

Diseño e implementación de una red IoT LoRaWAN de bajo costo para medición remota de variables físicas

Sergio Felissia

*Grupo de Investigación y Desarrollo en
Electrónica (GIDE)*

*Departamento de Ingeniería
Electrónica-UTN Facultad Regional
San Francisco*

San Francisco, Córdoba, Argentina
sergiofelissia@gmail.com

Daniel Musso

*Grupo de Investigación y Desarrollo en
Electrónica (GIDE)*

*Departamento de Ingeniería
Electrónica-UTN Facultad Regional
San Francisco*

San Francisco, Córdoba, Argentina
dmusso@facultad.sanfrancisco.utn.edu.

ar

Gastón Peretti

*Grupo de Investigación y Desarrollo en
Electrónica (GIDE)*

*Departamento de Ingeniería
Electrónica-UTN Facultad Regional
San Francisco*

San Francisco, Córdoba, Argentina
gperetti@facultad.sanfrancisco.utn.edu.

ar

Diego Iguri

*Grupo de Investigación y Desarrollo en
Electrónica (GIDE)*

*Departamento de Ingeniería
Electrónica-UTN Facultad Regional
San Francisco*

San Francisco, Córdoba, Argentina
diguri@facultad.sanfrancisco.utn.edu.ar

Ignacio Galliano

*Grupo de Investigación y Desarrollo en
Electrónica (GIDE)*

*Departamento de Ingeniería
Electrónica-UTN Facultad Regional
San Francisco*

San Francisco, Córdoba, Argentina
nacho.galliano@hotmail.com

Jorge Bossio

*Grupo de Investigación y Desarrollo en
Electrónica (GIDE)*

*Departamento de Ingeniería
Electrónica-UTN Facultad Regional
San Francisco*

San Francisco, Córdoba, Argentina
jbossio@facultad.sanfrancisco.utn.edu.

ar

Alejo Alesandria

*Grupo de Investigación y Desarrollo en
Electrónica (GIDE)*

*Departamento de Ingeniería
Electrónica-UTN Facultad Regional
San Francisco*

San Francisco, Córdoba, Argentina
alealesandria@gmail.com

Resumen— El presente trabajo describe el despliegue de una plataforma IoT, basada en el protocolo LoRaWAN para la recolección de datos dentro de una zona geográfica limitada a un radio urbano no mayor a 15 km. Se ha utilizado para ello un único gateway LoRaWAN instalado en un punto céntrico de la región a cubrir. Por otro lado, se propuso desarrollar una plataforma propia que no requiera acceder a servicios en la nube. En este caso se implementó un servidor MQTT en una máquina virtual dedicada al sistema, creada dentro de los servidores de la institución. Se utilizaron herramientas de software GNU, como EMQX y Node-RED. Se presenta la descripción del sistema, configuración del gateway y desarrollo de la plataforma con recolección y almacenamiento de la información enviada por los nodos de medición. Se realizaron pruebas de conexión de los nodos bajo distintas condiciones. Particularmente, distancia al gateway, configuraciones alternativas de parámetros de transmisión de LoRa como potencia y factor de expansión. Se concluyó que el sistema es adecuado para desplegar nodos de medición y recolección de información, utilizando la plataforma. Adicionalmente, como uno de los objetivos del trabajo, el sistema implementado resulta muy importante para el análisis del comportamiento de los distintos componentes de la red, es una herramienta didáctica y es adecuado para brindar servicios a la comunidad. La consideración de bajo costo en el título se refiere a la utilización de un único gateway para cubrir el área urbana de una ciudad pequeña y por la no utilización de plataformas comerciales y software con licencias.

Palabras clave— plataforma IoT; MQTT; Red LoRaWAN; nodos IoT.

I. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) se encuentran muy desarrolladas en el mundo e Internet de las Cosas se nutre de estas herramientas de conectividad inalámbrica para llevar adelante los aspectos que tienen que ver con la capa física del modelo y que buscan obtener datos del mundo físico. LoRaWAN forma parte de este conjunto de recursos de hardware y software que resuelven las necesidades de comunicación de baja potencia,

TABLA I. BIT RATE, ALCANCE Y TIEMPO EN EL AIRE EN FUNCIÓN DE LOS FACTORES DE EXPANSIÓN EN LORA [2])

Spreading Factor (For UL at 125 kHz)	Bit Rate	Range	Time on Air (for 11 byte payload)
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

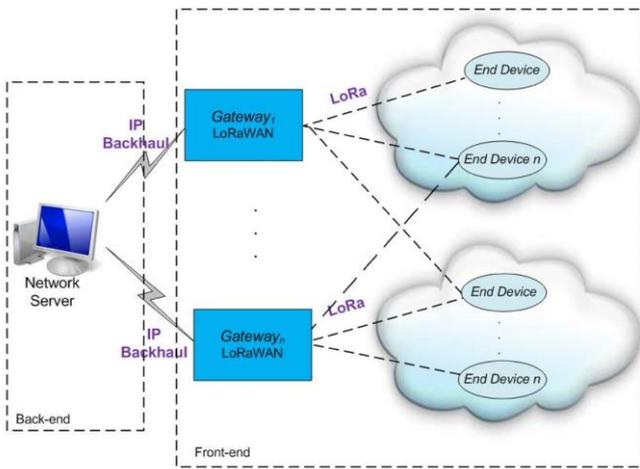


Fig. 1. Topología básica de LoRaWAN.[3]

bajos requerimientos de velocidad de transmisión y amplio alcance.

LoRa (capa física de LoRaWAN) utiliza una técnica de modulación de espectro ensanchado derivada de la tecnología *Chirp Spread Spectrum* (CSS), que ofrece un compromiso entre sensibilidad y velocidad de datos, mientras opera en un canal de ancho de banda fijo de 125 kHz o 500 kHz (para canales de enlace ascendente), y 500 kHz (para canales de enlace descendente). Además, utiliza factores de dispersión (SF) ortogonales. Esto permite que la red conserve la duración de la batería de los nodos finales conectados al realizar optimizaciones adaptativas de los niveles de potencia y las velocidades de datos de un nodo final individual. Por ejemplo, un dispositivo final (nodo) ubicado cerca de un *gateway* puede transmitir datos con un factor de dispersión bajo, ya que se tiene requerimientos mínimos para el enlace. Sin embargo, un dispositivo final ubicado a varios kilómetros del *gateway* necesitará transmitir con un factor de dispersión mucho más alto [1].

La modulación LoRa utilizada tiene un total de seis factores de dispersión (SF7 a SF12). Cuanto mayor sea el factor de dispersión utilizado, más lejos podrá viajar la señal y el receptor de RF aún la recibirá sin errores.

La TABLA I muestra cuatro factores de dispersión diferentes [SF7...SF10] que se pueden usar para mensajes de

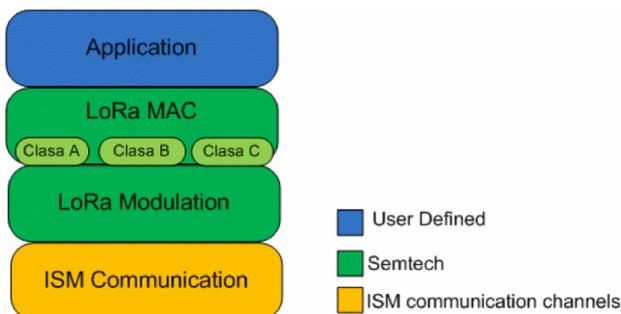


Fig. 2. Stack de LoRaWAN.

enlace ascendente (UL) en un canal de 125 kHz [2]. Muestra la tasa de bits equivalente, así como el rango estimado (esto depende del terreno). También muestra los valores de tiempo de permanencia, o tiempo en el aire (TOA), para un *payload* de 11 bytes para cada uno de los cuatro factores de dispersión.

Un *gateway* LoRaWAN recibe mensajes modulados en *LoRa* desde cualquier dispositivo final en la distancia de audición y reenvía estos mensajes de datos al *Network Server* (NS), que está conectado a través de una red troncal IP. No existe una asociación fija entre un dispositivo final y *gateway* específico. En cambio, el mismo sensor puede ser atendido por múltiples *gateways* en el área. Con LoRaWAN, cada paquete de enlace ascendente enviado por el dispositivo final será recibido por todas las puertas de enlace a su alcance, como se ilustra en la Fig. 1.

