específicamente VoIP.

Durante la prueba se estimaron diferentes fuentes de información, entre las cuales están: el identificador de celda, el código de área de ubicación (LAC), el indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI), el código de aleatorización primaria (PSC), la latitud, la longitud y la velocidad.

En la figura 5 se muestra una representación basada en el tiempo de una de las sesiones VOIP.

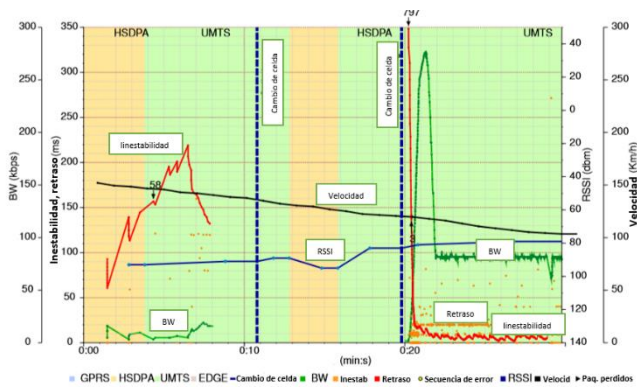


Fig. 5. Representación basada en el tiempo.

Se representaron los datos geográficamente mediante “Google Earth”, con esto se obtuvo la influencia geográfica en la comunicación.

Este trabajo ha presentado un buen método para la medición de calidad del tráfico de internet en dispositivos móviles, comerciales, dentro de trenes de alta velocidad. Se ha permitido conocer áreas de baja calidad de servicios en el trayecto del ferrocarril, y se ha caracterizado el internet en estas líneas, con el fin de buscar mecanismos que ayuden en la mejora del servicio. [6]

III. MARCO TEÓRICO

A. Internet de las cosas (IoT)

Es un concepto en el cual se puede conectar cualquier dispositivo a internet para ser operado. Comprende una red de largo alcance de “cosas” que puedan estar conectadas entre sí y con personas. IoT se puede aplicar en las ciudades inteligentes, en redes de transporte, en el uso eficiente de la energía y más, con lo cual se pretende mejorar la forma de vida y trabajo diario. [7]

Una diferencia entre el “internet” y el “internet de las cosas” es que en el segundo los dispositivos de red tienen menos memoria, menos capacidad de procesamiento, menos ancho de banda, entre otros. Con lo que respecta a la energía, también se encuentra limitada por el uso de baterías en los dispositivos. [2]

B. Ciudades inteligentes

Se habla de “Smart cities” como ciudades en las cuales se pueda alcanzar una gestión eficiente en todas las áreas, tales como una gestión racional del espacio urbano, una gestión de recursos naturales, empleo de fuentes alternativas de energía, reducción de CO₂, entre otros. Esto se da a través del uso de redes de comunicaciones, sensores y sistemas inteligentes. [8]

C. Low Power Wide Area Network (LPWAN)

Es una red que ofrece cobertura en un área muy grande, a través de estaciones base y mediante adaptación de las velocidades de transmisión, modulación, ciclos de trabajo, entre otros. Los dispositivos finales consumen muy poca energía al estar conectados. [2]

D. LoRa (Long Range)

Es un protocolo LPWAN que tiene como objetivo principal las aplicaciones en las cuales los dispositivos finales poseen energía limitada, no necesitan transmitir más de unos pocos bytes y el tráfico de datos puede ser iniciado por el dispositivo final.

- **La pila de protocolos**

Se puede referir a LoRa como dos capas distintas: La capa física que utiliza modulación con la técnica Chirp Spread Spectrum (CSS) y la capa MAC con el protocolo LoRaWAN. La capa física de LoRa permite comunicaciones de largo alcance, baja potencia y bajo rendimiento, funciona en las bandas ISM de 433 MHz (Asia), 868 MHz (Europa) o 915 MHz (América), la velocidad de datos puede alcanzar 50 Kbps. LoRaWAN permite a varios dispositivos finales conectarse a una puerta de enlace.

- **Arquitectura de red**

Una red LoRa tiene topología en estrella, en la cual se encuentran tres tipos de dispositivos. Los dispositivos finales se comunican con las puertas de enlace, estas puertas de enlace reenvían las tramas a un servidor a través de ethernet, WiFi o 3G. En la figura 6 se muestran los diferentes dispositivos. [2]

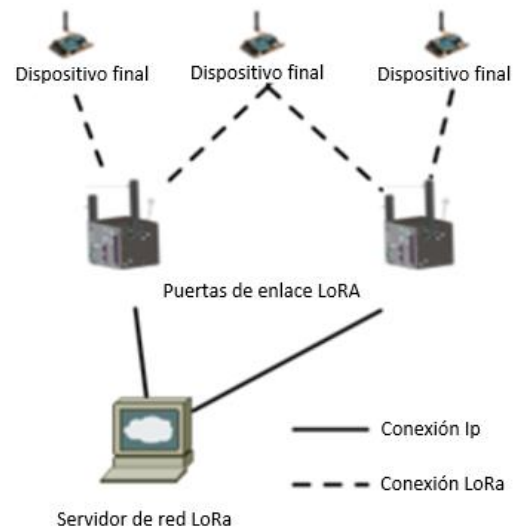


Fig. 6. Arquitectura de la red LoRa.

- **Rango de LoRa**

El rango promedio de distancia es de más de 10 km, los valores oscilan entre los 15 y 20 km, pero estos valores no necesariamente definen el rango de una comunicación LoRa. Influyen también, el posicionamiento de la red, la puerta de enlace, los

dispositivos finales, la ganancia de la antena, la línea de vista, la potencia de transmisión, entre otros. [9]

E. Protocolo LoRaWAN

Es un protocolo MAC creado con el objetivo de usar la capa física de LoRa, el cual está diseñado específicamente para redes de sensores que intercambian datos con el servidor. [2]

- **Clases de nodos de una red LoRaWAN**

En LoRa se pueden distinguir tres clases de nodos:

Clase A: Esta clase de nodo permite comunicación bidireccional en los dispositivos finales, eso significa que la transmisión ascendente se encuentra seguida de una transmisión descendente. Esta clase se utiliza para aplicaciones que requieren únicamente comunicación descendente desde el servidor inmediatamente de que el dispositivo final se haya comunicado ascendentemente, permitiendo así mayor ahorro de energía.

Clase B: Esta clase de nodo permite la comunicación bidireccional de los dispositivos finales que poseen recepciones programadas. Por lo cual, además de recibir datos inmediatamente de que existe comunicación ascendente al igual que los nodos de clase A, permiten la recepción en horarios programados.

