



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Desarrollo De Una Pasarela LORA y Evaluación De Prestaciones

Autor: Marianela Del Cisne Carrión González

Director I: Carlos Enrique Palau Salvador

Fecha de comienzo: 15/05/2017

Lugar de Trabajo: E.T.S.I. Telecomunicaciones

Objetivos

- Analizar el estado del arte de la tecnología LoRa/LORAWAN, en vista de que por sus características de comunicación de largo alcance y baja potencia se ha ido posesionando en el mercado y se ha convertido en una de las tecnologías más adoptadas para IoT.
- Construir una pasarela LoRa a partir del módulo iC880A y analizar las principales características de esta tecnología.
- Gestionar la comunicación entre un dispositivo final (nodo) y la pasarela, para evaluar los parámetros de cobertura dentro de un entorno urbano.
- Definir las ventajas y limitaciones de lo que conlleva el despliegue de pasarelas LoRa a partir de los resultados obtenidos.

Metodología

A lo largo de este documento dividido en cinco capítulos, se analizaron las características que ofrece la tecnología LoRa/LoRaWAN, evaluando específicamente el comportamiento de una pasarela frente a las complicaciones que conllevan los entornos urbanos, se ha establecido el Campus Vera de la UPV como escenario principal para el análisis y recolección de datos. En el capítulo I se establece la introducción, el capítulo II contiene el estado del arte de la tecnología LoRa/LoRaWAN, el capítulo III presenta la descripción del proceso de implementación de la pasarela y la gestión para lograr la comunicación con un dispositivo final, el capítulo IV está enfocado en las pruebas y resultados obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones en el capítulo V.

Desarrollos teóricos realizados

En éste trabajo se define la nueva tecnología LoRa/LoRaWAN, enfocándose principalmente en las características de largo alcance y bajo consumo de energía, se ha detallado el papel que desempeña una pasarela en este tipo de redes, además de su importante y fácil despliegue para lograr grandes distancias de cobertura; se presenta también la clasificación de dispositivos finales que pueden conformar una red LoRaWAN de acuerdo a las aplicaciones ofrecidas y requisitos de comunicación que presenten, sin dejar de lado el factor de seguridad que para cualquier LPWAN y especialmente para el usuario final se considera indispensable.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio

Se construyó una pasarela LoRa a partir del concentrador iC880A y una Raspberry Pi 3, esta fue ubicada en la 2da planta alta del bloque 4D del campus Vera de la UPV, lo que generó una altura de 10 m aproximadamente, para evaluar su cobertura en escenarios reales se empleó el adaptador USB iU880B y utilizando el método OTAA (Device Activation Over The Air) se activó el dispositivo para lograr la comunicación con la pasarela desarrollada.

La recolección de datos consistió en el desplazamiento del nodo por todo el campus y los parámetros a obtener fueron RSSI, SNR y Throughput, los que posteriormente se analizaron y permitieron crear un mapa de calor, para establecer los niveles de cobertura de la pasarela.

Resultados

Durante el desarrollo de este proyecto se logró construir una pasarela LoRa a un precio económico y con características semejantes en comparación a pasarelas que se encuentran en el mercado, además con la utilización del nodo final IU880B, se logró determinar la cobertura dentro del campus Vera de la UPV, desplazándose con dicho nodo en exactamente 107 puntos.

Para poder analizar los paquetes que fueron recibidos en la pasarela se creó una aplicación en los servidores de la red global TTN, y se registró al nodo y la pasarela, con esto se logró gestionar la comunicación entre los dispositivos.

A partir de los datos obtenidos en las mediciones se dibujó un mapa de calor que registra la cobertura de la pasarela en el campus y se determinó el throughput de LoRa para cada factor de dispersión (SF) que puede gestionar esta tecnología.

En base al comportamiento de la pasarela se establecieron ciertos parámetros que limitan la aplicación de esta tecnología en algunos tipos de redes LPWAN.

Líneas futuras

Para otros posibles proyectos o una ampliación a éste, sería evaluar el comportamiento de la pasarela con un número considerable de dispositivos finales (nodos) a partir del despliegue de una red LoRaWAN real en el campus Vera de la UPV y desarrollo de una aplicación específica que permita procesar la información recolectada por la pasarela.

Frente a la proliferación de tecnologías LPWAN y en particular de LoRaWAN sería muy acertado diseñar mecanismos de coordinación: como protocolos de coordinación, reconfiguración de pasarelas y dispositivos finales, para limitar la interferencia y colisiones entre pasarelas de un mismo operador o de operadores diferentes.

Abstract

This project describes the main features of LoRaWAN technology, focusing on the process to implement a LoRa gateway from the IC880A concentrator module and a Raspberry Pi, detailing the software and configuration tools used for its correct operation. In addition, the results obtained from the coverage tests carried out on the runway within the Vera campus of the UPV are presented, and the parameters of RSSI, SNR and Throughput were analyzed, which allowed to determine their behavior within an urban area.

Autor: Carrión González Marianela, email: macar7@teleco.upv.es

Director 1: Palau Salvador Carlos, email: cpalau@ocom.upv.es

Fecha de entrega: 09-09-2017

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	4
II. LORA (LONG RANGE)	5
II.1. LORAWAN.....	5
II.1.1. ARQUITECTURA DE RED.....	5
II.1.2. CANALES DE TRANSMISIÓN	7
II.1.3. FACTOR DE DISPERSIÓN (SF) Y SENSIBILIDAD CON RELACIÓN AL RECEPTOR.....	8
II.1.4. DISPOSITIVOS DE LORAWAN	9
II.1.5. ESTRUCTURA DE PAQUETES LORAWAN.....	10
II.1.6. SEGURIDAD DE LORAWAN	11
II.1.7. CASOS DE USO DE REDES LORAWAN	12
III. ENTORNO DE TRABAJO	13
III.1. MÓDULO CONCENTRADOR LORA IC880A.....	13
III.2. RASPBERRY PI 3	15
III.3. ADAPTADOR USB IU880B	16
III.4. CONSTRUCCIÓN DE LA PASARELA	17
III.5. ESTABLECIMIENTO DE COMUNICACIÓN ENTRE LA PASARELA Y EL NODO IU880B.....	22
IV. PRUEBAS Y RESULTADOS	24
IV.1. COBERTURA DE LA PASARELA LORA	26
IV.2. THROUGHPUT ALCANZADO	30
IV.3. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA PASARELA	31
V. CONCLUSIONES.....	31
AGRADECIMIENTOS	32
BIBLIOGRAFÍA.....	32

I. INTRODUCCIÓN

Internet of Things (IoT) es un concepto enfocado en la interconexión digital de objetos cotidianos con cualquier otro de su alrededor, con el único fin de conseguir que estos objetos sean más inteligentes e independientes; en los últimos años se ha convertido en uno de los términos más populares en la industria tecnológica gracias al enorme número de dispositivos que cuentan con la posibilidad de interconectarse y a la necesidad de crear redes capaces de gestionar estos dispositivos.

Para atender las necesidades de IoT se han desarrollado diversas tecnologías Low-Power Wide Area Networks (LPWANs), que se caracterizan por ofrecer conectividad inalámbrica de largo alcance a un gran número de dispositivos, con menor consumo de energía y menor coste que las redes móviles, siendo su principal limitante el ancho de banda reducido. Entre las tecnologías LPWANs más utilizadas en IoT están: LoRaWAN, SigFox, Ingenu RPMA, Weightless, DASH-7, nWave.

LoRa/LoRaWAN es el nombre de una alianza y un protocolo de estándar abierto de redes LPWAN, actualmente es la tecnología que lidera en términos de despliegue de sus redes; se centra en los requisitos claves de IoT tales como la comunicación bidireccional segura, la movilidad y los servicios de localización, además proporciona una interoperabilidad sin fisuras entre los objetos inteligentes sin necesidad de instalaciones locales complejas; esto hace que tenga aplicación en escenarios relevantes como son las Smart cities.

Las pasarelas LoRa son un puente transparente que retransmiten mensajes entre dispositivos finales (nodos) y un servidor de red central, la comunicación entre nodos y pasarelas se extiende en diferentes canales de frecuencia y velocidad de datos que dependen del intervalo de comunicación y la duración del mensaje; gracias a la tecnología de espectro ensanchado las comunicaciones con diferentes velocidades de datos no interfieren entre sí por lo que se crea un conjunto de canales virtuales que aumentan la capacidad de la pasarela.

En este proyecto se utilizará como elemento principal el módulo concentrador IC880A en combinación con una Raspberry Pi para construir la puerta de enlace LoRa; éste módulo tiene una gran variedad de aplicaciones como Smart Metering, IoT y M2M, consiste de un transmisor/receptor multicanal de alto rendimiento y es capaz de recibir paquetes de diferentes dispositivos finales, enviar con diferentes factores de propagación en hasta 8 canales en paralelo, además de demodular la señal LoRa sin conocer el factor de propagación utilizado por el nodo emisor.

Debido a que el IC880A combina los factores de propagación y el ancho de banda de la señal, se pueden obtener diferentes velocidades de datos y por lo tanto es posible el uso de la “adaptación dinámica de velocidad de datos”. Esto significa que los nodos LoRa a grandes distancias del concentrador deben utilizar mayores factores de propagación y, por lo tanto, tienen una velocidad de

datos más baja, mientras que los nodos que están más cerca del concentrador pueden utilizar factores de propagación más bajos y, por lo tanto, pueden aumentar su velocidad de transmisión de datos [1].

II. LORA (LONG RANGE)

LoRa fue desarrollado por Cycleo (empresa francesa adquirida por Semtech). Define una tecnología de capa física y consiste en una técnica de modulación utilizada en enlaces de comunicación de largo alcance, sus principales características son el bajo consumo de potencia (alrededor de 10 años de duración de la batería) y un gran rango de comunicación (2-5 km en áreas urbanas y 15 km en áreas suburbanas), con un solo Gateway se puede cubrir ciudades enteras o una gran cantidad de kilómetros cuadrados, está basada en técnicas de espectro ensanchado y una variación de chirp spread spectrum (CSS), que se caracteriza por modular los datos en diferentes canales y velocidades utilizando forward error correction (FEC) para hacer la corrección de errores [2].

LoRa utiliza toda la anchura de banda del canal para transmitir una señal haciéndola robusta al ruido del canal e insensible a las compensaciones de frecuencia. LoRa utiliza ganancia de codificación lo que le da más sensibilidad al receptor y puede demodular señales de 19.5 dB por debajo del nivel de ruido, alcanzando velocidades de transmisión comprendidas entre 0.3 kbps hasta 50 kbps.

II.1. LORAWAN

Es una red de área amplia de baja potencia, utiliza la capa física LoRa y define el protocolo de comunicación y la arquitectura del sistema, que son los parámetros determinantes del ahorro de energía en la batería de un nodo, así como también de la capacidad de la red, calidad del servicio y seguridad.

LoRaWAN define el propio protocolo MAC y la arquitectura del sistema de la red y a nivel físico, en cambio es LoRa quien permite el enlace de comunicación de largo alcance. LoRaWAN puede emplear la modulación LoRa o FSK a nivel físico.

