

ARTICLE HISTORY

Received 01 October 2020
Accepted 16 October 2020

Adrián E. Heredia
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cuenca
Cuenca, Ecuador
emilio.heredia@ucuenca.edu.ec

Paúl F. Lucero
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cuenca
Cuenca, Ecuador
paul.lucero@ucuenca.edu.ec

Fabián Astudillo Salinas
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cuenca
Cuenca, Ecuador
fabian.astudillos@ucuenca.edu.ec

Andrés Vázquez Rodas
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cuenca
Cuenca, Ecuador
andres.vazquez@ucuenca.edu.ec

Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial

*Design and implementation
of a wireless sensor network
with LoRa technology for
industrial monitoring*

Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial

Design and implementation of wireless sensor network with LoRa technology for industrial monitoring

Adrián E. Heredia

Facultad de Ingeniería
Universidad de Cuenca
Cuenca, Ecuador
emilio.heredia@ucuenca.edu.ec

Paúl F. Lucero

Facultad de Ingeniería
Universidad de Cuenca
Cuenca, Ecuador
paul.lucero@ucuenca.edu.ec

Fabián Astudillo Salinas

Facultad de Ingeniería
Universidad de Cuenca
Cuenca, Ecuador
fabian.astudillos@ucuenca.edu.ec

Andrés Vázquez Rodas

Facultad de Ingeniería
Universidad de Cuenca
Cuenca, Ecuador
andres.vazquez@ucuenca.edu.ec

Abstract — The growing development of the Internet of Things (IoT) has diversified its fields of application, improving not only the interconnection of people but as well the communication between industrial machinery (M2M, Machine-to-Machine), in which its features in range, scalability, and low cost of deployment can be taken advantage of. LoRa and LoRaWAN technologies are presented as one of the main low-cost wireless communication options in the integration of industrial systems with a view to the new requirements of Industry 4.0. In this work, a measurement campaign and the analysis of the data obtained were performed to evaluate the behavior and applicability of LoRa and LoRaWAN technologies within industrial environments. To contrast the results, tests were performed in clear urban environments, where it was observed that the conditions inside the industrial buildings allow the establishment of a link with favorable radio frequency conditions. Initially, short-range scenarios (<100 m) have been considered in which a line of sight is maintained between the transmitter and the receiver.

Keywords — LoRa, LoRaWAN, IoT, Industry 4.0

Resumen — El creciente desarrollo del Internet de las Cosas (IoT, Internet of Things) ha diversificado sus campos de aplicación, mejorando no solo la interconexión de personas, sino también, la comunicación entre maquinaria industrial (M2M, Machine-to-Machine), en las que sus características en alcance, escalabilidad y bajo costo de despliegue, pueden ser aprovechadas. Las tecnologías LoRa y LoRaWAN se muestran como una de las principales opciones de comunicación inalámbrica de bajo costo en la integración de sistemas industriales con mira a los nuevos requerimientos de la Industria 4.0. En este trabajo se realizó una campaña de mediciones y el análisis de los datos obtenidos, para evaluar el comportamiento y la aplicabilidad de las tecnologías LoRa y LoRaWAN dentro de ambientes industriales. Para contrastar los resultados, se realizaron pruebas en ambientes urbanos despejados, donde se observó que las condiciones dentro de las naves industriales, permiten establecer un enlace con condiciones de radio frecuencia favorables. Inicialmente se han considerado escenarios de corto alcance (<100 m) en los que se mantiene una línea de vista entre el transmisor y el receptor.

Palabras clave — LoRa, LoRaWAN, IoT, Industria 4.0.

I. INTRODUCCIÓN

En el mercado industrial competitivo, las empresas enfrentan la creciente necesidad de mejorar la eficiencia de sus procesos, ajustarse a regulaciones ambientales y alcanzar metas financieras. Debido a la edad avanzada de muchos de los sistemas industriales y la manufactura dinámica que obliga el mercado, los sistemas de automatización industrial de bajo costo, son una alternativa para optimizar la productividad y eficiencia. Una opción posible es el proponer integraciones al hardware existente (PLCs (Programmable Logic Controller) y Panel HMI (Human-Machine Interface)), sin la necesidad de actualizar equipos o detener el proceso de producción [1],[2]. Tradicionalmente, los sistemas de automatización industrial se realizan por medio de comunicaciones cableadas (Ethernet industrial, RS-232, RS-485). Sin embargo, estos requieren de costosos, invasivos y complejos tendidos, o incluso se requiere adaptar sistemas cuando el hardware es anticuado.