Clase C: Esta clase de nodo consiste en dispositivos finales bidireccionales que se encuentran recibiendo datos constantemente, los cuales solo dejan de recibir cuando se encuentran transmitiendo. [10]

F. Tasa de datos de una red LoRaWAN

Todos los dispositivos finales y puertas de enlace incluyen una configuración de “tasa de datos”, esta ofrece una compensación entre el rango de comunicación y la duración del mensaje. Ya que LoRa tiene una tecnología de espectro expandido, las tasas de datos no interfieren entre sí y crean canales de código virtual, aumentando de esa manera la capacidad de la puerta de enlace. [10]

G. Sistemas de transporte inteligente

Son sistemas que permiten comunicar las unidades de transporte entre sí, o con la infraestructura a lo largo de sus trayectos, esto con el objetivo de mejorar la calidad y la seguridad de los servicios de transporte. Estos sistemas se dividen en los que se desarrollan independientemente, o los que dependen de otros sistemas. Además, se dividen en sistemas de comunicación vehículo a vehículo y sistemas de comunicación infraestructura a vehículo o viceversa. [11]

IV. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Se pretende diseñar una comunicación LoRa, entre un nodo móvil y una puerta de enlace que se encuentre fija, se creará un software para cada nodo que permita recibir, procesar y transmitir la información acerca de los distintos parámetros del estudio. Se espera crear un servidor a base de software que recopile los datos obtenidos por la puerta de enlace, que procese esta información, la presente y la almacene para su posterior análisis. Se realizarán pruebas con las cuales se obtendrá información necesaria para una investigación analítica. Con esta investigación se procura establecer conclusiones acerca de la movilidad de LoRa. En la figura 7 se muestra la estructura del modelo experimental.

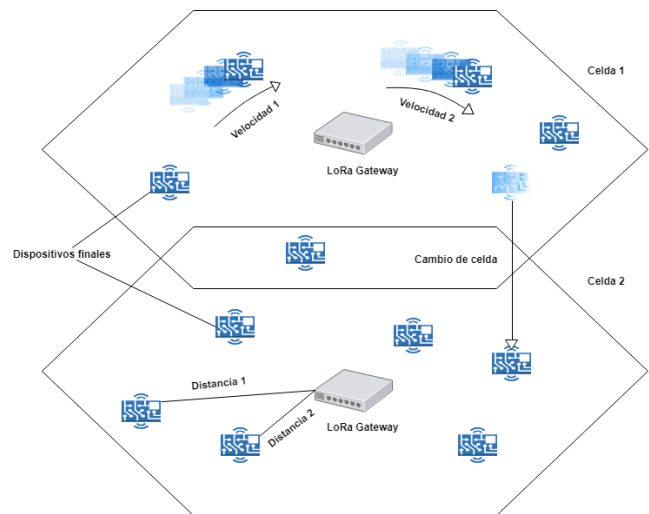


Fig. 7. Estructura del modelo experimental.

El modelo experimental está estructurado con tres tipos de pruebas: pruebas de distancia, pruebas de velocidad y pruebas de cambio de celda. En cada prueba se efectuaron variaciones en diferentes parámetros tales como; distancia entre nodos, velocidad del nodo móvil, línea de vista, altura del nodo fijo, celda, entre otros. Las variaciones en los diferentes parámetros dependieron de los distintos tipos de pruebas, por ejemplo, en las pruebas de velocidad se trató de conseguir mayor modificación en la velocidad y menor en los demás valores. Para conseguir conclusiones acerca de la movilidad de LoRa se examinó la influencia que estos parámetros tuvieron sobre la potencia recibida y sobre la pérdida de paquetes.

Para la creación de la red se utilizó las puertas de enlace de marca y modelo “Dragino LG01” y para el dispositivo final el módulo “Dragino RFM95W” conectado al “Arduino UNO”. Además, se conectó un GPS al dispositivo final para obtener la información geográfica necesaria. Para estos dispositivos de la red se desarrollaron dos programas que permitieron la adquisición, el procesamiento y el envío de la información necesaria.

A través del módulo GPS se entregaron datos al controlador de Arduino mediante comunicación serial, el controlador a su vez procesó los datos e incluyó más información, formando una trama, la cual envió mediante la comunicación LoRa a la puerta de enlace. La puerta de enlace a través de su controlador interno, procesó los datos e incrementó la trama con información de los datos recibidos.

Toda la trama se envió al servidor mediante comunicación UDP, donde fue procesada y presentada, se almacenaron todos los valores en una base de datos obteniendo finalmente los resultados. En la figura 8 se aprecia el modelo de conexiones.



Fig. 8. Modelo de conexiones.

Se obtienen los valores de latitud, longitud y velocidad, a estos se le incluye el conteo de paquetes enviados, se los adjunta a todos en una trama la cual es enviada, al ser recibida la trama a través de la puerta de enlace se le incluye el valor de la potencia recibida y el conteo de paquetes recibidos. Toda la información que recibe el servidor es nuevamente procesada, cada valor es presentado por separado almacenándose finalmente en la base de datos los valores de latitud, longitud, velocidad, RSSI, pérdida de paquetes y distancia.

El servidor se desarrolló a través de la aplicación LabView, una aplicación muy útil en todo tipo de análisis de datos. Para la adquisición de la información se implementó una comunicación UDP entre la puerta de enlace y el servidor, esto se logró enviando las tramas a la dirección IP del computador y a un puerto aleatorio que no se encuentre en uso. Con este servidor se pudo procesar la trama, obteniendo visualización de los diferentes valores con el tiempo como se muestra en la figura 9.

La interfaz de usuario muestra los siguientes campos de entrada:

- Latitud: 0
- Longitud: 0
- Fecha: [campo vacío]
- Hora: [campo vacío]
- Velocidad: [campo vacío] Km/h
- Perdida de paquetes: 0 %
- RSSI: [campo vacío] dB
- Distancia: 0 Km

Fig. 9. Valores de interés en el servidor.

Además de poder observar los valores en el tiempo, se pudo obtener la ubicación del dispositivo final visualizada en un mapa, para ello se utilizó la plataforma libre “Open Street Maps” y gracias a las coordenadas obtenidas se consiguió esta ubicación a lo largo del trayecto de cada prueba. En la figura 10 se observa el mapa y además la opción que tiene el servidor de ingresar las coordenadas de la puerta de enlace para así obtener la distancia entre los dos puntos.

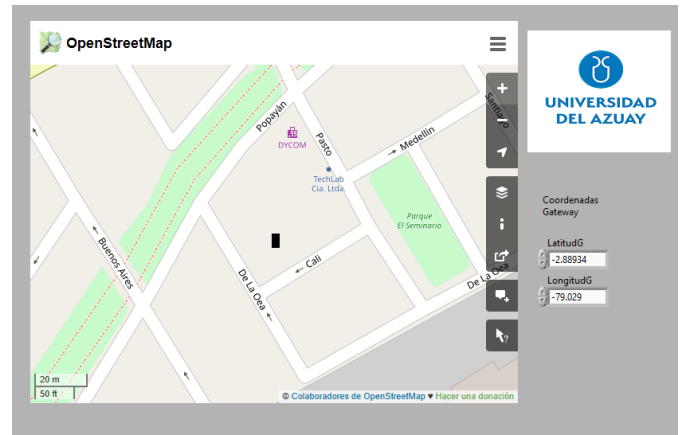


Fig. 10. Mapa.

Para la creación de la base de datos se utilizó la aplicación MySQL Workbench, la conexión de esta base de datos con el servidor de LabView se logró gracias a el estándar de acceso ODBC y se utilizó el servidor XAMPP para permitir la conexión a las tablas. Se elaboró cada una de las tablas de acuerdo con las diferentes pruebas y la información relevante en cada una. Al final todos los datos fueron registrados para su posterior análisis.