El protocolo LoRaWAN toma en cuenta los requisitos clave de internet de las cosas y está optimizado para sensores de bajo coste operados con batería, es totalmente bidireccional y fue diseñado para garantizar la fiabilidad y la seguridad en la red, así como también permite localizar y rastrear fácilmente objetos móviles. LoRaWAN ha clasificado en tres clases a los nodos para optimizar la compensación entre la latencia de la red y la duración de la batería.

II.1.1. ARQUITECTURA DE RED

LoRaWAN tiene generalmente una topología de estrella de estrellas, donde los dispositivos finales se comunican con el gateway que es el encargado de retransmitir la información a un servidor de red

central. Cada gateway reenviará el paquete recibido desde el nodo final al servidor de red utilizando conexiones IP estándar. La comunicación desde el dispositivo final al gateway se realiza a través de comunicación inalámbrica de un solo salto, esta puede ser a un solo gateway o a varios, utilizando varios canales de frecuencia a distintas velocidades, la selección de velocidad de datos se elige tomando en cuenta el intervalo de tiempo que conlleva transmitir el mensaje y el tamaño del mensaje, gracias al uso de tecnología de espectro ensanchado se crea un conjunto de canales virtuales, aumentando la capacidad del gateway.

La inteligencia y complejidad del sistema está en el servidor de red, encargado de filtrar los paquetes redundantes, realizar acciones de seguridad y gestionar la velocidad de datos y la salida de RF para cada dispositivo final individualmente mediante un esquema de velocidad de datos adaptativa (ADR).

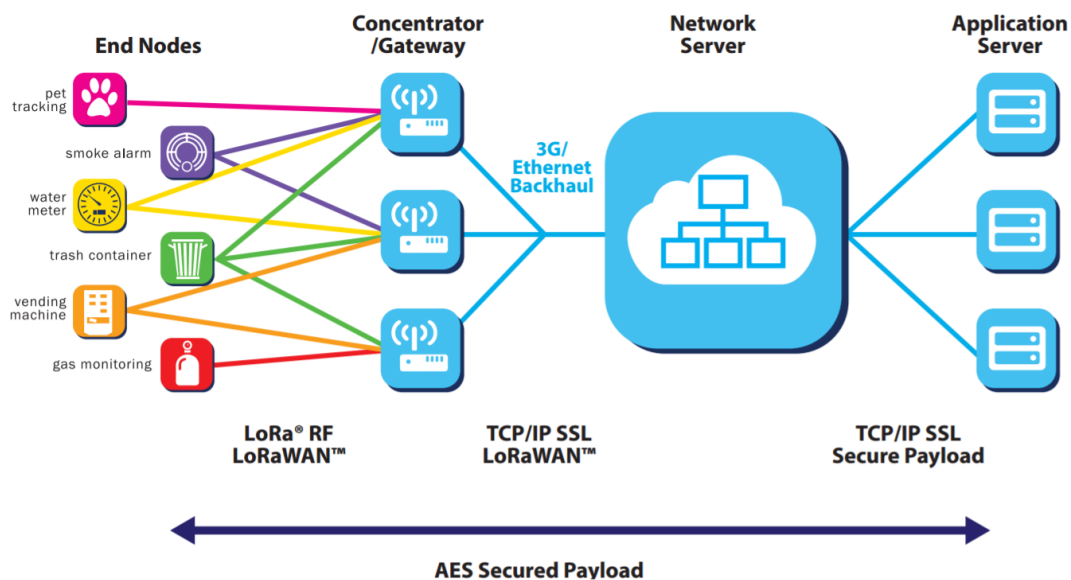


Fig. 1 Arquitectura de red LoRaWAN [3]

Al llegar información en el gateway, ésta termina con el protocolo inalámbrico de capa física LoRa y lo convierte en protocolos de red de Backhaul. Por su parte el servidor de red es el responsable de los protocolos de capa superior intercambiando mensajes de señalización de control MAC / L2 / L3 con los nodos. A continuación, inicia el trabajo del servidor de aplicaciones encargado de procesar los datos recolectados por los terminales.

Para hacer viable una red en estrella de largo alcance, el gateway debe tener una capacidad muy alta para recibir mensajes desde un gran número de nodos. La alta capacidad de red en LoRaWAN se logra utilizando la velocidad de datos adaptativa y utilizando un transceptor multicanal en el gateway para que se puedan recibir mensajes simultáneos en múltiples canales [3].

II.1.2. CANALES DE TRANSMISIÓN

Los nodos pueden transmitir por cualquier canal disponible y utilizando cualquier tasa de datos, cumpliendo ciertas condiciones como son: el nodo debe cambiar de canal de forma pseudo-aleatoria en cada transmisión, el nodo no sobrepasa el máximo ciclo de trabajo ni el máximo tiempo de duración en la transmisión, todo esto en relación a la sub-banda utilizada y a las regulaciones locales.

LoRaWAN no utiliza ningún mecanismo específico de acceso al medio. Se confía en las restricciones impuestas por el ciclo de trabajo como mecanismo de arbitraje del acceso al medio; esto proporciona dos características importantes: por un lado, se reduce la latencia y el consumo de energía además de simplificar los dispositivos de comunicación, pero por otro lado el rendimiento de la red se puede ver afectado debido a un aumento de la probabilidad de que se produzcan colisiones.

Para la comunicación en LoRaWAN se dispone de 16 canales en las bandas de 433 MHz y 868 MHz, y de 72 canales en la banda de 900 MHz; siendo utilizadas en Europa las dos primeras. Al usar frecuencia por debajo de la banda ISM de 2.4 y 5.8 GHz permite obtener mejor cobertura, sobre todo en nodos que se encuentren dentro de un edificio.

Número de canal	Parámetros	Bandas de Frecuencias	
		868 MHz	433 MHz
0	Frecuencia	868100 kHz	433175 kHz
	Ciclo de trabajo	0.33%	0.33%
	Data rate	0 - 5	0 - 5
	Estado	On	On
1	Frecuencia	868300 kHz	433375 kHz
	Ciclo de trabajo	0.33%	0.33%
	Data rate	0 - 5	0 - 5
	Estado	On	On
2	Frecuencia	868500 kHz	433575 kHz
	Ciclo de trabajo	0.33%	0.33%
	Data rate	0 - 5	0 - 5
	Estado	On	On
3 - 15	Frecuencia	Configurado por el usuario	Configurado por el usuario
	Ciclo de trabajo	*	*
	Data rate	0 - 5	0 - 7
	Estado	Off	Off

*LoRaWAN impone una limitación de ciclo de trabajo por cada sub-banda dada

$$T_{off} = \frac{TimeOnAir}{DutyCycle_{subband}} - TimeOnAir$$

Tabla 1. Canales de frecuencia de LoraWAN [4]

II.1.3. FACTOR DE DISPERSIÓN (SF) Y SENSIBILIDAD CON RELACIÓN AL RECEPTOR

Al utilizar una modulación basada en técnicas de espectro ensanchado y variaciones del factor de propagación LoRaWAN presenta diferentes velocidades de transmisión en función de la señal comprendidas entre el rango 0.3kbps y 22kbps.

La red LoRaWAN será la encargada de administrar el factor de ensanchamiento utilizado y la potencia de señal de transmisión para optimizar el rendimiento y la escalabilidad.

SF	Tasa de bits equivalente (kb/s)	Sensibilidad (dBm)
12	0.293	-137
11	0.537	-134.5
10	0.976	-132
9	1.757	-129
8	3.125	-126
7	5.468	-123

Tabla 2. Relación entre SF y la Sensibilidad

Se debe considerar que a mayor distancia entre el nodo y el gateway el factor de dispersión será mayor, disminuyendo la velocidad de transmisión, así como también la sensibilidad en el receptor debería ser mayor. Esto se puede observar de una manera más clara en la siguiente figura, la misma que detalla la evolución de la señal conforme se aleja del punto emisor.

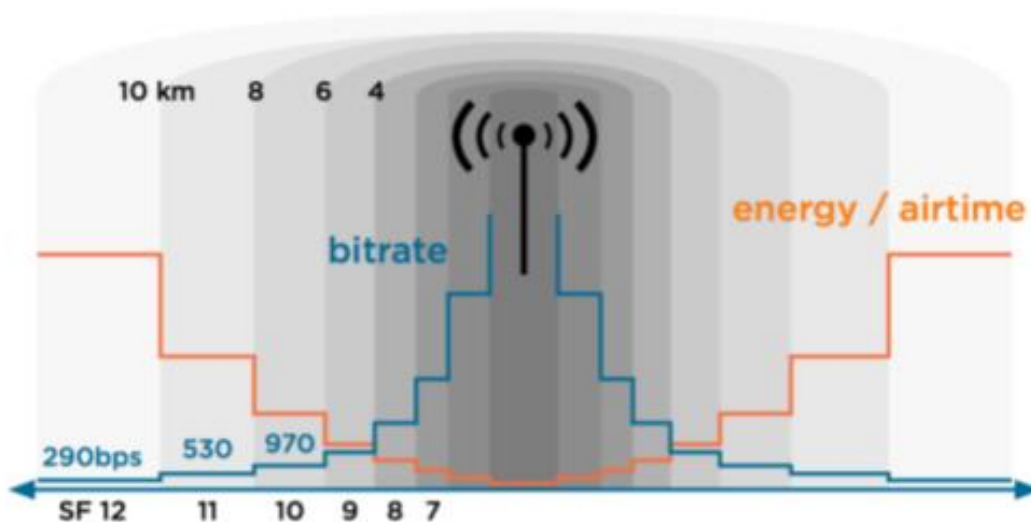


Fig. 2. Relación velocidad/distancia en LoRaWAN [2]

II.1.4. DISPOSITIVOS DE LORAWAN

LoRaWAN ha tomado en cuenta que no todos los dispositivos finales se van a usar con un mismo propósito y que por el contrario estos dispositivos van a presentar ciertos requisitos y ofrecer diferentes aplicaciones, esta tecnología ha definido 3 clases de dispositivos que se definirán a continuación:

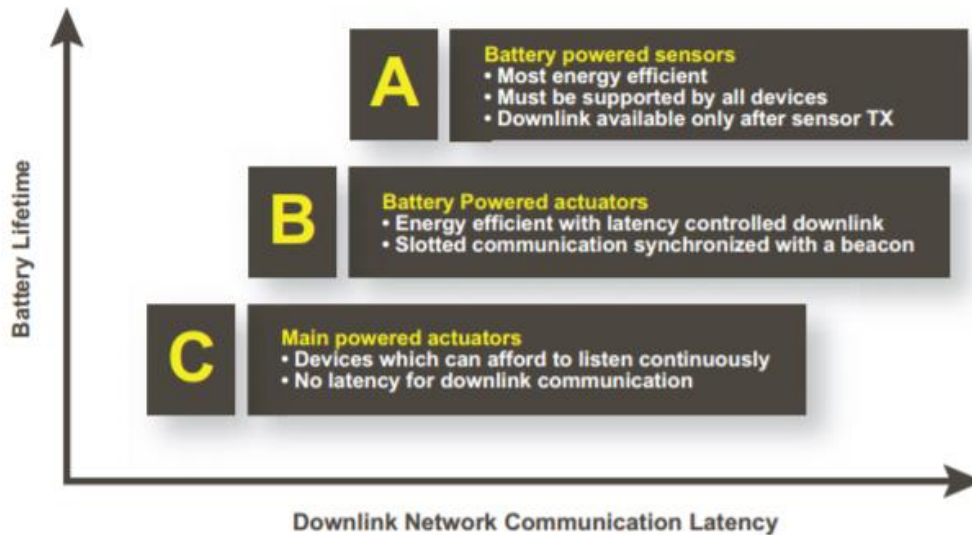


Fig. 3. Clases de dispositivos de LoRaWAN [3]