La naturaleza colaborativa y espontánea de las redes inalámbricas de sensores (WSN, Wireless Sensor Network), brinda grandes ventajas sobre los sistemas tradicionales de monitoreo y control cableados, incluyendo auto organización, despliegue rápido, flexibilidad y costo reducido. En este aspecto, las WSN tienen un rol importante para crear sistemas confiables y resistentes que respondan rápidamente a eventos en tiempo real.

En este contexto, los avances actuales en las redes de bajo consumo y largo alcance (LPWAN, Low Power Wide Area Network), y la implementación de sistemas embebidos de automatización y recolección de datos, se han vuelto más factibles para la interconexión de las "islas" de monitoreo industrial [3]. Para aplicaciones industriales existen varias alternativas. En algunas especificaciones como Zigbee y WirelessHART, se usa el estándar IEEE 802.15.4 [4], [5]. En la tecnología LoRa, por su parte, se utiliza mayormente la especificación LoRaWAN, aunque es posible usar también el estándar 802.15.4. La tecnología LoRa fue desarrollada por The LoRa Alliance [6], y ha tenido una mayor aceptación en el mercado en los últimos años por sus características superiores en parámetros como alcance, robustez y bajo consumo de energía [7]. Así, se espera que la tecnología LoRa también se adapte satisfactoriamente a los requerimientos de aplicaciones enfocadas en la Industria 4.0 [8].

Con las LPWAN se abre una perspectiva industrial diferente, gracias al lanzamiento continuo de nuevos equipos. Entre estos se destacan los desarrollados por el fabricante

de semiconductores SEMTECH con su línea de productos de largo alcance "Long-Range" (LoRa) [9]. LoRa hace uso de tecnologías avanzadas de espectro ensanchado [10], utilizando pulsos modulados de frecuencias lineales de banda ancha para lograr mejores características de frecuencia [11], [12].

LoRaWAN, por su parte, define el protocolo de comunicación (capa de enlace de datos del modelo OSI) y la arquitectura del sistema, sobre la capa física definida por LoRa [13]. LoRaWAN utiliza una topología en estrella de largo alcance en la que los gateways son usados para conmutar los mensajes entre los dispositivos finales (nodos) y el núcleo de la red [14]. En una red LoRaWAN los nodos pueden transmitir los datos a múltiples gateways y no necesariamente a uno solo. A su vez, cada gateway direccionará los paquetes recibidos desde el nodo final al servidor de red, que puede ser local o que puede estar ubicado en la "nube". Esto se realiza a través de algún tipo de backhaul, tradicionalmente mediante: GSM, LTE, Ethernet, satélite, o WiFi [15], [16].

Hoy la industria muestra especial interés en la conexión de la parte física (equipos de piso) y la infraestructura digital, con el fin de optimizar la producción y proporcionar interoperabilidad a las diferentes entidades involucradas, satisfaciendo directrices de la Industria 4.0 [17], [18]. Por lo que en este trabajo se propone la evaluación de una red LoRaWAN y su aplicabilidad en entornos industriales. Se realizaron campañas de mediciones, además de pruebas controladas en ambientes libres de obstáculos y fuentes de interferencia. Los datos recopilados muestran que los parámetros de calidad: RSSI (Received Signal Strength Indication), SNR (Signal-to-Noise Ratio) y tasa de pérdida de paquetes, presentan poca degradación causada por los equipos y maquinarias dentro de los ambientes industriales, obteniendo niveles más favorables que en ambientes urbanos despejados. La adquisición de datos se realizó por un proceso de muestreo por cada punto de medición.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera. La Sección II analiza los trabajos relacionados. En la Sección III se hace una revisión general de los aspectos más relevantes de la capa física LoRa y el protocolo LoRaWAN. Por su parte, en la Sección IV se presenta la metodología propuesta para la evaluación. La Sección V muestra los resultados obtenidos y finalmente en la Sección VI se presentan las principales conclusiones de este trabajo.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