V. RESULTADOS

Para los diferentes estudios se ubicó a la puerta de enlace en diferentes locaciones urbanas mientras se variaba la posición del dispositivo final. Se buscó ubicaciones en diferentes entornos para poder observar la influencia del entorno en la comunicación. El dispositivo final se vio afectado por diferentes distancias entre nodos, velocidades y cambios de celda, valores que se registraron junto con información de la pérdida de paquetes y de la potencia recibida en una base de datos para su posterior análisis.

Con los resultados se pretendió analizar la influencia que tiene la distancia, la velocidad y el cambio de celda sobre la pérdida de paquetes y la potencia recibida.

A. Pruebas de distancia

El objetivo principal de estas pruebas fue, poder identificar la influencia que tiene la distancia entre el nodo final y la puerta de enlace sobre una comunicación LoRa, por eso, en cada uno de los análisis se enfatizó en variar principalmente la distancia existente entre los dos nodos. Se empezó siempre con la distancia mas corta posible y se fue incrementando hasta perder la comunicación en su totalidad. Otro factor que se consideró en estos análisis fue la altura de la puerta de

enlace, la cual fue diferente en cada estudio y permitió identificar la influencia que tuvo la línea de vista en la comunicación.

Como primera prueba se posicionó a la puerta de enlace en un tercer piso con vistas al exterior dentro de un área residencial, se llevo al dispositivo final a una distancia máxima donde ya no se recibió ningún paquete. Cabe añadir que el entorno en el que se encontraban los dos dispositivos estaba mayormente conformado por viviendas de dos a tres pisos de alto.

En esta prueba la comunicación se perdió alrededor de los 105 m, después de esa distancia no se recibió ningún paquete, en la figura 11 se puede observar todo el trayecto de la comunicación, los iconos púrpuras son los paquetes recibidos junto con la distancia a la que se enviaron del nodo principal. Poco después de haber girado la intersección y haber perdido línea de vista finalizó la comunicación.

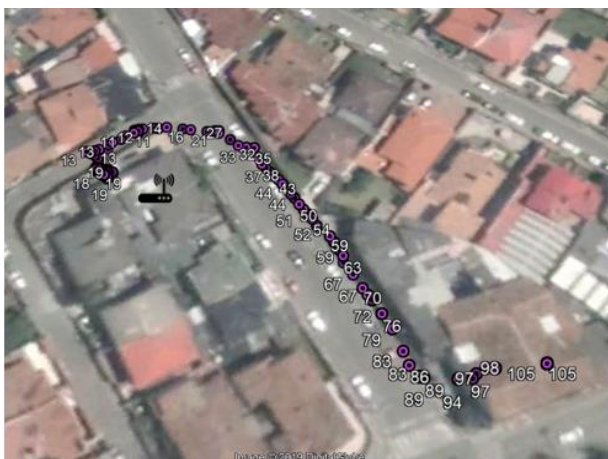


Fig. 11. Trayecto de la prueba 1.

En la figura 12 se encuentran gráficas de distancia, pérdida de paquetes y RSSI en función de todas las muestras obtenidas. Se comprueba que mientras aumenta la distancia existen mas paquetes que no llegan y menos potencia recibida. El RSSI descendió hasta -96 dBm y la pérdida de paquetes alcanzo un máximo de 0,2%.

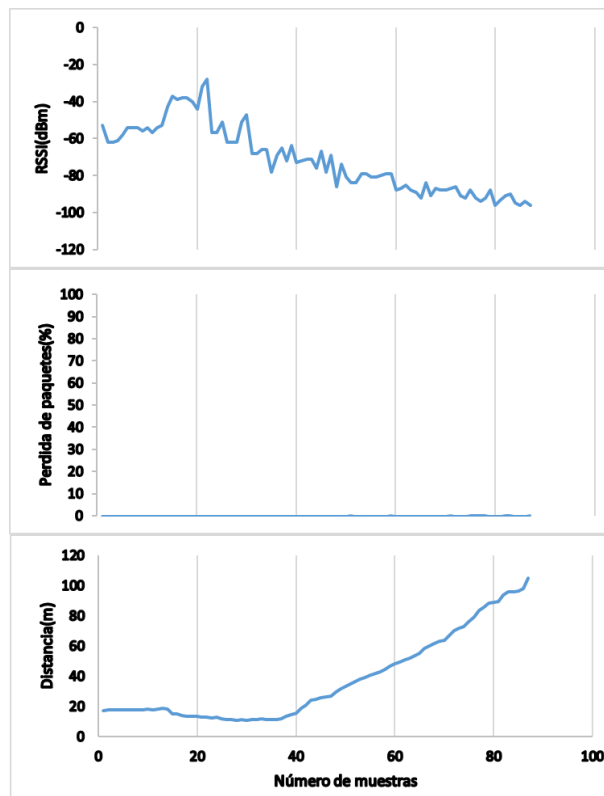


Fig. 12. Gráficas de resultados de la prueba 1.

La segunda prueba se realizó en un área central urbana, se posicionó la puerta de enlace en un tercer piso con un entorno similar al del primer análisis. En la figura 13 se observa el trayecto junto con los paquetes recibidos a cada distancia y la puerta de enlace.



Fig. 13. Trayecto de la prueba 2.

La comunicación alcanzó los 133 m, a poco menos de esta distancia la línea de vista fue perdiéndose hasta ser nula. En la figura 14 se presentan los resultados de este análisis. Se comprueba otra vez que a mayor distancia la pérdida de paquetes aumenta y la potencia recibida disminuye. En estos resultados se consiguió un RSSI mínimo de -84 dBm y una pérdida en los paquetes máxima del 1,5%.

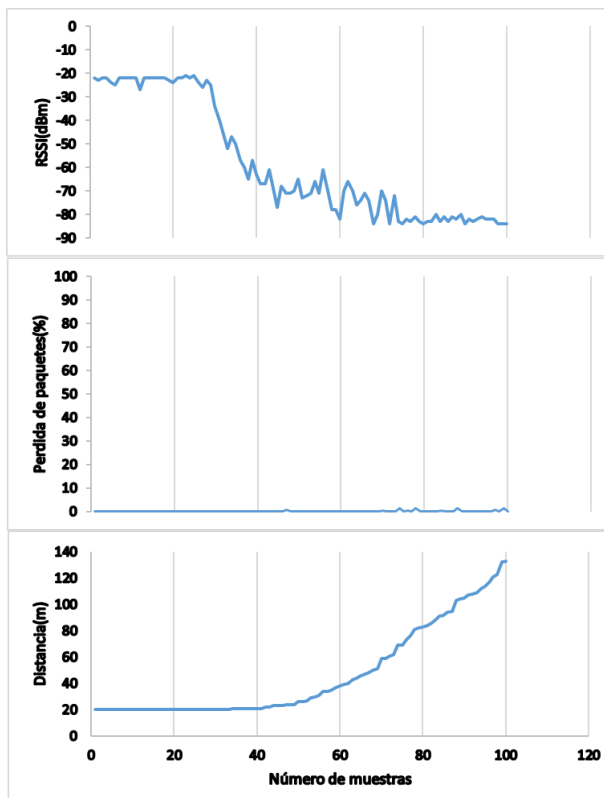


Fig. 14. Gráficas de resultados de la prueba 2.