Esta disposición reduce significativamente la tasa de errores de paquetes (ya que las posibilidades de que al menos una puerta de enlace reciba el mensaje son muy altas), reduce significativamente la sobrecarga de la batería para sensores móviles y permite la geolocalización de bajo costo (suponiendo que las puertas de enlace en cuestión tengan capacidad de geolocalización) [3].

Por motivos de seguridad, calidad de servicio, facturación y otras necesidades, los dispositivos deben ponerse en marcha y activarse en la red al inicio de la operación. El proceso de puesta en marcha alinea de forma segura cada dispositivo y la red con respecto a los parámetros de aprovisionamiento esenciales (como identificadores, claves de cifrado y ubicaciones de servidores)

La especificación LoRaWAN permite dos tipos de activación: Activación en el aire (OTAA) y Activación por personalización (ABP) [4]. El stack del protocolo LoRaWAN [5] se muestra en la Fig. 2.

La comunicación LoRa opera en la banda de frecuencia sin licencia [6]:

- EUROPA 863-870MHz Banda ISM: 3 canales, frecuencias centrales: 868,10 MHz, 868,30 MHz, 868,50 MHz;
- Banda ISM de 433 MHz de la UE: 3 canales, frecuencias centrales: 433,175 MHz, 433,375 MHz, 433,575 MHz;
- Banda ISM de EE. UU. 902-928 MHz;
- Banda ISM de China 779-787MHz;
- China Banda de 470-510 MHz;
- Australia 915-928 MHz Banda ISM;
- Banda ISM 923-923.5MHz.

LoRa tiene varios tipos de dispositivos finales, según el mecanismo de comunicación empleado.

- Clase A: Los dispositivos de Clase A tienen capacidades de comunicación bidireccional. El intervalo de tiempo durante el cual el dispositivo está transmitiendo es seguido por dos intervalos de tiempo cortos durante los cuales el dispositivo puede recibir información. Los dispositivos incluidos en esta

categoría pueden recibir datos del servidor solo después de haber enviado la información. Así, los dispositivos de clase A garantizan la máxima eficiencia energética. Si se desea enviar datos desde el servidor, se esperará el siguiente enlace ascendente de la ranura programada.

- Clase B: los dispositivos de Clase B tienen capacidades de comunicación bidireccional y un intervalo de tiempo adicional que les permite recibir datos. Además de los intervalos de tiempo aleatorios durante los cuales se pueden recibir datos que permite el dispositivo de tipo A, el dispositivo de tipo B también puede utilizar una serie de intervalos de recepción activados por un mensaje tipo *Beacon* enviado por el *gateway*.
- Clase C: los dispositivos de clase C tienen capacidades de comunicación bidireccional e intervalos de tiempo durante los cuales pueden recibir información ilimitada. El único momento en que un dispositivo de clase C no puede recibir información es cuando la envía.

Según el estándar LoRa, cada módulo debe implementar el mecanismo de comunicación de clase A, mientras que las funciones específicas de las otras categorías son opcionales.

II. DESARROLLO

Se planteó como objetivo del trabajo, desarrollar una plataforma LPWAN, con todos sus componentes, para realizar análisis del comportamiento de los distintos elementos de la red, para su utilización en actividades didácticas y para brindar servicios a la comunidad, considerando como meta la reducción de costos por utilización de servicios externos.

Se implementó una red LoRaWAN experimental utilizando un único *gateway* ubicado en un lugar estratégico y a una altura suficiente para disponer de trayectoria de vista para la transmisión de los nodos en un radio de cobertura de 15 km aproximadamente. Los nodos conectados a la red

TABLA II. DISTINTOS TIPOS DE CONECTIVIDAD EN LOS MÓDULOS INSTALADOS EN EL GABINETE EXTERNO.