En los últimos años, varios trabajos se han centrado en las tecnologías utilizadas para despliegues de IoT, destacando recientemente LoRa y LoRaWAN. De estas últimas, en varios trabajos, se ha analizado su aplicabilidad y desempeño en ambientes con factores adversos para las transmisiones de radio (interferencia, ruido, reflexión).

Una de las principales deficiencias de las tecnologías de IoT, es proveer datos en tiempo real. En [8] se describen estrategias para optimizar la capa de acceso (MAC), tanto para transmisiones periódicas en tiempo real y transmisiones ocasionales no periódicas. Para esto, se busca sincronizar la transmisión de los nodos finales con el fin de evitar colisiones. Estas optimizaciones permiten seguir explotando las ventajas de las WSN, como la alta escalabilidad y reducida infraestructura, necesaria para su despliegue.

Por su parte, en [6] se evalúa la capacidad de la tecnología LoRa para comunicaciones de largo alcance, siendo posible lograr máximos de hasta 10 kilómetro con condiciones de línea de vista.

El trabajo de [19] muestra cómo las capacidades de largo alcance de LoRa pueden ser aprovechadas en aplicaciones industriales de corto alcance, en las que el principal atenuante es la interferencia producida por los equipos de alta potencia. El desempeño de la tecnología LoRa no es equivalente al de sistemas cableados, pero con una tasa de error de paquetes cercana al 0.2 %, esta se muestra como una solución para sistemas industriales no críticos.

El despliegue de una red LoRaWAN dentro de las instalaciones de un barco militar se expone en [20]. En este caso, las condiciones son adversas debido a la estructura de metal que provoca reflexiones de las señales de

radio, además de la ausencia de línea de vista para la transmisión de los nodos sensores. La red logró un desempeño aceptable utilizando un factor de ensanchamiento (SF, Spreading Factor), con valor de 12. Se alcanza una tasa de pérdida de paquetes (PER, packet error ratio) inferior al 5 % en una longitud de 110 m entre compartimientos de la nave. En este estudio, LoRaWAN se presenta como una alternativa al despliegue de cable de cobre o fibra óptica, que en el caso de navíos implica gran complejidad y elevados costos.

LoRaWAN permite que la red sea escalable y facilita la movilidad de los nodos sensores. En [21] se analiza el desempeño de una WSN en el interior de una mina. Se considera que este ambiente sufre cambios constantes en su estructura, además de variaciones en niveles de gases, humedad y temperatura. Por tanto, se requiere un monitoreo continuo, tanto de la maquinaria como de las condiciones ambientales a las que se expone el personal. En dicho trabajo se reduce el retardo y la latencia en la transmisión de paquetes. Se mejora así el desempeño de la red en caso de transmisiones de emergencia, que requieren el menor número de retransmisiones en el caso de pérdida o errores en los paquetes.

Las capacidades de la tecnología LoRa para comunicaciones de largo alcance se ha analizado profundamente en múltiples trabajos, logrando distancias superiores a los 10 km con línea de vista. Para esto, las redes basan su arquitectura en una topología en estrella empleando el protocolo LoRaWAN. Por otro lado, [22] analiza que este tipo de estructura de red es dependiente de la línea de vista entre dispositivos, sin embargo, esto no siempre es posible. Específicamente, el trabajo se enfoca en la detonación de explosivos dentro de minas empleando tecnología LoRa para la transmisión en una red multi-salto, capaz de superar obstáculos en ambientes irregulares.