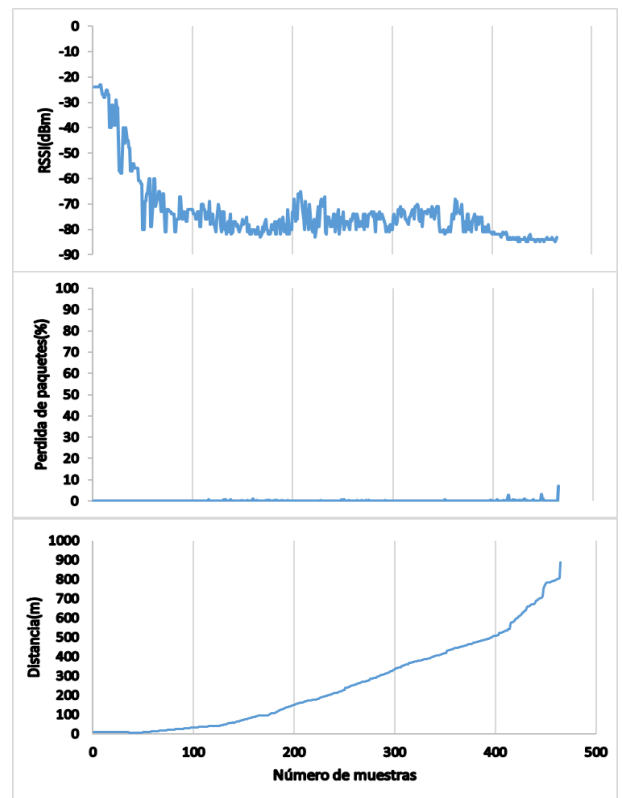


Fig. 16. Gráficas de resultados de la prueba 3.

En la tercera prueba se ubicó a la puerta de enlace en un mirador con una altura superior a gran parte de las edificaciones cercanas, por lo tanto, existía mayor visibilidad hacia el trayecto, en comparación con las pruebas que se realizaron anteriormente, en la figura 15 se puede observar todo el trayecto con algunos de los paquetes enviados y etiquetados por su distancia de la puerta de enlace.



Fig. 15. Trayecto de la prueba 3.

El último paquete recibido llegó a los 890 m, a partir de esa distancia se perdió todo paquete. Esta vez con más altura y visibilidad, el alcance en distancia fue mayor. En la figura 16 se presentan los resultados del análisis, comprobando esta vez que se puede obtener mayor radio de comunicación mejorando las condiciones del entorno. La potencia recibida obtuvo como valor mínimo -85 dBm y la pérdida de paquetes máxima fue del 7,2%.

En la cuarta prueba, la puerta de enlace se colocó en el duodécimo piso de un edificio, al igual que en la prueba anterior, el trayecto se encontraba con mayor línea de vista gracias a la altura del nodo principal. La distancia máxima que alcanzó la comunicación fue alrededor de 810 m como se observa en la figura 17.



Fig. 17. Trayecto de la prueba 4.

Se comprueba nuevamente que al mejorar las condiciones del entorno, mejora la distancia alcanzada por la comunicación. En la figura 18 los resultados muestran además influencia de los obstáculos en los paquetes perdidos y en el RSSI, algo que también se constató en la prueba anterior con la figura 16. La potencia mínima alcanzada fue de -82 dBm y la pérdida de paquetes llegó a un máximo de 8,9%.

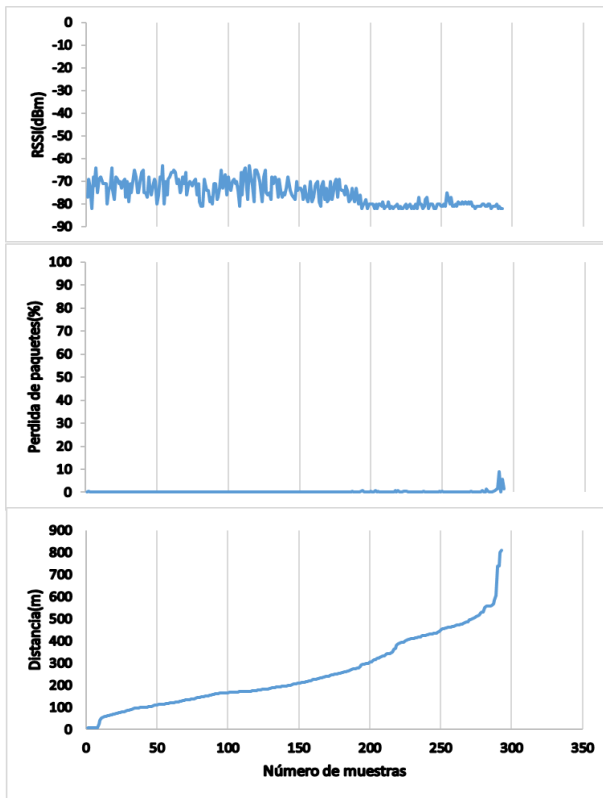


Fig. 18. Gráficas de resultados de la prueba 4.

La quinta prueba se realizó ubicando la puerta de enlace en un cerro de gran altitud (mayor a 100 m), el cual posee vista de la mayor parte de la ciudad, por lo cual se consideró un lugar estratégico para los análisis. Se trasladó el dispositivo final hasta el limite donde los paquetes dejaron de recibirse. En la figura 19 se observa todo el recorrido del dispositivo final con la distancia de los paquetes recibidos.

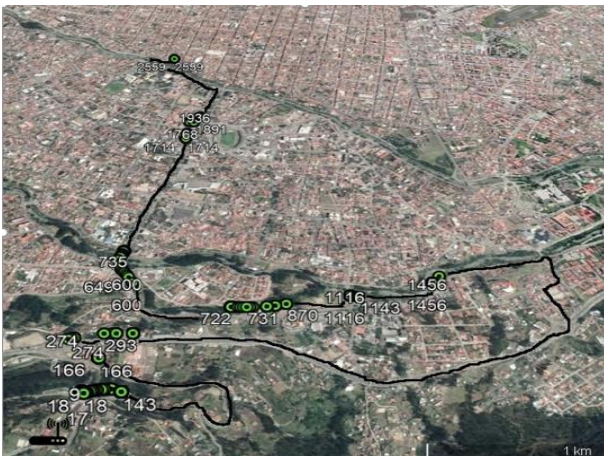


Fig. 19. Trayecto de la prueba 5.

En la figura 19 se observa que en gran parte del trayecto no se consiguieron paquetes, se verificó que a mayor distancia la comunicación es más susceptible a los obstáculos del entorno, además se constató que, mejorando las condiciones de línea de vista y altura, el alcance en distancia puede llegar a ser mejor en 25 veces más que en otras condiciones.