Enlace	Modalidad	Frecuencia	Licencia	Descripción
WiFi	Inalámbrica	2.4 GHz	No	Conexión router a <i>gateway</i> (back haul) y Raspberry Pi-400
4G LTE	Inalámbrica	800-900 MHz	Sí	Conexión a Internet de los equipos.
LoRa	Inalámbrica	915-928 MHz	No	Conexión de Nodos con sensores.
Ethernet	Cable	-	No	Conexión Raspberry Pi-400 a <i>gateway</i> para administración

utilizan la activación en el aire OTAA. Se dispuso de un *gateway* marca Milesight, modelo UG65, para interiores de 8 canales. Este dispositivo adopta el chip SX1302 LoRa de Semtech con una CPU de cuatro núcleos de alto rendimiento, admite la conexión con más de 2000 nodos. El modelo UG65, que disponemos, admite dos sistemas de conectividad *back-haul* con Ethernet y WiFi. Tiene un *Network Server* (NS) incorporado, así como también puede ser integrado a NS en plataformas en la nube (como *The Things Network*, *ChirpStack*, *Milesight IoT Cloud* y otras).

Dado que el *gateway* no admite su uso en exteriores, se dispuso dentro de un gabinete estanco IP68, junto a los elementos necesarios para la conectividad *back-haul* y para la administración remota. Para esta última funcionalidad se dispuso de una placa Raspberry Pi 400, que se conecta al *gateway* a través conexión por cable Ethernet. Tanto el *gateway* como la CPU Raspberry Pi 400 se conectan a Internet a través de un enlace interno WiFi dentro del gabinete, a través de un *router* y *modem* 4G el cuál accede a

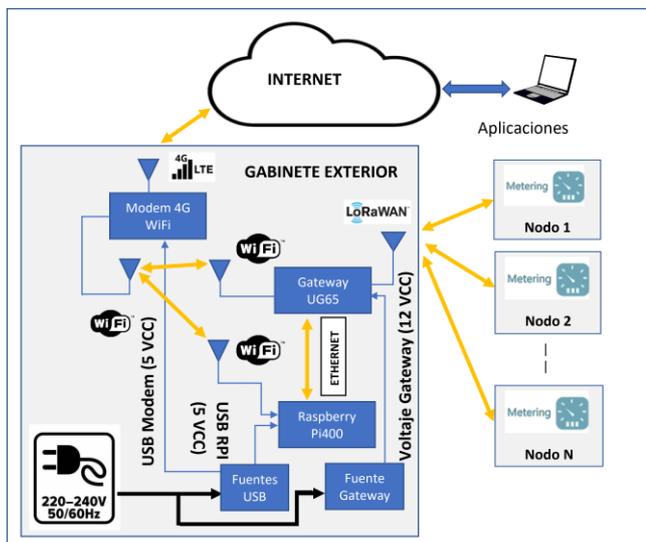


Fig. 3. Diagrama en bloques del sistema.



Fig. 4. Vista del gabinete exterior con la antena, colocado en lo alto de un edificio.

la red celular desde un servicio contratado a una de las empresas telefónicas (TABLA II). En la Fig. 3, se puede observar un diagrama en bloques del sistema implementado y en la Fig. 4, una imagen del gabinete exterior con todos sus componentes.

La administración del *gateway* se realiza ingresando de forma remota al escritorio de la CPU Raspberry Pi, utilizando la aplicación VNC Viewer.

A. Configuración del gateway

Se configuró el *gateway* para utilizar el *Network Server* integrado. Se seleccionó el protocolo MQTT como el modo de transmisión de *backhaul* hacia la nube de la información recibida desde los nodos. Los datos son enviados en un formato de texto tipo JSON [7]. La clave "data" contiene el dato enviado por el nodo identificado a través de las claves "devEUI" y "deviceName". El dato es codificado por el *gateway* en Base64. Además del dato enviado por el nodo, el *gateway* envía otra información relacionada con parámetros de recepción de la radio LoRa, como nivel de señal (RSSI), relación señal ruido (LoRaSNR), frecuencia (frequency) y factor de expansión (spreadFactor). En la Fig. 5 se observa el payload enviado por el *gateway* en un único tópic creado en la configuración del modo de transmisión MQTT.

B. Plataforma IoT implementada

Se dispuso de una máquina virtual instalada en la nube a través de los servidores de la Institución, donde fue instalado un servidor de protocolo MQTT. El protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) es un protocolo *PubSub* de *Message Service* que actúa sobre TCP. Destaca por ser ligero, sencillo de implementar. Está optimizado para el *routing* activo de un gran número de clientes conectados de forma simultánea. MQTT es un servicio de mensajería con patrón publicador/suscriptor (pub-sub). En este tipo de infraestructuras los clientes se conectan con un servidor central denominado *broker*.