- Dispositivos de clase A: permiten una comunicación bidireccional, pero están limitados a poder recibir datos si solamente han enviado un paquete antes. Eso es porque cada vez que el dispositivo envía un paquete, se abren dos ventanas de recepción, la primera un segundo después de la transmisión y la segunda un segundo después de la primera ventana, con la oportunidad de recibir un paquete de vuelta. Este paquete de vuelta contiene el ACK del paquete enviado, así como datos de la aplicación si es necesario. La ranura de transmisión programada por el dispositivo final se basa en sus propias necesidades de comunicación con una pequeña variación basada en una base de tiempo aleatoria (tipo de protocolo ALOHA) [3]. Debido a su comunicación condicionada estos son los dispositivos de menor consumo energético.
- Dispositivos de clase B: Estos dispositivos añaden la capacidad de recibir datos sin necesidad de enviar un paquete antes. Su funcionalidad permite que la aplicación envíe datos a los dispositivos de forma programada, esto se consigue mediante el envío periódico de balizas por parte del gateway. Estas balizas permiten a los dispositivos estar sincronizados con el gateway, y de esta forma pueden negociar tiempos de recepción de paquetes desde el gateway al dispositivo, lo que permite al servidor saber cuándo el dispositivo está

escuchando. Debido a su recepción periódica de balizas estos dispositivos presentan mayor consumo de energía que los dispositivos de clase A.

- Dispositivos de clase C: Son los dispositivos que se encuentran permanentemente escuchando, es decir pueden recibir datos en cualquier momento siempre y cuando no estén transmitiendo. Estos dispositivos proporcionan los mejores tiempos de respuesta y capacidad de envío desde el servidor a los nodos, a costa de un consumo energético mucho mayor respecto a las clases A y B.

II.1.5. ESTRUCTURA DE PAQUETES LORAWAN

En LoRaWAN se encuentran dos tipos de mensaje de downlink y uplink. Los mensajes de uplink los envían los dispositivos finales al servidor de red, utilizando uno o varios gateways como intermediarios, estos mensajes utilizan el modo explícito de paquetes de radio LoRa, en el que se incluyen:

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload	CRC
----------	------	----------	------------	-----

Tabla 3. Estructura PHY de mensajes de uplink [5]

Cada mensaje de downlink es enviado por el servidor de red a un solo dispositivo final pasando por un solo gateway, estos mensajes utilizan el modo explícito de paquete de radio, en el que se incluye el encabezado físico LoRa.

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload
----------	------	----------	------------

Tabla 4. Estructura PHY de mensajes de downlink [5]

El Payload de capa física cuenta con una cabecera MAC, el MAC Payload y un Message Integrity Code, un código de cuatro bytes que se calcula a partir de la Network session key (NwkSKey). La cabecera MAC especifica el tipo de mensaje y la versión del formato de la trama de la especificación de la capa LoRaWAN con la que ha sido codificada. Existen seis tipos de mensajes MAC.

MType	Descripción
000	Join Request
001	Join Accept
010	Unconfirmed Data Up
011	Unconfirmed Data Down
100	Confirmed Data Up
101	Confirmed Data Down

110	RFU
111	Proprietary

Tabla 5. Tipos de mensaje MAC [5]

La comunicación en LoRaWAN se efectúa entonces de nodos a gateway y de gateway al servidor de red. El gateway es el encargado de convertir los paquetes LoRaWAN en paquetes UDP y viceversa.

El nodo puede transmitir tantos mensajes seguidos como números de canales tenga habilitados. Cuando el nodo transmite un mensaje con confirmación, este llega al gateway, que convierte el mensaje en un paquete UDP y lo reenvía al servidor de red. Aunque el mensaje no requiera confirmación, el gateway sí recibe respuesta del servidor de red. Una vez ha transmitido por el último canal disponible, el nodo no podrá volver a transmitir hasta pasado el ciclo de trabajo de cada canal [6].

II.1.6. SEGURIDAD DE LORAWAN

Es indispensable que para cualquier LPWAN se incorpore niveles de seguridad, con el fin de proteger los datos e información. LoRaWAN incluye dos niveles de seguridad uno para la red y otro para la aplicación.

La seguridad de la red garantiza la autenticidad del nodo en la red, mientras que la capa de seguridad de la aplicación garantiza que el operador de red no tenga acceso a los datos de la aplicación del usuario final, esto se logra haciendo uso del algoritmo de cifrado AES128:

- Network Session Key: Clave de 128 bits que garantiza la seguridad a nivel de red.
- Application Session Key: Clave de 128 bits que garantiza la seguridad extremo a extremo a nivel de aplicación.
- Application Key: Clave de 128 bits que garantiza la seguridad extremo a extremo a nivel de aplicación.

La conexión de un dispositivo a una red es uno de los primeros aspectos relacionados con la seguridad. En LoRaWAN se establece un mecanismo seguro por el que se autoriza a un dispositivo final a unirse a una red, has dos procedimientos para realizar la configuración y registro de los dispositivos finales denominados métodos de activación: Over The Air Activation (OTAA) y Activation By Personalization (ABP).

- Over The Air Activation (OTAA).- EL dispositivo final debe seguir un procedimiento de conexión con la red para poder participar en la misma, se debe configurar de manera manual una serie de parámetros necesarios para el procedimiento de conexión como son: un

identificador global único (DevEUI) que identifica al nodo, el identificador de aplicación (AppEUI) y una llave criptográfica (AppKey) específica para el dispositivo de la que se derivará la llave de sesión y la llave de sesión de aplicación. El procedimiento de activación comienza con el envío por parte del dispositivo final de una mensaje MAC de petición de unión, denominado join-request, entonces el servidor de red responde con un mensaje MAC de aceptación de unión join.accept.

- Activation By Personalization (ABP).- en el dispositivo final se configura de forma manual la dirección del dispositivo y las dos llaves de sesión de forma que este puede transmitir desde el primer momento.

Además, todo el tráfico entre un dispositivo final y un servidor de red se cifra y se firma mediante la utilización combinada de dos llaves: la llave de sesión de aplicación (AppSkey) y la llave de sesión de red (NwkSkey). Ambas llaves se derivan de la llave AppKey y sólo son conocidas por un dispositivo final concreto y el servidor de red.

II.1.7. CASOS DE USO DE REDES LORAWAN

Al momento la red LoRaWAN se encuentra en fase de desarrollo, es por esto que aún no se encuentran en el mercado gran variedad de productos o servicios basados en esta tecnología, sin embargo, ya se han ejecutado proyectos relacionados a aplicaciones de Smart city que pueden solventar la optimidad de este tipo de redes.

Entre los casos de uso ya evaluados para estas redes se pueden enunciar los siguientes [12]:

- ✓ Monitoreo en tiempo real.- La agricultura, la detección de fugas o el control ambiental son aplicaciones con un número reducido de mensajes periódicos / aperiódicos y restricciones de retardo relajadas. Por el contrario, el intervalo de comunicación debe ser lo suficientemente largo para hacer frente a la ubicación dispersa de los dispositivos finales. LoRaWAN ha sido diseñado para manejar el tráfico generado por este tipo de aplicaciones y cumple con sus requisitos, siempre y cuando el despliegue de los gateways sea suficiente para cubrir todos los dispositivos finales.
- ✓ Smart City.- LoRaWAN ha demostrado su éxito con la iluminación inteligente, el estacionamiento inteligente y la recolección inteligente de residuos gracias a su escala y a la naturaleza de los datos generados por esas aplicaciones. Estos abarcan mensajería periódica con cierta tolerancia de retardo. LoRaWAN es una tecnología apropiada para este caso de uso ya que maneja el área de cobertura amplia y el número significativo de usuarios a expensas del aumento del número de colisiones, latencia y jitter.

- ✓ Logística.- soluciones como control y gestión de flotas pueden ser apoyadas por LoRaWAN; además, el roaming es uno de los desarrollos bajo definición dentro de LoRa Alliance para mejorar la movilidad. Específicamente, se espera que la futura solución de roaming soporte conexiones back-end a back-end, compensación y facturación entre operadores, ubicación de dispositivos finales y aprovisionamiento transparente de dispositivos a través de redes.

III. ENTORNO DE TRABAJO

En este capítulo se describe el material y procedimientos empleados en la construcción de la pasarela LoRa, además se detalla las características relevantes del dispositivo final (nodo) utilizado y el proceso de establecer la comunicación entre los dos elementos de red.

III.1. MÓDULO CONCENTRADOR LORA IC880A

El IC880A es capaz de recibir paquetes de diferentes dispositivos finales y enviar paquetes con diferentes factores de propagación en hasta 8 canales en paralelo, proporciona la posibilidad de permitir una comunicación robusta entre la pasarela y una gran cantidad de nodos LoRa distribuidos en un amplio rango de distancia.

Debido a la capacidad de poder recibir paquetes con diferentes factores de propagación permite implementar arquitecturas de red innovadoras y muy ventajosas frente a otros dispositivos, como por ejemplo: los nodos de punto final pueden cambiar la frecuencia con cada transmisión en un patrón aleatorio dando más robustez al sistema frente a interferencias, pueden también realizar dinámicamente la adaptación de la tasa de enlace sin agregar complejidad al protocolo; además para la implementación de la red se puede utilizar una topología en estrella evitando así capas de red complejas y tráfico de protocolo de red adicional.

El iC880A utiliza la técnica de modulación de espectro ensanchado LoRa de Semtech. Esta modulación, en contraste con las técnicas de modulación convencionales, permite un aumento en el presupuesto del enlace y un aumento de la inmunidad a la interferencia dentro de la banda [1].

El módulo concentrador actualmente está disponible en dos versiones, "iC880A-USB" y el "iC880A-SPI", siendo este último el utilizado en el presente proyecto.



Fig. 4. Módulo concentrador IC880A-SPI

El iC880A contiene el SX1301 de Semtech, que es un chip de banda base digital que incluye un enorme motor de procesamiento de señal digital para la comunicación ISM (Industrial, Scientific and Medical) de largo alcance, además contiene 10 trayectos de recepción programables, los mismos que presentan niveles diferenciados de programación y permiten diferentes casos de uso, pero es capaz de demodular hasta 8 paquetes simultáneamente.