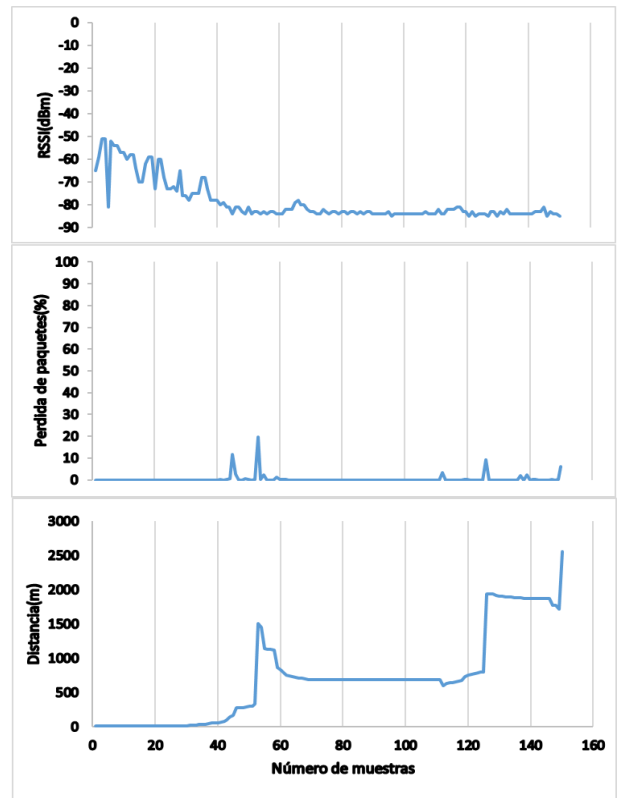


Fig. 20. Gráficas de resultados de la prueba 5.

En la figura 20 se presentan los resultados del análisis, el RSSI mínimo alcanzado fue de -85 dBm y la pérdida de paquetes máxima fue de un 19,7%.

B. Pruebas de velocidad

Para estas pruebas se ubicó la puerta de enlace en una autopista sobre un paso peatonal, de esta manera se pudieron alcanzar altas velocidades. El nodo móvil se trasladó alrededor del nodo fijo en tramos de ida y vuelta, en algunos casos se empezó desde 0 km/h hasta la velocidad máxima soportada, y en los otros casos se intentó mantener una velocidad constante.

En la primera prueba se mantuvo la velocidad a un promedio de 60 Km/h, ya que esta velocidad es una velocidad promedio de tránsito en las vías urbanas. En la figura 21 se presenta el trayecto del dispositivo final junto con los paquetes enviados y etiquetados con la velocidad.



Fig. 21. Trayecto de la prueba 1.

En la figura 22 se presentan los resultados del análisis, no se observa una dependencia directa del RSSI con la velocidad al igual que con la pérdida de paquetes, se podría suponer que los picos existentes en la gráfica se deben a la distancia u obstáculos en el trayecto. La velocidad máxima alcanzada fue de 61 Km/h, la potencia llegó hasta un valor mínimo de -85 dBm y la pérdida de paquetes alcanzó un máximo de 29,1%.

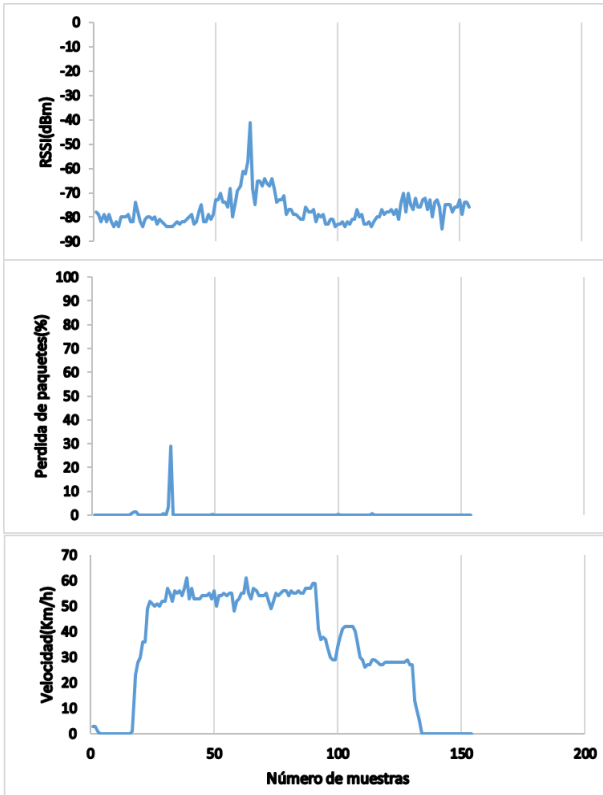


Fig. 22. Gráficas de resultados de la prueba 1.

En la segunda prueba, la velocidad inicio con valores bajos y estos fueron incrementando hasta llegar a 160 Km/h. En la figura 23 se presenta la trayectoria de la comunicación con etiquetas de la velocidad.



Fig. 23. Trayecto de la prueba 2.

En los resultados que se presentan en la figura 24 se comprueba que no existe influencia de la velocidad en la pérdida de paquetes antes de alcanzar los 149 Km/h, sobre esa

velocidad se perdió toda comunicación entre los nodos. Los picos en la pérdida de paquetes coinciden con las zonas más alejadas del recorrido, mientras que los picos en el RSSI coinciden con la distancia mas cercana entre los nodos. La pérdida máxima de paquetes llegó al 12,9% mientras que el RSSI mínimo fue de -85 dBm.

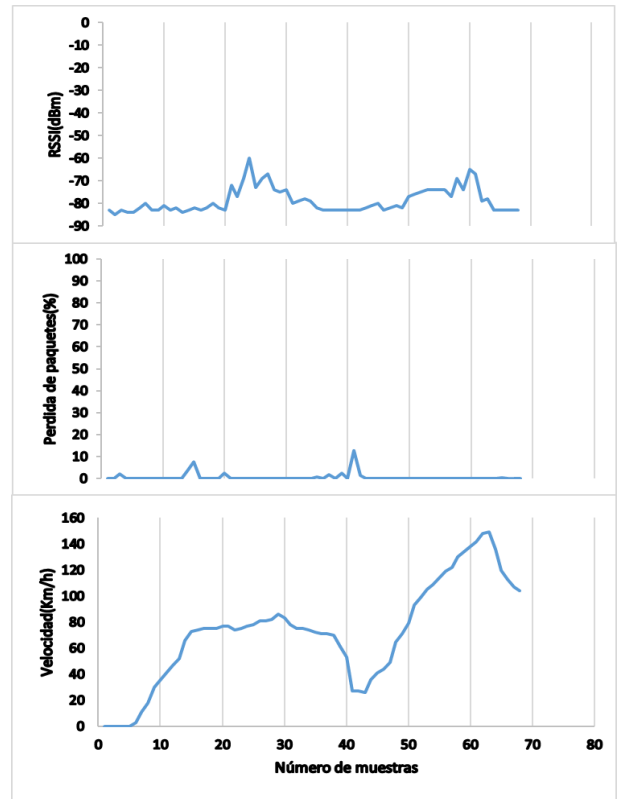


Fig. 24. Gráficas de resultados de la prueba 2.

La tercera prueba se realizó de manera similar a la anterior, la velocidad fue incrementando hasta el valor máximo mientras se fueron registrando los valores. El máximo valor de velocidad que se registro fue de 144 km/h. En la figura 25 se presenta el trayecto de la comunicación con etiquetas de la velocidad.



Fig. 25. Trayecto de la prueba 3.