Los paquetes de software instalados en la máquina virtual son: EMQX (Servidor de MQTT), Node-RED (Entorno de programación basado en el *framework* de Node.JS) para realizar aplicaciones ejecutables en navegador [8], XAMPP: paquete del servidor web Apache que incluye servidor de base de datos SQL (MariaDB) y phpMyAdmin [9]. Un esquema de los componentes de software instalados en la máquina virtual se puede observar en la Fig. 6.

Se configura Node-RED para que se ejecute como servicio, en segundo plano, de modo que permanentemente realice las tareas de conexión al servidor MQTT, obtenga el paquete de datos enviado por el dispositivo, separe los valores de las variables leídas, guarde en una base de datos esos valores. Para esta última función se creó una base de datos en MARIADB (MySQL) a través del entorno phpmyadmin.

Se creó un flujo en Node-RED (Fig. 7) para recibir el *payload* desde el *gateway*, extraer los distintos campos del objeto JSON e insertar datos en la base de datos creada.

TABLA III. EJEMPLO DE PAYLOAD ENVIADO POR LOS NODOS.

01 75 64 03 67 10 01 04 68 71		
Canal	Tipo	Valor
01	75 (Battery)	64 =>100%
03	67 (Temperatura)	10 01=>01 10=272 Temp=272*0.1=27.2°C
04	68 (Humedad)	71=>113 Hum=113*0.5=56.5%

C. Nodos LoRaWAN

Se realizaron pruebas de la plataforma utilizando dos nodos LoRaWAN comerciales, marca Milesight, modelo EM300-TH, que realizan la medición de temperatura y humedad. Por otro lado, se implementó un nodo propio con una placa LoRa32u4 II. En la fig. 8 se pueden observar, ambos tipos de nodos. Esta es una placa de bajo consumo basada en el Atmega32u4 con módulo LoRa 868 MHz/915 MHz. La radio LoRa está basada en el módulo SX1276 de Semtech. Se instaló en la misma el *stack* del protocolo LoRaWAN LMIC. Esta es una implementación portátil de la especificación de dispositivo final LoRaWAN 1.0.3 en el lenguaje de programación C, para la capa de control de acceso al medio (MAC). ("LMIC" significa "*LoRaWAN MAC in C*") [10]. Admite varias variantes de la especificación, como US-915 y AU-915, siendo esta última

```
{
  "applicationID":"1",
  "applicationName":"gateway1",
  "data":"A2fjAARoZQ==",
  "devEUI":"24e124136b323709",
  "deviceName":"SENSOR1",
  "fCnt":519,
  "fPort":85,
  "rxInfo":{"
    "altitude":0,
    "latitude":0,
    "loRaSNR":13.5,
    "longitude":0,
    "mac":"24e124ffef0dc81",
    "name":"local_gateway",
    "rssi":-33,
    "time":"2023-04-17T11:28:55.998278Z"
  }},
  "time":"2023-04-17T11:28:55.998278Z",
  "txInfo":{"
    "adr":false,
    "codeRate":"4/5",
    "dataRate":{"
      "bandwidth":125,
      "modulation":"LORA",
      "spreadFactor":10
    },
    "frequency":917400000
  }
}
```

Fig. 5. Datos enviados por el *gateway* al servidor MQTT en formato JSON.

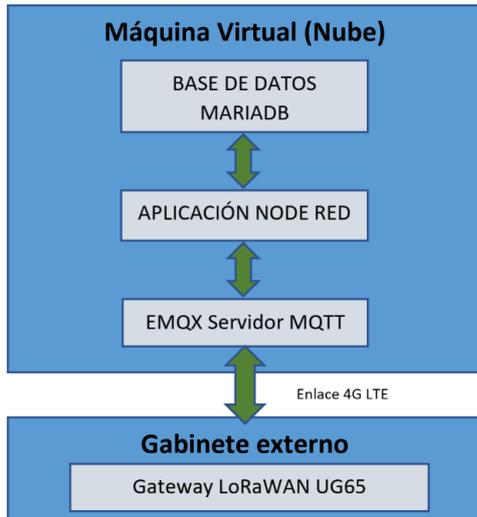


Fig. 6. Esquema de los componentes de software.

la adoptada por la normativa en nuestro país. Puede manejar dispositivos de clase A y clase B, que se adaptan particularmente para uso en nodos sensores alimentados energéticamente con baterías. La biblioteca se ocupa de todos los estados MAC lógicos y las restricciones de tiempo y controla la radio SEMTECH SX1272 o SX1276. De esta manera, las aplicaciones son libres de realizar otras tareas y la librería garantiza el cumplimiento del protocolo.