III. TECNOLOGÍAS LORA Y LORAWAN

A. LoRa

LoRa es un tipo de modulación de capa física de espectro ensanchado CSS (Chirp Spread Spectrum) [23]. Esta modulación consiste en el uso de una señal chirp que varía constantemente con la frecuencia. Esto permite de cierta forma que aumente su capacidad de

resistencia a señales interferentes y además reduce el desvanecimiento de la señal debido a la propagación multi-camino [24]. Esto a su vez implica que, los nodos que se encuentren más cercanos al Gateway tendrán una tasa de datos mayor que la de los nodos más alejados [23]. Además, al ser un estándar LPWAN es posible reducir la tasa efectiva de transmisión de datos

cuando existan rangos de comunicación más amplios que requieren un enlace más robusto [24].

El bajo consumo energético y su gran alcance, hacen que LoRa sea uno de los estándares más utilizados en el desarrollo de aplicaciones IoT industriales (IIoT). Lo cual permite que los dispositivos usados en este tipo de desarrollos industriales aumenten su tiempo de vida. Sin embargo, en algunos casos LoRa presenta ciertos inconvenientes en cuanto a la latencia. En la actualidad, existen otros protocolos que podrían proporcionar una latencia más baja y una velocidad de datos más alta, por ejemplo NB-IoT (Narrow Band IoT) [25].

Por otra parte, una de las mayores ventajas de LoRa radica en el uso de una amplia gama de frecuencias que no requieren licencia, ya que pertenecen al espectro ISM (Industrial, Scientific and Medical). Esto facilita la interoperabilidad en todo el mundo [23].

B. LoRaWAN

La especificación LoRaWAN es un protocolo de red de bajo consumo y largo alcance, LPWAN [26]. Su funcionamiento se basa en dispositivos de bajo consumo energético usados generalmente en el desarrollo de aplicaciones relacionadas al IoT y al IIoT.

Una red LoRaWAN cuenta con una topología conocida como Estrella de Estrellas (Star of Stars), compuesta por cuatro elementos principales: dispositivos finales, Gateway, un servidor de red y un servidor de aplicación. Los dispositivos finales generalmente se encuentran conformados por sensores o actuadores, los

cuales comparten con el gateway la información adquirida, haciendo uso de la capa física LoRa. Por su parte, el gateway se encarga de recibir dicha información y compartirla con el servidor de red mediante una comunicación basada en el protocolo IP [27].

El protocolo LoRaWAN cuenta con características que permiten recopilar datos en un solo Gateway desde varios nodos ubicados a diferentes distancias, incluso kilómetros, mediante una comunicación unidireccional [15]. Sin embargo, en algunos casos se ha optado por la comunicación bidireccional entre nodo y gateway, y existe también la posibilidad de tener más de un gateway.

La función de los gateways radica en el envío de la información recolectada de cada dispositivo final, sin procesar, a un servidor de red mediante un interfaz de backhaul de mayor rendimiento como Ethernet, 3G/4G, satélite o Wi-Fi [28].

Por su parte, el servidor de red recibe la información enviada en forma de paquetes desde los nodos, los decodifica y realiza su protocolo de seguridad. De esta manera, cada una de las aplicaciones que se ejecutan en los servidores de aplicaciones, pueden recibir los datos desde el servidor de red, y pueden usar dicha información a su conveniencia [29].

En la Figura 1 se puede observar cada uno de los componentes de la arquitectura descrita. Esta arquitectura LoRaWAN basada en la topología estrella de estrellas permite garantizar una comunicación eficaz entre todos los dispositivos, además de generar un bajo consumo energético en los dispositivos finales.

IV. MÉTODO

Para el despliegue de la red LoRaWAN diseñada en este trabajo, se utilizaron sistemas de código abierto y equipos de bajo costo, adecuados para las condiciones de los escenarios

estudiados. Las campañas de medición se realizaron en dos escenarios industriales y dos entornos controlados, con el fin de contrastar resultados. Los escenarios industriales cuentan

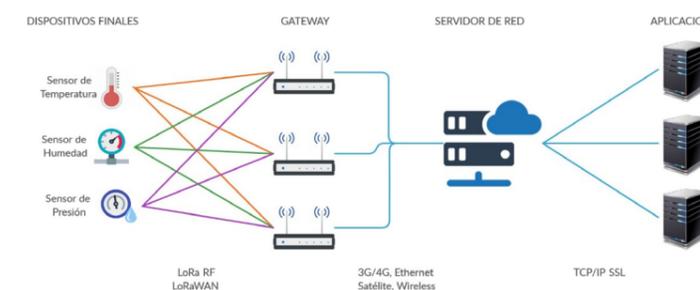


Fig. 1 Arquitectura LoraWAN [30]

con diferentes maquinarias y acometidas ubicadas dentro de naves metálicas, mientras que los escenarios controlados son áreas verdes libres de obstáculos, ubicadas en sectores urbanos.