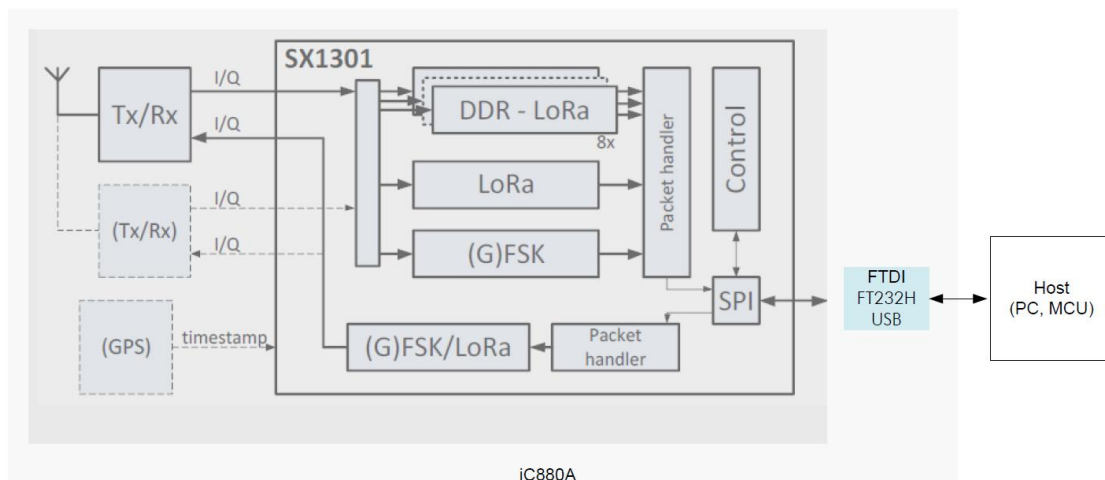


Fig. 5. Diagrama de bloques de iC880A con procesador de banda base SX1301 [1]

Debido al hecho de que los factores de propagación son ortogonales y el IC880A soporta hasta 10 caminos de demodulación, la capacidad de canal de una célula LoRa puede incrementarse usando IC880A en comparación con las técnicas de modulación convencionales. Las características clave de este módulo son:

- ✓ Tamaño compacto 79.8 x 67.3 mm
- ✓ Tecnología de modulación LoRa
- ✓ Banda de frecuencias 868MHz

- ✓ Factores de propagación ortogonales
- ✓ Sensibilidad hasta -138 dBm
- ✓ Interfaz USB o SPI
- ✓ Procesador de banda base SX1301
- ✓ Tensión de alimentación 5 V
- ✓ Nivel de potencia de salida de hasta 20 dBm
- ✓ Receptor GPS (opcional)
- ✓ Alcance hasta 15 km (Línea de Visión)
- ✓ Rango de varios km en el entorno urbano

El iC880A necesita un sistema host para el funcionamiento correcto. Este sistema host puede ser un PC o MCU que se conectará al iC880A a través de USB o SPI, para este caso específico se ha utilizado una Raspberry PI 3.

III.2. RASPBERRY PI 3

La Raspberry Pi es un computador de placa reducida de bajo costo, para ponerla en funcionamiento se ha utilizado como sistema operativo Raspbian, éste puede descargarse gratuitamente de internet y para pasarlo a la Raspberry Pi es necesario contar con una tarjeta microSD de al menos 4 Gb clase 10, se ha optado por una de 32 Gb.

Las características de hardware que presenta la Raspberry Pi se enuncian a continuación:

- Quad Core de 1,2 GHz Broadcom BCM2837 CPU de 64 bits
- 1 GB de RAM
- BCM43438 LAN inalámbrica y Bluetooth Low Energy (BLE) a bordo
- 40-pin GPIO extendido
- 4 puertos USB
- 4 polos salida estéreo y puerto de vídeo compuesto
- Puerto HDMI
- CSI puerto de la cámara para conectar una cámara Frambuesa Pi
- DSI puerto de pantalla para conectar una pantalla táctil de Frambuesa Pi
- puerto micro SD para cargar el sistema operativo y el almacenamiento de datos
- Fuente de alimentación conmutada actualizado Micro USB de hasta 2,5 A

III.3. ADAPTADOR USB IU880B

Este adaptador de alto rendimiento actúa como un dispositivo final en una red LoRaWAN y permite la comunicación inalámbrica bidireccional para la banda de frecuencia de 868 MHz, utilizando la tecnología de modulación LoRa.

Las principales características de este dispositivo son:

- ✓ Tecnología de modulación LoRaTM
- ✓ Interfaz USB
- ✓ Rango de tensión de alimentación de 4,0 a 5,25 V
- ✓ Antena integrada
- ✓ Amplificador de potencia integrado de +20 dBm

En modo LoRa el iU880B ofrece tres opciones de ancho de banda de 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz con factores de dispersión que van de 7 a 12 [8], los mismos que comprenden los siguientes parámetros configurables:

Spreading Factor	Chips/Symbol	SNR/[dB]
7	128	-7.5
8	256	-10
9	512	-12.5
10	1024	-15
11	2048	-17.5
12	4096	-20

Tabla 6. Factor de dispersión configurable en IU880B [8]

Para mejorar aún más la robustez del enlace de radio iU880B proporciona codificación de errores cíclicos con diferentes velocidades de codificación. Con el uso de este esquema de codificación puede aplicarse la detección y corrección de errores.

Coding Rate	Cyclic Coding Rate	Overhead Ratio
1	4/5	1.25
2	4/6	1.5
3	4/7	1.75
4	4/8	2

Tabla 7. Codificación de errores del IU880B [8]

La amplia gama de capacidades que ofrece el iU880B se puede probar con las herramientas WiMOD como WiMOD_LR_Studio o WiMOD_LoRaWAN_EndNode_Studio, disponibles en la página web de IMST GmbH.

III.4. CONSTRUCCIÓN DE LA PASARELA

Para dar paso a la construcción de la pasarela, primeramente se debió reunir el material necesario que se enlista a continuación:

Cant	Material	Precio (Euros)
1	Módulo concentrador IC880A	155,00
1	Raspberry PI 3	37,00
1	Antena de 7.5 dBi	7,00
1	Pigtail para la antena	5,00
1	Fuente de alimentación de 2A de conector micro USB	8,00
7	Conectores jumper hembra-hembra	3,00
1	Tarjeta microSD de 32 Gb clase 10	12,00
1	Caja plástica de 20x12x7 cm	10,00
	TOTAL	237,00

Tabla 8. Lista de materiales utilizados para construir la pasarela LoRa

Para iniciar se trabajó con la tarjeta microSD que necesita la Raspberry para su correcto funcionamiento; haciendo uso del software SDFormatter se limpió la tarjeta dejándola lista para instalar en ella el sistema operativo.

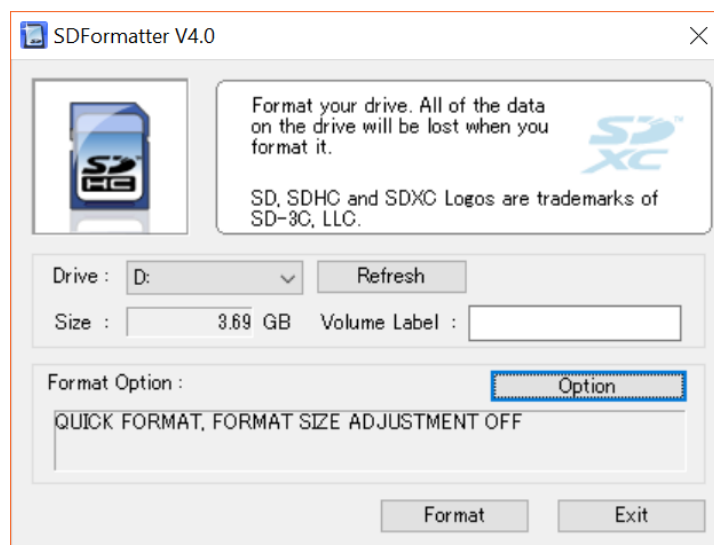


Fig. 6 Ventana del software SDFormatter

En este caso se optó por Raspbian Jessie Lite como sistema operativo para la placa Raspberry, el mismo que puede descargarse gratuitamente de internet desde la página oficial de Raspberry Pi.

Usando Windows en el PC y con la ayuda del software Win32DiskImager se grabó la imagen en la tarjeta dejándola lista para ser ubicada en la placa, y con esto ya se puede dar inicio a la Raspberry.

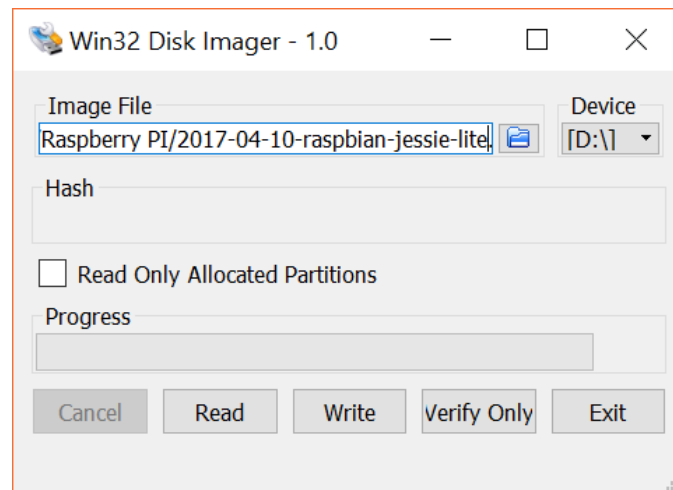


Fig. 7 Ventana del Software WIN32 Disk Imager

Para gestionar el control desde la PC, se creó un archivo vacío con el nombre ssh en la partición boot de la tarjeta, el mismo que permite iniciar la comunicación SSH de la raspberry en el arranque, lo que permitirá tener acceso a la raspberry sin necesidad de disponer de pantallas o teclados adicionales.

Ya instalada la SD en la raspberry se conectó el cable Ethernet y la fuente de alimentación, para proceder a configurarla.

Desde el ordenador conectado en la misma LAN y con la ayuda del software PuTTY se dieron las instrucciones de configuración, a partir del comando *raspi-config*:

- Se habilitó el módulo *SPI*.
- Se expandió los archivos del sistema.
- Fueron configurados los parámetros de localidad y zona horaria.
- Al finalizar se actualizó el sistema operativo para evitar posibles problemas que pueden surgir en configuraciones posteriores.

Además, como la pasarela utilizará los servidores de la red global *The Things Network* se creó un usuario TTN, el mismo que fue agregado a *sudoers* lo que facilitará su registro en esta red, las líneas de comando escritas en la consola de la Raspbian fueron las siguientes:

```
$ sudo adduser ttn
$ sudo adduser ttn sudo
```

Una vez finalizada la configuración de la raspberry se procedió a conectar los pines necesarios que permitirán la comunicación con el módulo IC880A, estos se detallan en la siguiente tabla:

Pin de IC880A	Descripción	Pin en Raspberry
21	Alimentación 5V	2
22	GND	6
13	Reiniciar	22
14	SPI CLK	23
15	MISO	21
16	MOSI	19
17	NSS	24

Tabla 9. Conexiones de Pines entre Raspberry Pi y módulo IC880A

Después de verificar la correcta conexión entre los dispositivos, se procedió a instalar la antena en el concentrador, y a partir de aquí ya se dio inicio a la instalación del software del módulo IC880A en la Raspberry.



Fig. 8 Dispositivos correctamente conectados

El software para el módulo IC880A se lo encontró en el repositorio de LoRa [9], señalado en la hoja de datos del fabricante.