En la figura 26 se presentan los resultados del análisis, a primera vista se observa que cuando la velocidad baja existe

un porcentaje más alto de pérdida en los paquetes, pero eso no tiene mucho sentido ya que las altas velocidades llegan a producir errores en la comunicación y con menor velocidad deberían existir menores pérdidas. Observando bien el trayecto se identifica que los datos enviados a velocidades mas pequeñas fueron enviados en los extremos de todo el recorrido donde la distancia y la presencia de obstáculos incrementó considerablemente, así que se podría decir que a esto se debe el incremento en la pérdida de paquetes. Igualmente se comprueba que los picos en el RSSI coinciden con una alta velocidad en dispositivo final, pero observando nuevamente el trayecto se comprueba que las altas velocidades coinciden con el punto mas cercano a la puerta de enlace y que la distancia influye más significativamente con esta variable. El RSSI llego hasta -85 dBm, y la pérdida de paquetes alcanzó un 4,1%.



Fig. 27. Trayecto de la prueba 4.

Se comprueba nuevamente que la velocidad tiene poca influencia en la pérdida de paquetes y en la potencia recibida. En la figura 28 se muestran los resultados del análisis. Los resultados obtenidos son similares a los de las dos pruebas anteriores en los cuales se comprueba la poca influencia de la velocidad en la pérdida de paquetes y en el RSSI.

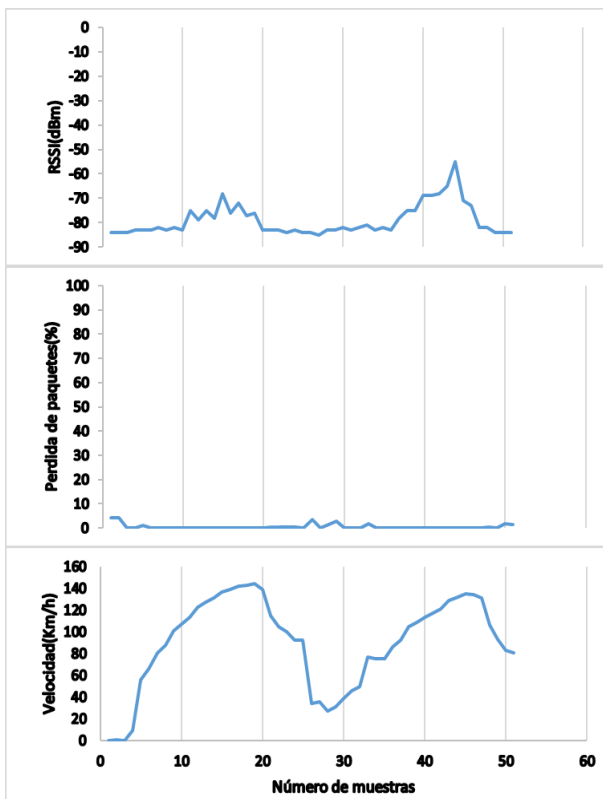


Fig. 26. Gráficas de resultados de la prueba 3.

En la cuarta prueba al igual que las anteriores, la velocidad fue aumentando poco a poco hasta llegar a un valor máximo de 124 Km/h antes de perder toda comunicación. El trayecto con cada paquete enviado y etiquetado por velocidad se presenta en la figura 27.

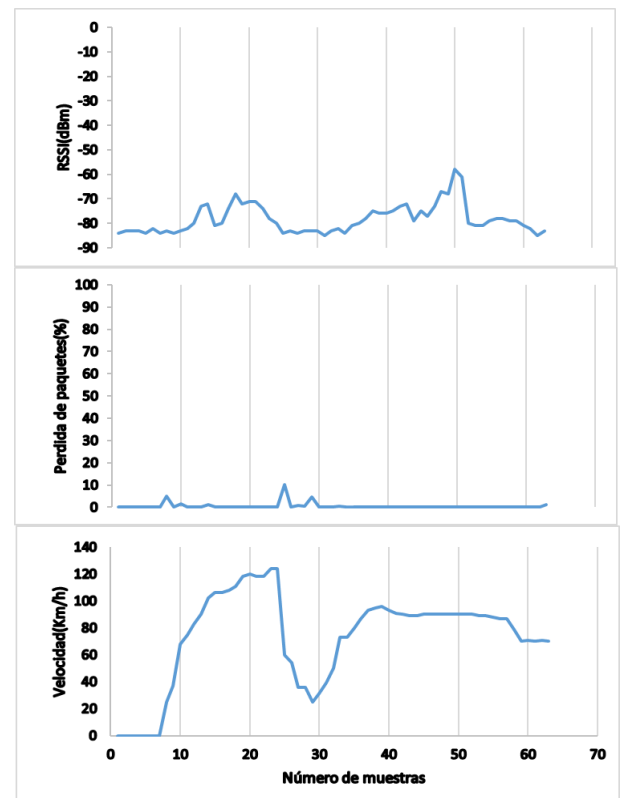


Fig. 28. Gráficas de resultados de la prueba 4.

La quinta prueba se realizó tratando de mantener una velocidad de 90 km/h en casi todo el recorrido, esta es una velocidad promedio en las carreteras y autopistas que rodean las ciudades. En la figura 29 se presenta la trayectoria etiquetada por la velocidad.



Fig. 29. Trayecto de la prueba 5.

Los resultados se muestran en la figura 30. De igual manera que los resultados en las pruebas anteriores se comprueba que la pérdida de paquetes incrementó en el tramo mas alejado donde confidencialmente la velocidad disminuye, pero en donde la velocidad se mantenía alrededor de los 90 Km/h la pérdida fue la mínima, así mismo el RSSI se mantiene en valores bajos casi en toda la comunicación exceptuando los puntos de mayor cercanía a la puerta de enlace.

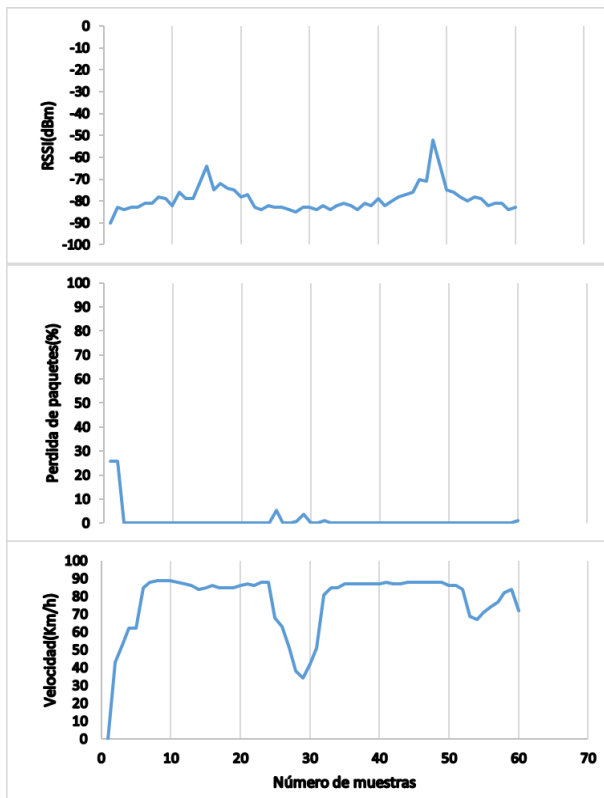


Fig. 30. Gráficas de resultados de la prueba 5.

C. Pruebas de cambio de celda

En estas pruebas se utilizaron dos puertas de enlace, a cada una se la localizó en diferente ubicación con respecto a la otra y manteniendo una distancia significativa entre las dos. Se atravesó con el dispositivo final las dos celdas y se registraron los resultados.