A. Equipos

1) Heltec WiFi LoRa 32: El equipo Heltec WiFi LoRa 32 es un dispositivo orientado a IoT, diseñado y producido por Heltec Automation. La tarjeta de desarrollo basa su funcionamiento en el microcontrolador ESP32 y se vale del chip integrado SX1278 para las funciones de comunicación LoRa. Estos dos dispositivos interactúan por medio de una interfaz SPI (Serial Peripheral Interface) [31].

A pesar de ser diseñado para operar como nodo sensor, el dispositivo de Heltec puede configurarse también como un gateway LoRaWAN, comunicándose al servidor por medio del protocolo TCP/IP. Esto limita su funcionamiento, impidiéndole realizar transmisiones en el enlace descendente hacia los nodos sensores.

B. Raspberry Pi 3 modelo B

Raspberry Pi 3 es una computadora de dimensiones reducidas, originalmente diseñada con fines educativos por la fundación Raspberry Pi. Puede soportar una variedad de sistemas operativos con un procesador de arquitectura ARM. El ordenador cuenta con periféricos que incluyen pines GPIO (General Purpose Input/Output), permitiendo la comunicación y control de dispositivos externos [32].

En este trabajo se utilizó la Raspberry Pi 3 modelo B, como administrador de la red LoRaWAN y servidor web, para la conexión con aplicaciones e interfaces gráficas.

C. Disposición de Equipos

En la Figura 2 se muestra la disposición de los equipos en la red LoRaWAN. El nodo sensor está compuesto por un microcontrolador encargado de recopilar mediciones del ambiente, y comunicarlo por un puerto serial hacia el módulo Heltec WiFi LoRa 32 para su transmisión mediante la tecnología LoRa. En el gateway (receptor), se utiliza, al igual que en transmisor, el módulo SX1278 en la tarjeta de Heltec. Los datos recibidos por éste, se transmiten hacia el servidor por medio del módulo WiFi. El servidor está montado sobre la Raspberry Pi, que cumple tanto con las funciones de administrador de la red LoRaWAN

como la función de servidor web para el interfaz de usuario.

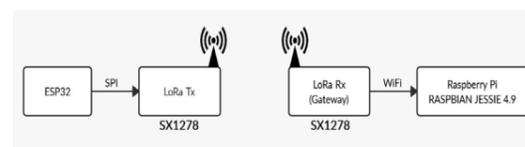


Fig. 2 Diagrama de bloques de los equipos

D. Configuración de Equipos

La configuración de los equipos utilizados en este trabajo se basa en las directrices de The LoRa Alliance [13] para la topología de una red LoRaWAN. En la capa física, se utiliza una frecuencia de 433 MHz, empleando el chip SX1278 de SEMTECH, tanto para el transmisor como para el receptor. El servidor de red se montó sobre un ordenador Raspberry Pi para la administración de la red.

- **Nodo sensor:** Los datos a transmitirse desde el nodo sensor son recompilados por medio de una tarjeta Arduino NANO conectada como periférico por medio de un puerto serial al módulo Heltec WiFi LoRa 32. La información de sensores y periféricos es cifrada usando el método Cayenne LPP [33]. Esto con el fin de reducir el tamaño de los mensajes (payload) y enviar varias mediciones por mensaje. El microprocesador ESP32 de la tarjeta Heltec maneja el chip SX1278 y los parámetros de transmisión así como las credenciales de seguridad.
- **Gateway:** El chip SX1278 de la tarjeta Heltec WiFi LoRa 32, se encarga de recibir las transmisiones LoRa. Estas son procesadas por el microcontrolador ESP32, que las empaqueta y transmite por la red IP utilizando su módulo WiFi integrado. La programación se basó en el trabajo de [34] para un gateway de canal sencillo.
- **Servidor:** El servidor LoRaWAN se monta sobre un ordenador Raspberry Pi 3 modelo B. También se configuró un servidor MQTT para la comunicación con aplicaciones externas y un servidor web para el interfaz de usuario. El servidor y el gateway se comunican por una red WiFi. Los datos procesados por el servidor son almacenados en una base de datos en formato .csv.