Iniciando nuevamente la raspberry y comprobando que se tiene acceso a internet se ejecutaron las siguientes líneas de comando en la consola.

```
$ git clone -b spi https://github.com/ttn-zh/ic880a-gateway.git
~/ic880a-gateway
$ cd ~/ic880a-gateway
$ sudo ./install.sh spi
```

Donde la primera línea pide clonar el software de instalación desde el repositorio a la raspberry, se continúa cambiando de directorio y finalmente se instala el software libre *lora-gateway-bridge* en la ubicación actual, por defecto el instalador cambia el nombre del host a *ttn-gateway* para evitar confusiones con otras raspberries que puede haber en la red.

Al finalizar con éxito el proceso de instalación del software, se visualiza en pantalla la serie EUI de 128 bits de identificación de la pasarela, la misma que se reserva para configuraciones posteriores.

```

gcc -I-../lora_gateway/libloragw/inc -c -O2 -Wall -Wextra -std=c99 -Iinc -I. s
rc/ghost.c -o obj/ghost.o
gcc -c -O2 -Wall -Wextra -std=c99 -Iinc -I. src/monitor.c -o obj/monitor.o
gcc -L-../lora_gateway/libloragw obj/poly_pkt_fwd.o obj/parson.o obj/base64.o
obj/ghost.o obj/monitor.o -o poly_pkt_fwd -lloragw -lrt -lpthread
make[1]: Leaving directory '/opt/ttn-gateway/packet_forwarder/poly_pkt_fwd'
make all -e -C util_ack
make[1]: Entering directory '/opt/ttn-gateway/packet_forwarder/util_ack'
gcc -c -O2 -Wall -Wextra -std=c99 -Iinc -I. src/util_ack.c -o obj/util_ack.o
gcc obj/util_ack.o -o util_ack
make[1]: Leaving directory '/opt/ttn-gateway/packet_forwarder/util_ack'
make all -e -C util_sink
make[1]: Entering directory '/opt/ttn-gateway/packet_forwarder/util_sink'
gcc -c -O2 -Wall -Wextra -std=c99 -Iinc -I. src/util_sink.c -o obj/util_sink.o
gcc obj/util_sink.o -o util_sink
make[1]: Leaving directory '/opt/ttn-gateway/packet_forwarder/util_sink'
make all -e -C util_tx_test
make[1]: Entering directory '/opt/ttn-gateway/packet_forwarder/util_tx_test'
gcc -c -O2 -Wall -Wextra -std=c99 -Iinc -I. src/util_tx_test.c -o obj/util_tx_te
st.o
gcc -c -O2 -Wall -Wextra -std=c99 -Iinc -I. src/base64.c -o obj/base64.o
gcc obj/util_tx_test.o obj/base64.o -o util_tx_test
make[1]: Leaving directory '/opt/ttn-gateway/packet_forwarder/util_tx_test'
/opt/ttn-gateway /home/ttn/ic880a-gateway
Cloning into 'gateway-remote-config'...
remote: Counting objects: 877, done.
remote: Compressing objects: 100% (44/44), done.
remote: Total 877 (delta 27), reused 33 (delta 0), pack-reused 825
Receiving objects: 100% (877/877), 142.42 KiB | 0 bytes/s, done.
Resolving deltas: 100% (476/476), done.
Checking connectivity... done.
/opt/ttn-gateway/gateway-remote-config /opt/ttn-gateway /home/ttn/ic880a-gateway
/home/ttn/ic880a-gateway
Gateway EUI is: B827EBFFFFE5850C0
The hostname is: ttn-gateway
Open TTN console and register your gateway using your EUI: https://console.theth
ingsnetwork.org/gateways
Installation completed.
Created symlink from /etc/systemd/system/multi-user.target.wants/ttn-gateway.ser
vice to /lib/systemd/system/ttn-gateway.service.
The system will reboot in 5 seconds...

```

Fig. 9. Captura de pantalla al finalizar el proceso de instalación del software del módulo IC880A, donde se presenta el identificador EUI de la pasarela

Para hacer uso de la configuración remota se ha creado un archivo JSON nombrado con la EUI en el repositorio [9], que permitirá dar de alta la pasarela en los servidores de The Things Network (TTN), este archivo contiene la siguiente información:

```

Branch: master | gateway-remote-config / B827EBFFFFE5850C0.json | Find file | Copy path
MarianelaCG Update B827EBFFFFE5850C0.json | e12a717 15 days ago
1 contributor
19 lines (18 sloc) | 436 Bytes | Raw | Blame | History
1 {
2   "gateway_conf": {
3     "gateway_ID": "B827EBFFFFE5850C0",
4     "servers": [
5       {
6         "server_address": "router.eu.thethings.network",
7         "serv_port_up": 1700,
8         "serv_port_down": 1700,
9         "serv_enabled": true
10      }
11     ],
12     "ref_latitude": 39.47948100,
13     "ref_longitude": -0.34239000,
14     "ref_altitude": 10,
15     "contact_email": "nelitacg91@gmail.com",
16     "description": "TTN UPV"
17   }
18 }

```

Fig. 10. Contenido del archivo JSON creado

Posteriormente, y para verificar que la pasarela ha sido correctamente instalada, además de poder controlar el tráfico que circula a través de la misma, se procedió a registrarla en la consola de TTN, iniciando sesión en *thethingsnetwork.org* e ingresando la información solicitada que se detalla en la siguiente imagen.

REGISTER GATEWAY

Gateway EUI
The EUI of the gateway as read from the LoRa module

EB 82 7E BF FF E5 85 0C 8 bytes

I'm using the legacy packet forwarder
Select this if you are using the legacy [Semtech packet forwarder](#).

Description
A human-readable description of the gateway

Pasarela UPV

Frequency Plan
The [frequency plan](#) this gateway will use

Europe 868MHz

Router
The router this gateway will connect to. To reduce latency, pick a router that is in a region which is close to the location of the router itself.

ttn-router-eu

Fig. 11. Registro de la pasarela en thethingsnetwork.org

Para poder visualizar la pasarela como conectada en la red de TTN, se esperó el lapso de 24 horas, tiempo necesario para que sea aceptado el archivo JSON en el repositorio y se los servidores de TTN sean actualizados con el alta de la nueva pasarela.

Finalmente, y para protección de los dispositivos, estos fueron alojados en una caja de proyectos electrónicos, obteniendo como resultado una pasarela LoRa que puede ser ubicada en interiores o exteriores a un precio significativamente económico y que está a la par con pasarelas ofrecidas en el mercado de características similares a un precio superior.

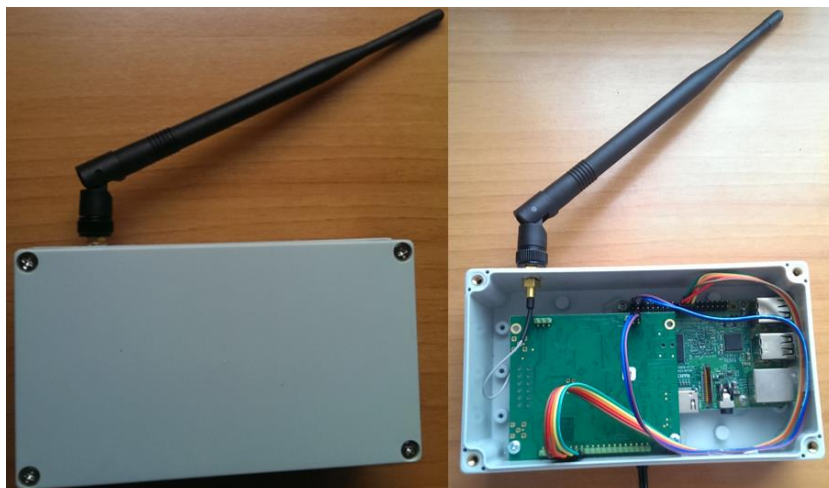


Fig. 12 Resultado final de la construcción de la pasarela LoRa

III.5. ESTABLECIMIENTO DE COMUNICACIÓN ENTRE LA PASARELA Y EL NODO IU880B

Una vez la pasarela LoRa se encuentre en funcionamiento solo resta establecer la comunicación con el módulo IU880B y tener la capacidad de enviar datos a la pasarela.

El nodo IU880B para trabajar en el modo LORAWAN debe ser configurado y controlado por el software WiMOD_LoRaWAN_EndNode_Studio desarrollado por IMST, que es una interfaz de usuario la cual permite su configuración de forma sencilla.

Para gestionar la comunicación con la pasarela primeramente se creó una aplicación en los servidores de TTN iniciando sesión en *thethingsnetwork.org* e ingresando al apartado aplicaciones, donde se dio una ID y descripción de la aplicación, aquí la red TTN se encarga de generar un EUI identificativo para la aplicación.

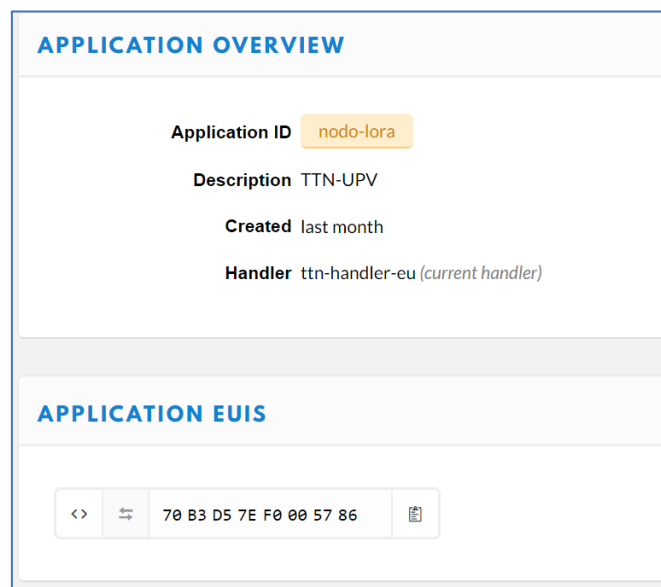


Fig. 13. Datos de la aplicación creada en la TTN

Para registrar el nodo en esta red se lo identificó en la aplicación antes mencionada, ingresando datos como el ID y el EUI del dispositivo; además de seleccionar OTAA como método de activación.

A través del software WiMOD_LoRaWAN se procedió a configurar el nodo para establecer la comunicación con la pasarela por el método OTAA, ingresando la EUI y la KEY de la aplicación, que deben coincidir con las que se tiene en los servidores de TTN y enviando un mensaje JOIN a la pasarela se solicitó unirse a la red, al recibir el mensaje de aceptación se establece la comunicación entre los dos dispositivos, y el nodo se encuentra listo para poder enviar o recibir paquetes desde o hacia la pasarela; esta información se detalla en la siguiente captura de pantalla.