En la primera prueba se recorrió de un nodo a otro por la distancia mas corta entre estos. En la figura 31 se observa la trayectoria etiquetada por el número de cada puerta de enlace y cada paquete diferenciado con distinto color para cada celda.



Fig. 31. Trayecto de la prueba 1.

Como se comprueba en la figura 32 los paquetes casi no se perdieron en el transcurso del recorrido, esto se debe a que los dos nodos fijos se encontraban recibiendo en cada momento, por lo tanto, existía redundancia en toda la comunicación. Es decir, cuando la distancia a cada nodo aumentaba y por ende la pérdida de paquetes también, la distancia disminuía en el otro nodo y de igual manera disminuía la pérdida de paquetes en este.

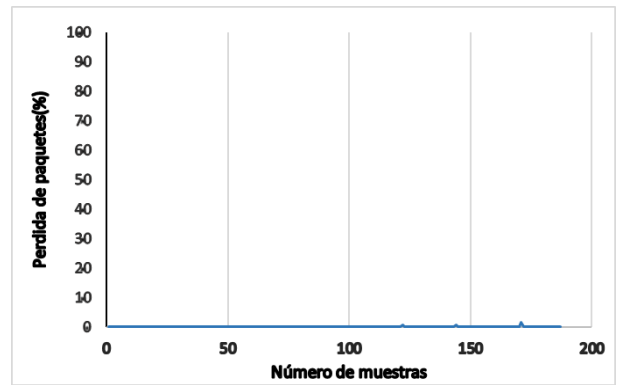


Fig. 32. Gráfica de la pérdida de paquetes de la prueba 1.

Los resultados con respecto a la potencia recibida dependen de cada puerta de enlace, mientras los paquetes fueron enviados a mayor distancia de cada celda esta potencia disminuye, mientras que si fueron enviados con menor distancia la potencia recibida es mayor. En la figura 33 y 34 se ven los resultados de RSSI con respecto a cada celda respectivamente.



Fig. 33. Gráfica del RSSI en la primera celda de la prueba 1.

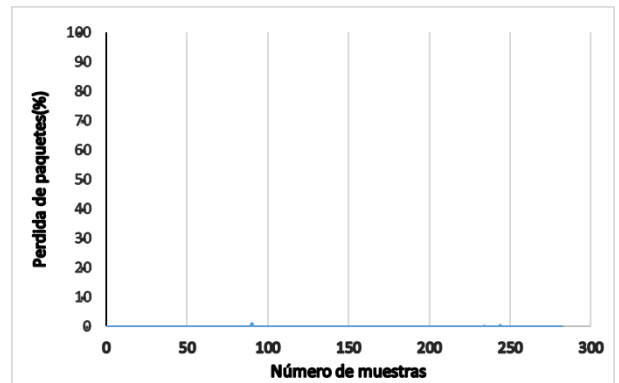


Fig. 36. Gráfica de la pérdida de paquetes de la prueba 2.

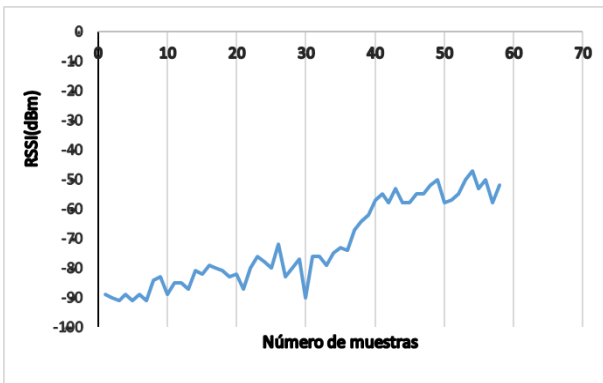


Fig. 34. Gráfica del RSSI en la segunda celda de la prueba 1.

En la segunda prueba se consiguió mayor distancia en el trayecto, rodeando las celdas por uno de los extremos. El recorrido se muestra en la figura 35 con etiquetas y diferente color para cada nodo.



Fig. 35. Trayecto de la prueba 2

Al igual que la prueba anterior la pérdida de paquetes no incrementó de manera significativa en ninguna parte del trayecto, esto debido a la redundancia presente gracias a los dos nodos como se explicó anteriormente. En la figura 36 se presenta la gráfica de la pérdida de paquetes.

De igual manera la potencia recibida tiene mayor influencia de la distancia entre los dos nodos fijos y móvil, así que va a depender de cual celda recibió el paquete. En la figura 37 y 38 se presentan los resultados de la potencia recibida.

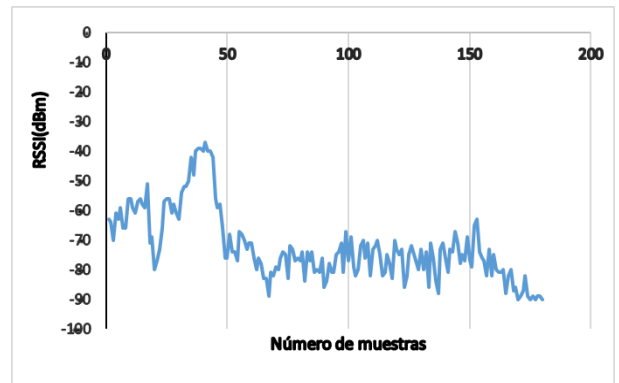


Fig. 37. Gráfica del RSSI en la primera celda de la prueba 2.

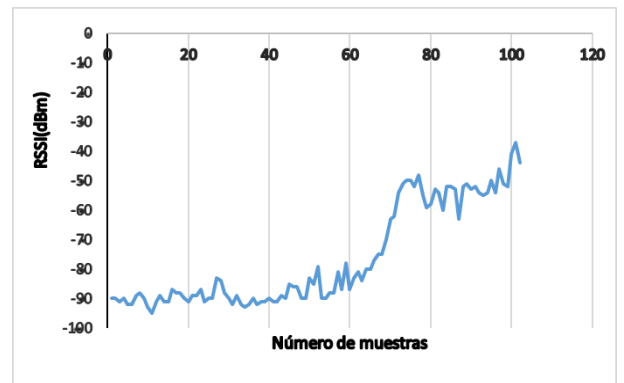


Fig. 38. Gráfica del RSSI en la segunda celda de la prueba 2.

En la tercera prueba se siguió un recorrido diferente a las pruebas anteriores, rodeando las celdas por uno de los extremos. En la figura 39 se presenta el recorrido etiquetado por el nodo uno y dos.

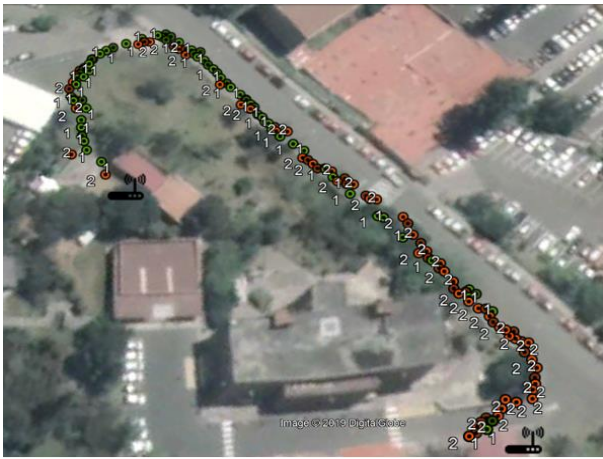


Fig. 39. Trayecto de la prueba 2

La pérdida de paquetes no aumenta significativamente como sucedió en los análisis anteriores. En la figura 40 se presenta la pérdida de paquetes en función de las muestras recogidas.