E. Escenarios

El aporte de este trabajo se centra en evaluar el comportamiento y la aplicabilidad de la tecnología LoRa en ambientes industriales por lo que se eligieron dos instalaciones con diferente maquinaria y procesos de producción. Las mediciones se desarrollaron manteniendo una línea de vista entre el nodo sensor y el gateway. Adicionalmente, se realizaron pruebas controladas en dos ambientes libres de obstáculos y fuentes de interferencia.

a) **Ambiente industrial 1:** La nave principal del ambiente industrial 1 cuenta con una altura aproximada de 20 m, una longitud superior a los 150 m y se compone de dos niveles. En la planta baja se ubican, en su mayoría, motores de alta potencia (50-120HP). Además, esta superficie funciona como área de almacenaje y preparación de producto terminado. En la planta alta se tienen dos líneas de producción extendidas a lo largo de la nave. Ambas plantas se encuentran divididas por un pasillo central que comunica los ambientes y permite el acceso a la maquinaria.

Para el primer grupo de pruebas en la planta alta, el gateway fue colocado en el extremo sur del pasillo, mostrado en la Figura 3, con una altura de 1.5 m con respecto al suelo, mientras que el nodo sensor fue ubicado a diferentes distancias a lo largo del pasillo (Figura 3).

En la segunda planta de la nave principal, se colocó el gateway en el extremo sur a una altura de 1.5 m con respecto al suelo, y el nodo fue colocado alejándolo una distancia de 90 m del gateway.

En las mediciones en la planta alta y baja, se mantuvo una línea de vista entre

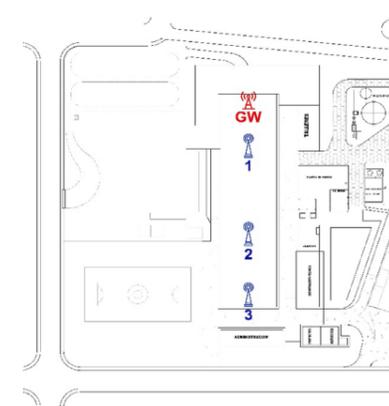


Fig. 3 Distribución del ambiente industrial 1

el nodo sensor y el gateway. En las áreas de medición, se observó un reducido tránsito de personas y maquinaria pesada (montacargas). Es importante mencionar que debido a las restricciones de seguridad, no fue posible realizar mediciones dentro de los límites de las líneas de producción.

b) **Ambiente industrial 2:** La fábrica del ambiente industrial 2 se compone de una nave principal dividida en dos alas (Figura 4). Cada una de estas cuenta con una longitud superior a 100 m y una altura aproximada de 20 m. La fábrica se compone de varias líneas de producción, en las que cada etapa del proceso, se cuenta con una maquinaria diferente, teniendo como principales actuadores a motores de alta potencia (50-120HP).

El gateway fue ubicado en la segunda planta de las oficinas del área técnica a una altura de cuatro metros con respecto al suelo. Desde este punto se logró mantener una línea de vista hacia las ubicaciones de los nodos sensores.

El primer grupo de pruebas se realizó en el ala norte, colocando el nodo sensor a una altura de 1.5 m sobre el suelo. En esta parte de la fábrica se tiene un tráfico moderado de personal y montacargas, mientras que existe una gran cantidad de maquinaria para producción y empaquetado. El segundo grupo de pruebas se las realizó en el ala sur, ubicando el nodo sensor en el extremo este de la nave, y manteniendo la posición del gateway como en las mediciones previas. En esta parte de la fábrica, la maquinaria de producción tiene alturas variables, alcanzando hasta 10 m de altura. En el ala sur, el tránsito de personal y maquinaria es reducido.