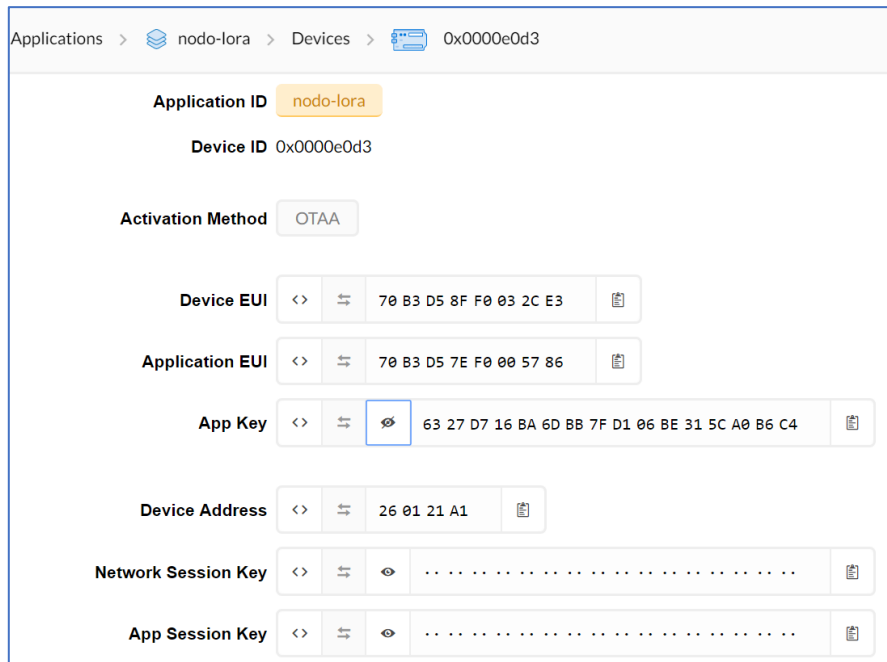


Fig. 14. Datos de identificación ingresados en el registro del nodo en la TTN

Es necesario mencionar que, al estar usando los servidores de The Things Network, la pasarela necesita tener acceso a internet pues es en estos servidores donde se encuentra alojada la aplicación que vincula a los dos dispositivos tanto el nodo como la pasarela.

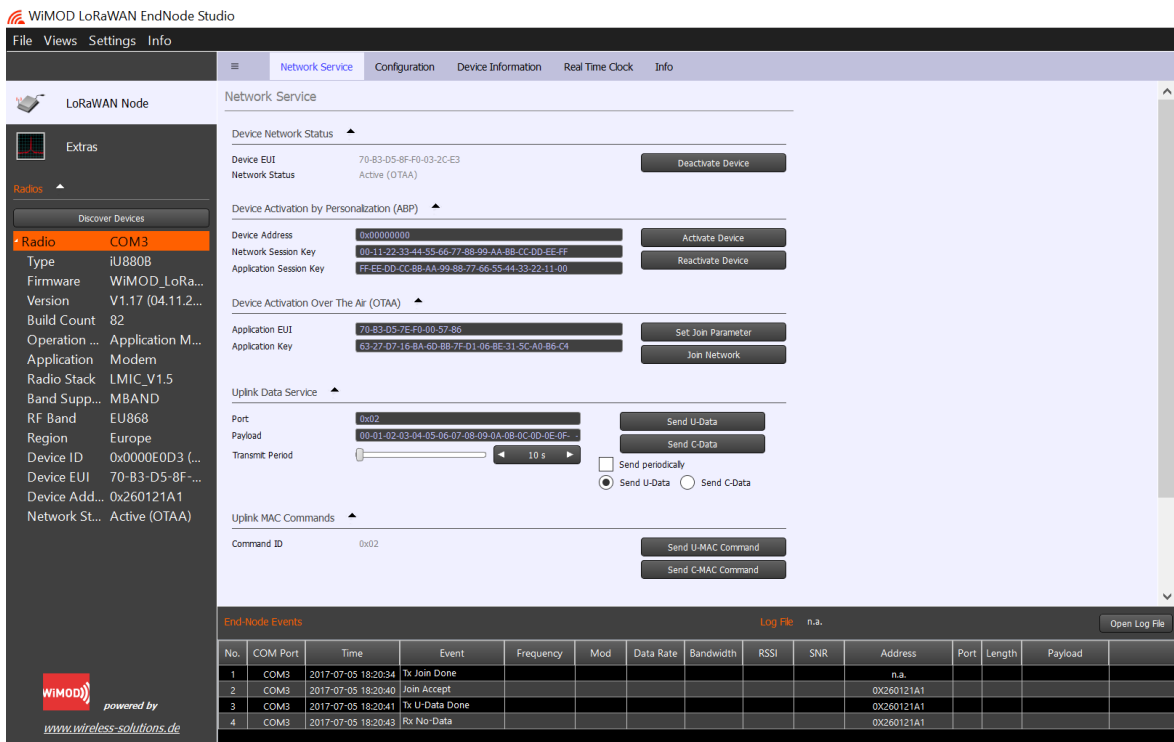


Fig. 15. Captura de Pantalla de la interfaz del nodo IU880B, con los datos de configuración de red ingresados y establecimiento de comunicación con la pasarela por el método OTAA.

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para evaluar a la pasarela se la ha ubicado en la 2da planta alta del edificio 4D del campus Vera de la UPV, dándole acceso a internet a través de un cable ethernet, lo que permite su comunicación con los servidores de la red TTN.

Antes de dar inicio al envío de mensajes desde el nodo a la pasarela, se configuró los parámetros de transmisión del dispositivo final a través del software WiMOD_LoRaWAN_EndNode_Studio se estableció:

- La frecuencia de transmisión a 868 MHz
- 10 dBm como potencia de transmisión máxima
- El factor de dispersión variable
- Se estableció en 15 reintentos de envío del paquete

El factor de dispersión en este caso fue ajustado dependiendo de la distancia a la que se encuentre el nodo, considerando siempre utilizar en de mayor capacidad; y las retransmisiones se establecieron en 15 para los casos en que la comunicación entre los dispositivos era latente.

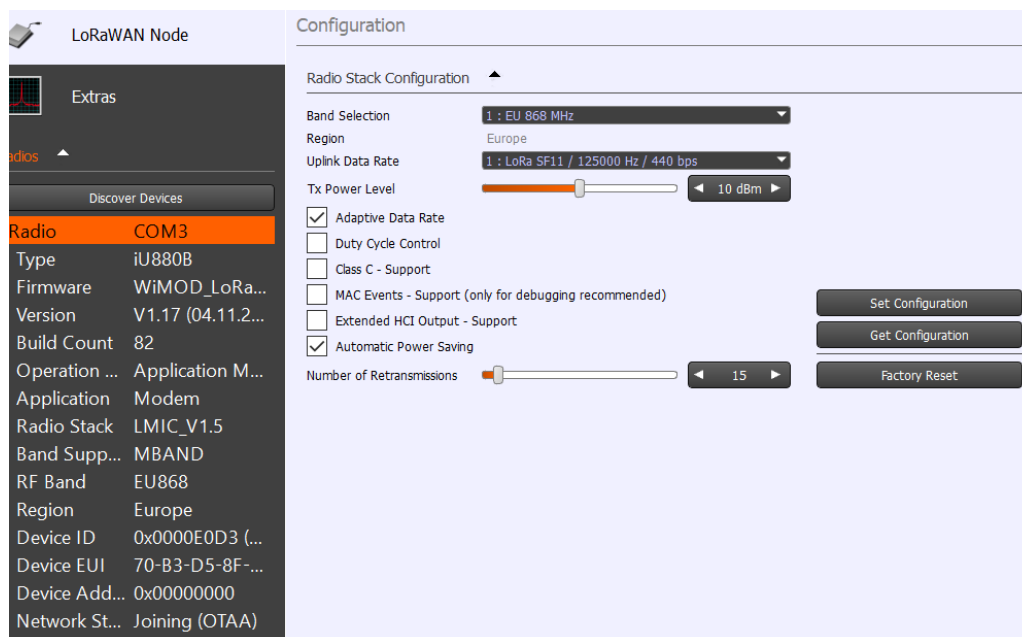


Fig. 16 Configuración de los parámetros de transmisión del nodo IU880B

Es necesario señalar que se desactivo el control de ciclo de trabajo para poder permitir el reenvío de paquetes sin necesidad de la espera a que culmine este ciclo y así agilizar la toma de pruebas.

Para determinar la cobertura de la pasarela dentro del campus Vera, se procedió a enviar un mensaje desde el nodo IU880B de 29 bytes de payload +ACK, desplazándose alrededor de todo el campus y obteniendo datos como: nivel de potencia recibida o sus siglas en inglés RSSI, relación

señal a ruido (SNR) y tiempo en el aire del paquete, los mismos que fueron visualizados en los servidores de TTN, como se puede verificar en la siguiente imagen:

The screenshot shows the 'GATEWAY TRAFFIC' interface for gateway 'eui-b827ebfffe5850c0'. It features tabs for 'Overview', 'Traffic', and 'Settings'. Below the title, there are filters for 'uplink', 'downlink', and 'join', and a search bar with '0 bytes'. A table displays the following data:

time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (ms)	cnt	dev addr	payload size
20:07:52	868.1	lora	4/5	SF 12 BW 125	1646.6	28	26 01 2F 18	29 bytes
19:54:32	867.3	lora	4/5	SF 12 BW 125	1646.6	25	26 01 2F 18	29 bytes
19:42:07	868.1	lora	4/5	SF 12 BW 125	1646.6	22	26 01 2F 18	29 bytes
19:24:08	867.1	lora	4/5	SF 12 BW 125	1646.6	18	26 01 2F 18	29 bytes
19:13:08	867.3	lora	4/5	SF 12 BW 125	1646.6	16	26 01 2F 18	29 bytes
19:01:17	868.1	lora	4/5	SF 12 BW 125	1646.6	11	26 01 2F 18	29 bytes

Fig. 17 Información obtenida de los servidores TTN de la comunicación entre el dispositivo final y la pasarela

Se eligió un mensaje con ACK, para verificar que existe comunicación bidireccional entre los dos dispositivos.

La información que se puede obtener de la pasarela y que es registrada en los servidores de TTN en cada mensaje recibido tiene la siguiente estructura:

```

"gw_id": "eui-b827ebfffe5850c0",
  "payload":
  "gI8IASaAAQACoVdLNey5QDvuK8DM9WZRitROQmQ=",
  "f_cnt": 1,
  "lora": {
    "spreading_factor": 10,
    "bandwidth": 125,
    "air_time": 411648000
  },
  "coding_rate": "4/5",
  "timestamp": "2017-07-13T16:20:45.146Z",
  "rssi": -88,
  "snr": 8.8,
  "dev_addr": "2601258F",
  "frequency": 868100000
}

```

Para determinar la cobertura de la pasarela en el campus se tomaron datos en 107 puntos, poniendo a prueba los 6 factores de dispersión (SF7...SF12) lo que permitió obtener el throughput de cada

uno, en el siguiente mapa se puede observar la ubicación de los puntos desde donde se envió el paquete de datos.