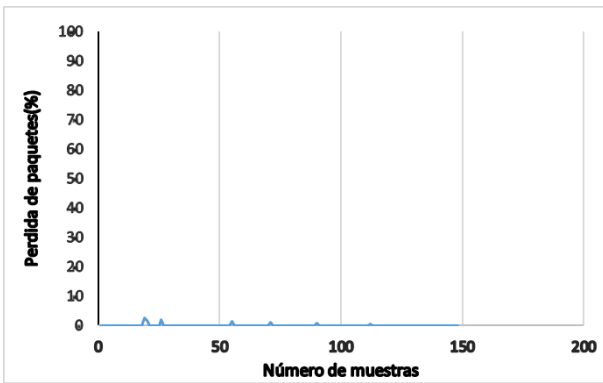


Fig. 40. Gráfica de la pérdida de paquetes de la prueba 3.

Los resultados de potencia recibida no cambian con este análisis, a mayor distancia del nodo que recibe el paquete, menores son los valores del RSSI. En las figuras 41 y 42 se muestran los resultados.

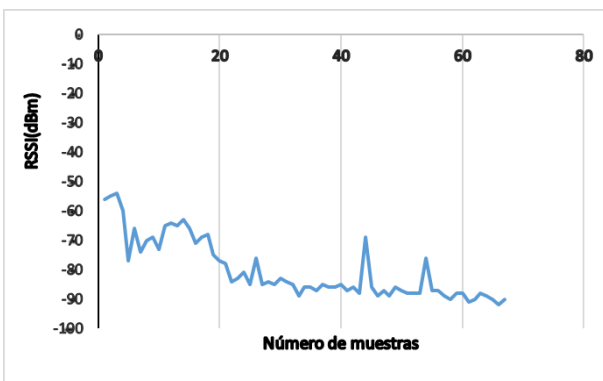


Fig. 41. Gráfica del RSSI en la primera celda de la prueba 3.

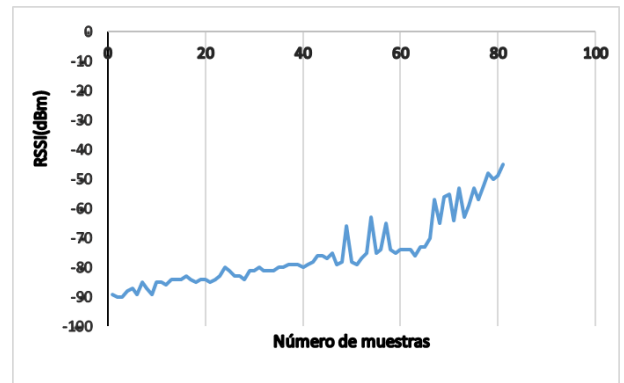


Fig. 42. Gráfica del RSSI en la segunda celda de la prueba 3.

VI. CONCLUSIONES

Después de haber realizado varias pruebas se comprobó que la comunicación LoRa ofrece una gran utilidad en aplicaciones de movilidad urbana.

Entre las pruebas realizadas, se verificó que la línea de visión es un factor con gran influencia en la distancia alcanzada entre el nodo fijo y el nodo móvil sin que se pierda la comunicación. Por ende, la altura del nodo fijo llega a ser un factor fundamental en el tamaño de la celda. El alcance máximo fue de 2,56 km, lo cual representa un valor alrededor de veinticinco veces mayor al valor del alcance mínimo conseguido en las pruebas anteriores, y esto se consiguió elevando la altura de la puerta de enlace a más de cien metros del dispositivo final. Con todo ello se puede afirmar que se pueden obtener celdas de gran distancia utilizando el protocolo LoRa.

La influencia que tuvo la velocidad sobre la comunicación fue significativa después de los 149 km/h donde se dejó de recibir cualquier tipo de información, con velocidades menores se podría decir que la influencia de la velocidad sobre la comunicación fue casi inexistente o inexistente. Las variaciones mas significativas en la pérdida de paquetes y el RSSI se debieron a la distancia entre los nodos y los obstáculos en él recorrido. De esta manera se entiende que para las velocidades máximas y mínimas con las cuales los vehículos y peatones se movilizan en el área urbana existe un gran rendimiento en la comunicación.

Al cambiar de una celda a otra, existió un refuerzo en la comunicación gracias a la redundancia presente por las dos puertas de enlace. Esto se debe a que en el área donde las dos celdas se interceptaban, los paquetes eran recibidos por los dos nodos al mismo tiempo y en el área donde un nodo no recibía el paquete el otro nodo si lo hacía. Así, existía una pérdida mínima de la información y la potencia recibida no llegaba a valores bajos.

Con todos los análisis y sus respectivos resultados se puede afirmar que el protocolo LoRa es funcional en celdas de gran distancia, es resistente a altas velocidades del dispositivo final y a cambios de celdas de comunicación. Por todo ello, se concluye que este protocolo es apropiado para aplicaciones de IoT y de movilidad urbana.

VII. REFERENCIAS

- [1] M. Lucian Andrei, L. Alexandru Rădoi y D. Ștefan Tudose, «Measurement of Node Mobility for the LoRa Protocol,» IEEE Xplore, pp. 1-6, 2017.
- [2] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen y W. Mark Townsley , «A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things,» Sensors, 2016.
- [3] D. Hyun Kim, J. Bin Park, J. Ho Shin y J. Deok Kim, «Design and Implementation of object tracking system based on LoRa,» IEEE Xplore, pp. 463-467, 2017.
- [4] D. Fernandes Carvalho, A. Depari, P. Ferrari, A. Flammini, S. Rinaldi y E. Sissini, «On the feasibility of mobile sensing and tracking applications based on LPWAN,» IEEE, 2018.
- [5] K. Kastell, «Challenges and Improvements in Communication with Vehicles and Devices Moving with High-Speed,» IEEE Xplore, 2011.
- [6] J. Rivas Tocado, . A. Díaz Zayas y P. Merino Gomez, «Performance Study of Internet Traffic on High Speed Railways,» IEEE Xplore, pp. 1-9, 2013.
- [7] J. Morgan, «Una explicación simple de 'Internet de las cosas',» 13 Mayo 2014. [En línea]. Available: <https://www.forbes.com/sites/jacobmorgan/2014/05/13/simple-explanation-internet-things-that-anyone-can-understand/#4cc371201d09>.
- [8] Telesur, «Telesur,» 31 octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.telesurtv.net/telesuragenda/Que-son-las-ciudades-inteligentes-20161027-0021.html>.
- [9] Murata, «Murata innovator in electronics,» [En línea]. Available: <https://www.murata.com/support/faqs/products/lpwa/lora/hardware/0008>.
- [10] LoRa Alliance, Inc., LoRaWAN™ 1.1 Specification, Beaverton, 2017.
- [11] X. Calle Heredia, «Sistema de Monitoreo para el Transporte Urbano mediante Comunicaciones Inalámbricas,» Cuenca, 2018.