Los nodos implementados en el laboratorio basados en la placa LoRa32u4 II incluyen un módulo sensor de temperatura y humedad DHT11, donde los datos leídos son procesados de la misma forma que lo hacen los sensores comerciales EM300-TH. Los campos de la trama se conforman con 1 byte para el canal, 2 bytes para el tipo de sensor (temperatura, presión, ...) y N bytes para el valor de la variable en formato

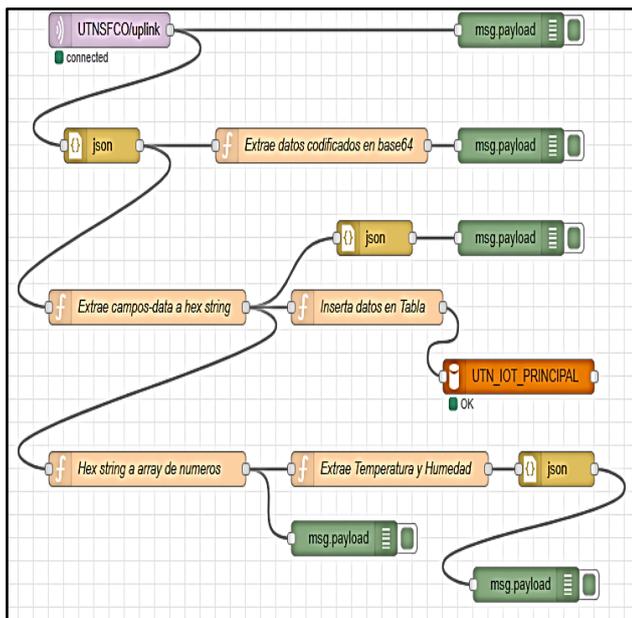


Fig. 7. Flujos Node-RED para recibir el payload MQTT desde el gateway, separar e insertar datos en la tabla de la base de datos UTN_IOT_PRINCIPAL.



Fig. 8. Nodos LoRaWAN. A la izquierda, nodo comercial EM300-TH, a la derecha nodo implementado en laboratorio basado en una placa LoRa32u4 II.

entero *little endian*. No obstante, los bytes que corresponden a los tres campos se convierten en una cadena de caracteres hexadecimales para generar el *payload* enviado desde el nodo. Un ejemplo de un *payload* transmitido desde uno de los nodos es el que se muestra en la TABLA III. La estructura general del *payload* de datos es la que se muestra en la TABLA IV.

TABLA IV. FORMATO DEL PAYLOAD DE DATOS ENVIADO POR LOS NODOS.

Channel 1	Type 1	Data 1	Channel 2	Type 2	Data 2	Channel 3	...
1 Byte	1 Byte	N Bytes	1 Byte	1 Byte	M Bytes	1 Byte	...

III. RESULTADOS

Con el sistema implementado se aprovechó en una etapa inicial para realizar un relevamiento del área de cobertura del gateway tomando lectura de los datos de recepción de las emisiones de los nodos en el gateway, relación señal/ruido (SNR) y nivel de señal en la entrada. Estos datos se leyeron de los registros en la base de datos, donde se almacenan los paquetes enviados por los nodos. La metodología implementada para la obtención de datos a campo fue la de recorrer el área, deteniéndose en posiciones específicas, permanecer al menos un minuto en el punto, registrando en una planilla (ver TABLA V) los datos de identificación del dispositivo, devEUI y deviceName, fecha, hora y

TABLA V. MEDICIONES DE NIVEL DE SEÑAL RECIBIDA Y RELACIÓN SEÑAL/RUIDO EN EL GATEWAY PARA DISTINTAS DISTANCIAS

Dispositivo	Distancia	SNR[dB]	RSSI[dBm]
EM300-TH	1 km	4.0	-104
	3 km	2.2	-106
	8 km	-7.2	-113
	14 km	-14.5	-116
LoRa32U4	1 km	12.0	-83
	3 km	7.0	-100
	8 km	-1.8	-110
	14 km	-9.5	-112

geolocalización, para luego verificar en los registros de la base de datos.