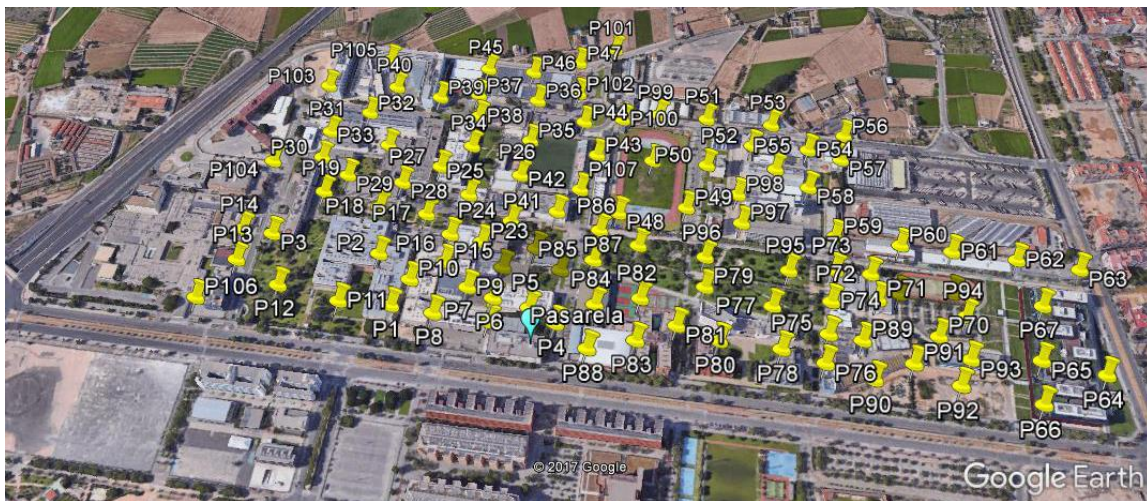


Fig. 18 Ubicación de los puntos de prueba de cobertura dentro del Campus Vera de la UPV

Es importante resaltar que todas las pruebas se las realizó en el exterior, y a una altura desde el suelo de 1,20 metros.

IV.1. COBERTURA DE LA PASARELA LORA

La característica principal de LoRa es la cobertura y se evaluó el comportamiento de la pasarela en una zona densa con muchas edificaciones, vegetación y objetos en general, siendo ubicada a una altura promedio entre las edificaciones del campus; los datos recogidos fueron los presentados en la siguiente tabla, en donde se ha resaltado en negrita el valor mínimo y máximo de RSSI obtenidos, es decir el mejor y peor enlace de comunicación.

PUNTO	RSSI[dBm]	SNR[dB]	PUNTO	RSSI[dBm]	SNR[dB]
P1	-102,0	-20,20	P55	-108,0	-10,00
P2	-102,0	-20,20	P56	-109,0	-17,00
P3	-107,0	-18,00	P57	-108,0	-18,80
P4	-65,0	10,20	P58	-107,0	-15,80
P5	-81,0	10,50	P59	-105,0	-11,80
P6	-91,0	9,50	P60	-106,0	-20,20
P7	-96,0	2,00	P61	-107,0	-17,50
P8	-101,0	-7,00	P62	-107,0	-14,50
P9	-99,0	-4,00	P63	-108,0	-17,80
P10	-105,0	-6,20	P64	-107,0	-18,50
P11	-101,0	-18,80	P65	-107,0	-8,50
P12	-101,0	-18,50	P66	-108,0	-16,20
P13	-106,0	-19,00	P67	-107,0	-4,80
P14	-105,0	-14,20	P68	-107,0	-14,50
P15	-103,0	-2,20	P69	-108,0	-14,00

P16	-107,0	-20,20
P17	-105,0	-11,00
P18	-102,0	-18,00
P19	-103,0	-15,20
P20	-73,0	10,80
P21	-95,0	9,00
P22	-100,0	4,80
P23	-107,0	-5,20
P24	-107,0	-0,20
P25	-103,0	1,20
P26	-107,0	-13,00
P27	-107,0	-19,20
P28	-107,0	-3,20
P29	-107,0	-17,00
P30	-108,0	-17,20
P31	-107,0	-18,00
P32	-106,0	-16,00
P33	-108,0	-20,50
P34	-107,0	-7,50
P35	-105,0	-5,50
P36	-102,0	-1,80
P37	-105,0	-14,50
P38	-106,0	-17,20
P39	-107,0	-16,50
P40	-105,0	-17,80
P41	-102,0	1,20
P42	-95,0	6,00
P43	-99,0	5,50
P44	-102,0	-0,50
P45	-108,0	-15,50
P46	-106,0	-12,50
P47	-107,0	-12,00
P48	-82,0	11,80
P49	-100,0	4,00
P50	-106,0	-0,50
P51	-97,0	4,20
P52	-103,0	-0,50
P53	-105,0	-9,00
P54	-107,0	-18,80
P70	-106,0	-6,80
P71	-106,0	-3,00
P72	-107,0	-4,20
P73	-107,0	-2,20
P74	-105,0	1,20
P75	-106,0	-5,20
P76	-106,0	-11,00
P77	-107,0	-4,50
P78	-108,0	-10,80
P79	-96,0	5,20
P80	-106,0	-16,00
P81	-107,0	-5,20
P82	-95,0	11,00
P83	-107,0	-3,00
P84	-91,0	7,50
P85	-94,0	7,80
P86	-97,0	4,00
P87	-105,0	-1,20
P88	-88,0	8,80
P89	-105,0	-13,00
P90	-101,0	5,20
P91	-101,0	-8,50
P92	-103,0	-16,00
P93	-103,0	-5,80
P94	-103,0	-11,50
P95	-103,0	-5,20
P96	-99,0	0,01
P97	-95,0	3,80
P98	-101,0	-2,00
P99	-101,0	-7,80
P100	-105,0	-14,00
P101	-102,0	-9,80
P102	-94,0	4,00
P103	-105,0	-13,20
P104	-102,0	-18,50
P105	-105,0	-21,20
P106	-105,0	-17,80
P107	-102,0	4,00

Tabla 10. Datos de RSSI y SNR de la pasarela al recibir un paquete del nodo IU880B

A continuación, la información de la tabla 10 fue analizada y con la ayuda del software Microsoft Excel, en la opción de crear mapas 3D se creó un mapa de calor para apreciar de forma gráfica la cobertura de la pasarela dentro del campus Vera de la UPV.

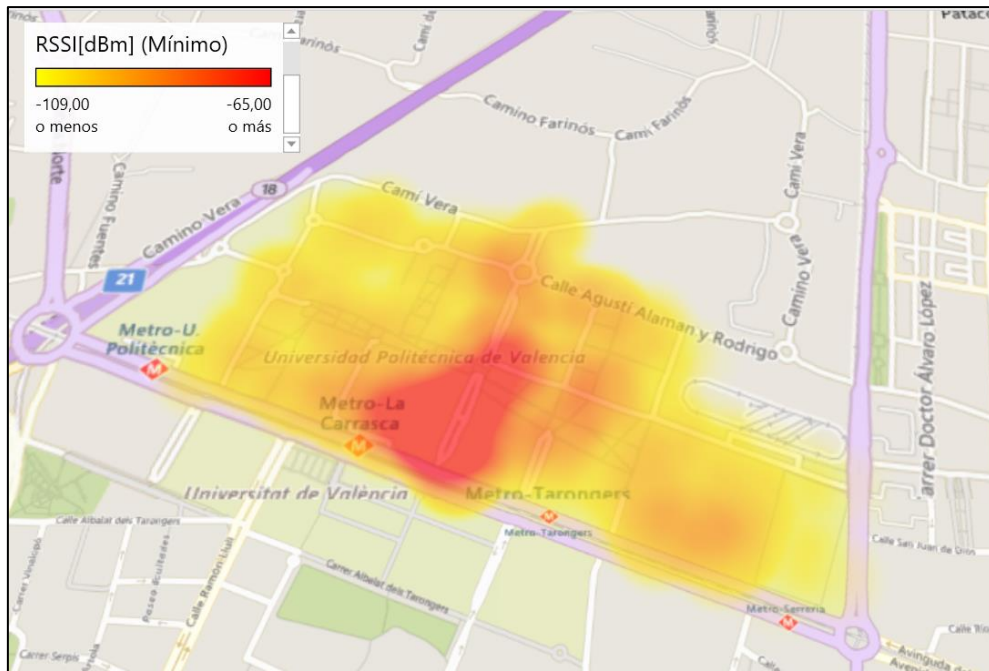


Fig. 19 Mapa de calor de RSSI de la pasarela

Como se puede apreciar en la figura 19 se consiguió establecer comunicación entre la pasarela y el nodo en casi todo el campus Vera, obteniendo un nivel máximo de potencia recibida de -65 dBm y un mínimo de -109 dBm, alcanzando una distancia máxima de aproximadamente 800 m, que es la distancia entre la pasarela y el punto 63 mostrados en la figura 18.

Además, la figura 19 muestra claramente como al ir aumentando el número de obstáculos la señal se va debilitando lo que se puede relacionar directamente con la figura 20, la misma que presenta los niveles de SNR obtenidos.

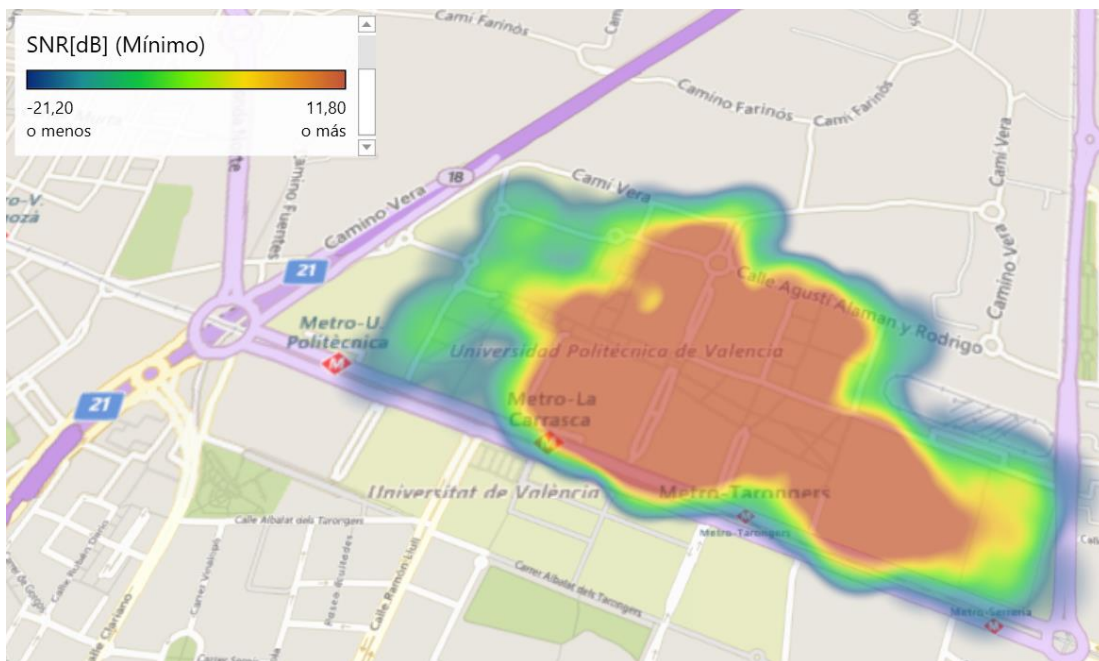


Fig. 20 Mapa de calor de SNR de la pasarela

En este caso la distancia no es predominante sino más bien los objetos que se interponen entre los dispositivos en especial las edificaciones, es por esto, que en el área izquierda inferior del mapa de la figura 17 o específicamente desde la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación no se logró transmitir ningún paquete a la pasarela.