IV. CONCLUSIONES

Se han realizado las pruebas con 4 nodos, 2 comerciales y 2 implementados en las placas con radio LoRa embebida y *stack* LMIC. Los nodos EM300 disponen de una antena integrada en la placa de circuito impreso y el nodo LoRa32u4 II dispone de una antena externa. Los resultados han mostrado que el *gateway* recibe datos de los nodos hasta con niveles de recepción de hasta -120 dBm. Este nivel de recepción ocurre cuando los nodos se encuentran a aproximadamente a 16 km, con vista despejada de la antena. Otra conclusión que se puede realizar es que la señal es fuertemente afectada por los obstáculos, principalmente árboles, paredes de hormigón, techos de chapas metálicas. Esto resulta un problema en un escenario de un único *gateway*. Por lo cual, resultaría ventajoso la multiplicidad de *gateways* ya que, se ha demostrado a través de otros trabajos la robustez de la modulación LoRa, en entornos urbanos obstaculizados con múltiples trayectorias de las ondas.

Los objetivos planteados al inicio de este trabajo, que prioritariamente eran los de construir una plataforma IoT basada en LoRaWAN, que nos permitiera, sentar las bases para otros trabajos futuros, analizando el desempeño de la red en muchos escenarios distintos, fue cumplido. Se pudo implementar una plataforma propia en la nube, de bajo costo, sin necesidad de recurrir a servicios de terceros. A partir de disponer de esta herramienta son múltiples las propuestas de análisis de los comportamientos de los componentes de hardware y software de la red LoRaWAN que se pueden realizar y que serán motivación para futuros trabajos. Aspectos como respuesta del sistema ante multiplicidad de nodos, pérdidas de paquetes, tiempo en el aire y consumo de energía de los nodos, funcionamiento en las distintas clases de dispositivos LoRaWAN, interferencias, colisiones, son alguno de los temas a considerar para posteriores investigaciones.

REFERENCIAS

- [1] N.C. Almeida, R.P. Rolle, E.P. Godoy, P. Ferrari and E. Sisinni, "Proposal of a Hybrid LoRa Mesh / LoRaWAN Network," 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, Roma, Italy, 2020, pp. 702-707, doi:10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138206.
- [2] Semtech, "LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview". Disponible en: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>
- [3] A. Lavric, V. Popa, "Internet of Things and LoRa Low-Power Wide Area Networks Challenges", 2017. ECAI 2017 - International Conference - 9th Edition Electronics, Computers and Artificial Intelligence 29 June -01 July, 2017, Targoviste, Rumania. pp. 1-4, doi: 10.1109/ECAI.2017.8166405.
- [4] LoRa Technology, [online] Available: <https://www.LoRa-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>.
- [5] A. Lavric and V. Popa, "Internet of Things and LoRa™ Low-Power Wide-Area Networks: A survey," 2017 *International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, Iasi, Romania, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISSCS.2017.8034915.
- [6] LoRaWAN™ Regional Parameters LoRa Alliance, [online] Available: <https://www.LoRa-alliance.org/>.
- [7] JSON.ORG, Página web: "Introducing JSON". Disponible en: <https://www.json.org/json-en.html>
- [8] Node-RED, Página web: "Node-RED Cookbook". Disponible en: <https://cookbook.nodered.org/#mqtt>
- [9] S.F. Felissia, J.A. Bossio, G.C. Peretti, R. Podadera, S. Previtto, "Desarrollo e implementación de una red de medición de parámetros ambientales en recintos de una organización aplicando tecnologías IoT". Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica (GIDE), Departamento de Ingeniería Electrónica, Facultad Regional San Francisco, Universidad Tecnológica Nacional. IDETEC 2022. Villa María. Córdoba. <http://idetec.frvm.utn.edu.ar/api/pub/i/tf/10/27>.
- [10] MCCI Catena, "Arduino LoRaWAN MAC in C (LMIC)", Página web: "MCCI Arduino LoRaWAN Library. Disponible en: <https://github.com/mcci-catena/arduino-lmic/blob/master/doc/LMIC-v4.1.0.pdf>