Para este tipo de tecnologías también se considera como parámetro importante el número de reintentos para transmitir el mensaje, ya que depende de esto también el ahorro de energía en los dispositivos finales; de acuerdo a las pruebas realizadas en este proyecto se puede decir que en una gran mayoría, desde el 90% de los puntos se logró transmitir un paquete a la pasarela en el primer o segundo intento, pero en los puntos más alejados o con una muy densa edificación que hacían algún tipo de sombra al nodo la transmisión se logró entre los 10 a 15 intentos, parámetro que limitaría en parte casos de aplicación de esta tecnología.

Además, durante el envío de paquetes se utilizó la aplicación TTN Mapper instalada en un smartphone con acceso a internet, y después de ingresar a la cuenta se fue dibujando en el mapa de TTN los enlaces de comunicación, desde cada uno de los puntos de prueba, esta aplicación combina la ubicación GPS del móvil con la información del servidor de TTN en el momento en el que la pasarela recibe paquetes, la información se presenta como se observa en la figura 19 y los enlaces de cada comunicación establecidos se pueden ver en la figura 20, que corresponden al mapa global de TTN.

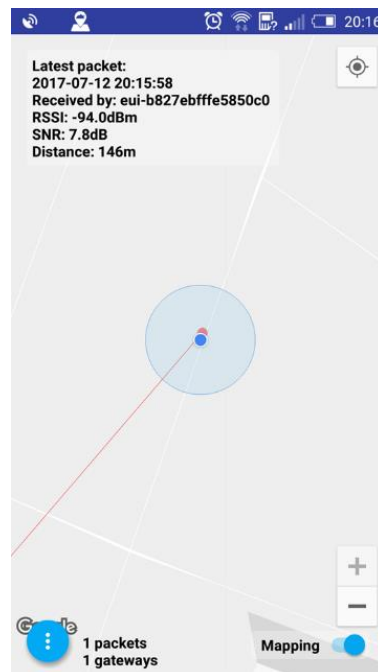


Fig. 21 Captura de pantalla del móvil en el momento de envío de un paquete desde el nodo a la pasarela

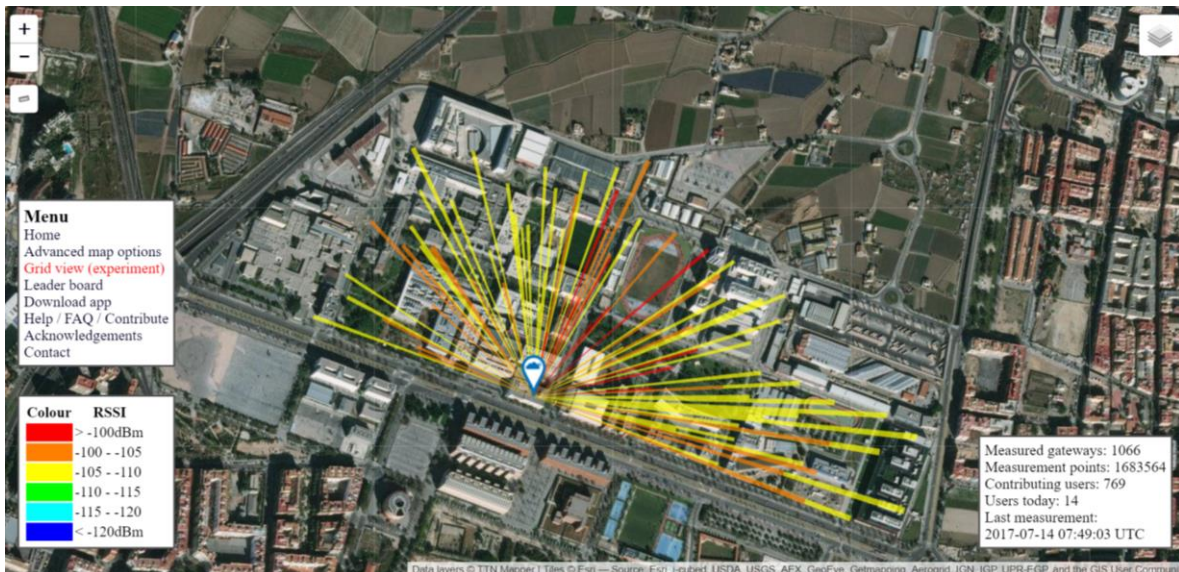


Fig. 22 Cobertura de la pasarela dibujada en el mapa de TTN

Esta aplicación presentada por The Things Network ha sido muy útil y en el momento en el que se establezca una ubicación fija a la pasarela se puede registrar su mayor alcance, esto permite tener un registro de su cobertura y así facilitar el diseño de una red de este tipo.

Cabe mencionar, que si la pasarela permanece por más de 5 días en estado de desconexión, es decir en estado OFF toda esta información es borrada del mapa, y se debe tener muy en cuenta para evitar volver a repetir el trabajo, pero si lo que se busca es actualizar la ubicación de la pasarela en el mapa es este el procedimiento.

IV.2. THROUGHPUT ALCANZADO

Para medir el throughput se envió mensajes con ACK de 29 bytes de payload, utilizando los 6 factores de dispersión de LoRa (SF7...SF12), y el dato del tiempo se lo obtuvo de los servidores de TTN, en donde se presenta por cada mensaje recibido el tiempo en el aire, es decir el tiempo que tardó el mensaje para llegar a la pasarela.

Por lo tanto, el tamaño total de los paquetes serían los 29 bytes de payload más 5 bytes del resto de campos que conforman un paquete LoRa; con este valor y el tiempo se pudo obtener los respectivos valores de throughput para cada modo de SF.

Modo	Tiempo de transmisión [ms]	Throughput [bps]
SF12	1646,6	165,18
SF11	905,2	300,50
SF10	411,6	660,83

SF9	226,3	1201,95
SF8	144,4	1883,66
SF7	66,8	4071,85

Tabla 11 Tiempo de transmisión y throughput de LoRa

Los modos SF12 y SF11 son con los que se puede alcanzar mayores distancias de cobertura por su característica de transmitir a menor velocidad, mientras que los modos SF10 e inferiores son más susceptibles a los obstáculos por lo que sacrifican valores de distancia por la velocidad de transmisión.

En las pruebas realizadas se logró transmitir paquetes desde el dispositivo final a velocidades de los modos SF7 a SF10 a una distancia no mayor a 100 metros, y superada esta distancia los factores de dispersión con los que se tuvo éxito de envío de mensajes fueron los SF11 y SF12.

IV.3. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA PASARELA

Al terminar con el desarrollo de este proyecto y en base a los resultados obtenidos se pueden enunciar las ventajas y posibles limitaciones que caracterizan a la pasarela LoRa.

Durante el desarrollo de esta pasarela no se presentó mayor complejidad y puede ser destacable la sencillez de su construcción, tomando en cuenta que el mismo fabricante da toda la información necesaria para ser analizada y obtener con éxito una pasarela de características muy favorables para redes LPWAN.

Gracias a sus buenos resultados de cobertura este tipo de pasarelas permiten extender una red de sensores en muy poco tiempo, pues la integración de este elemento a una red no conlleva dificultad alguna y en cuestión de minutos la red puede ampliarse una considerable distancia.

A partir del análisis realizado a la pasarela se pueden limitar las aplicaciones de una red LoRa, debido a los resultados de tiempo de transmisión (latencia) y también a la tasa de datos establecida por esta tecnología, no puede ser aplicada en redes que presenten requerimientos altos de velocidad de transmisión de datos como por ejemplo la video vigilancia o la automatización industrial por sus requisitos de baja latencia, pero si puede ser utilizada en aplicaciones que conlleven un número reducido de mensajes y restricción de retardo relajadas como es la agricultura y smart city.

V. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha recopilado la información necesaria para comprender la tecnología LoRa/LORAWAN, y como ha logrado obtener características de largo alcance a muy bajos niveles

de consumo de potencia, además se ha presentado como está constituida una red de este tipo y las clases de dispositivos finales que pueden formar parte de la misma.

Se construyó una pasarela LoRa utilizando el módulo IC880A y una Raspberry Pi 3, la misma que presenta hasta 8 canales de transmisión en paralelo y hasta 10 trayectorias de demodulación.

Se llevó a cabo la comunicación entre el nodo final IU880B y la pasarela, este nodo permitió obtener datos de cobertura y por lo tanto generar gráficas de calor con los valores de potencia recibidos, y se logró transmitir dentro de un entorno urbano hasta una distancia aproximada de 800m; Claro está que se pueden alcanzar distancias mayores con LoRa pero en este caso con menos obstáculos es decir aumentando la altura de los dispositivos o en su defecto obteniendo línea de vista entre ellos, dado que el límite de sensibilidad de la pasarela es de -138 dBm y el valor mínimo alcanzado en las pruebas fue -109 dBm.

A partir de este proyecto se puede decir que entre las aplicaciones de LoRa no están las que presenten requisitos de baja latencia, ya que enviando un paquete de tan solo 29 bytes se obtuvo como mejor tiempo 66,8 ms, esto sin considerar la posible colisión de paquetes que se puede generar al contar ya con una gran cantidad de nodos.

Finalmente se concluye que la construcción y despliegue de una pasarela LoRa, no presentan un nivel alto de complejidad, y contando con la información necesaria se puede llegar a buenos resultados en pocos días, es este uno de los motivos por los que esta tecnología se ha convertido en una de las más adoptadas para IoT.

AGRADECIMIENTOS

A los creadores del repositorio *From zero to LoRaWAN in a weekend*, por presentar toda la información necesaria y de fácil comprensión para el desarrollo de este tipo de pasarelas.

No quiero dejar de lado mi agradecimiento a Dios y a mis padres, por haberme permitido continuar con mi preparación académica, así mismo a mis hermanos por haber sido el motor y alentarme para que siga superándome cada día más.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IMST GmbH, *Datasheet IC880A*. Germany, 2016.
- [2] Semtech, *What is LoRa*. 2017. Recuperado de: <http://www.semtech.com/wireless-rf/internet-of-things/what-is-lora/>
- [3] LoRa Alliance, *LoRaWAN, A technical overview of LoRa and LoRaWAN*. 2015.
- [4] Libelium. *Waspote IDE — User Guide for Waspote PRO*. 2017. Recuperado de: <http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspote-lorawan-networking-guide.pdf>

- [5] Sornin, N., Luis, M., Eirich, T., Kramp, T. and Hersent, O. *LoRaWAN? Specifications. LoRa? Alliance.* 2015
- [6] Pérez García, R. *Evaluación de LoRa/LoRaWAN para escenarios de smart city.* Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [7] Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. *A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. Sensors.* Basel, Switzerland, 2016, 16(9), 1466.
- [8] IMST GmbH, *Datasheet IU880B.* Germany, 2016.
- [9] Github, *TTN-ZH.* 2017. Recuperado de: <https://github.com/ttn-zh/ic880a-gateway/wiki>
- [10] LoRa Alliance, Semtech, *LPWA Technologies, Unlock new IoT Market Potential.* 2015.
- [11] InteliLIGHT, *LORA CASE STUDY.* Hungary, 2016.
- [12] Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., & Melia, J. *Understanding the limits of LoRaWAN.* Universitat Politècnica de Catalunya, 2017, *arXiv preprint arXiv:1607.08011.*