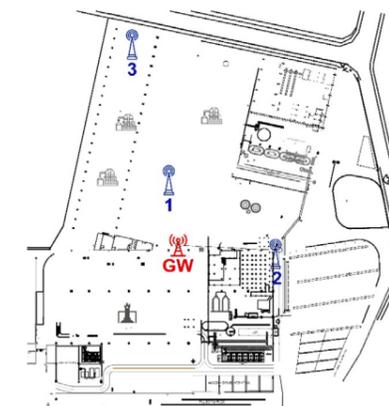


Fig. 4 Distribución del ambiente industrial 2

c) **Ambiente urbano abierto 1:** Las pruebas de control se realizaron con el fin de contrastarlas con mediciones en ambientes industriales, y evaluar sus variaciones. Se eligió el área del ambiente urbano 1, indicada en la Figura 5. Ésta presenta una extensión en un parque, sin obstáculos y un reducido gradiente, permitiendo mantener una línea de vista desde el nodo sensor hasta el gateway.

El gateway fue colocado a una altura de tres metros y el nodo sensor se ubicó a diferentes distancias como se muestra en la Figura 5. En las cercanías del parque no existen fuentes de interferencias visibles (maquinaria, torres celulares, antenas HF). El tráfico de peatones fue reducido durante el periodo de las pruebas.



Fig. 5 Ambiente Urbano Abierto 1

d) **Ambiente urbano abierto 2:** La segunda prueba de control se realizó en otro parque, ubicado en una área urbana al sureste de la ciudad de Cuenca. El parque cuenta con una longitud aproximada de 130 m y un gradiente reducido por lo que permite mantener una línea de vista entre el gateway y el nodo sensor.

El gateway fue colocado en el extremo sur del parque a una altura de 3 m. El nodo fue colocado a diferentes distancias a una altura de 1.5 m (Figura 6). En las cercanías del predio no se presentaron fuentes de interferencia. El tráfico de peatones y vehículos en la zona fue moderado.

F. Procedimientos

Los procesos de medición, consistieron en el envío de paquetes desde el nodo sensor (transmisor), manteniendo un factor de ensanchamiento, SF de 7, y una frecuencia

de transmisión constante de 433.175 MHz. Se utilizó un valor de potencia de 16 dB, el máximo permitido por el chip. El equipo transmisor se colocó a una altura de 1.5 m sobre el nivel del suelo. El gateway fue colocado a diferentes alturas para lograr mantener una línea de vista con el nodo sensor, esto en función de las condiciones de los ambientes, como se indica en la Sección IV-E.

En cada punto se transmitieron 100 paquetes, de los cuales se recolectó el RSSI, el SNR y el número de paquete para determinar porcentaje de pérdidas. Por las limitaciones de los equipos empleados no se pudo variar el SF, así como tampoco se pudieron aplicar saltos de frecuencia, debido a que esto no es soportado por el chip del receptor (SX1278) [35].

El transmisor y receptor fueron equipados con una antena de 1 dBi de ganancia y alimentados por medio de baterías de litio conectadas a los respectivos conectores micro-USB.

Las fábricas en las que se realizaron las mediciones en ambientes industriales limitaron el acceso a las instalaciones, debido a estrictas medidas de seguridad. Esto redujo la cantidad de mediciones y los puntos a analizar.



Fig. 6 Ambiente Urbano Abierto 2

V. RESULTADOS

La red inalámbrica de sensores empleando la capa física LoRa y la arquitectura LoRaWAN se evaluó en dos ambientes industriales con diferentes instalaciones y distribución de equipos. Así también se realizaron mediciones en dos ambientes de control, en los que no existen obstáculos ni fuentes de interferencia cercanas. Debido a que este es un trabajo en curso, los resultados preliminares de las primeras campañas de medición se presentan a continuación.

Los resultados de SNR (Figura 7) y RSSI (Figura 8) recopilados por el servidor LoRaWAN, muestran niveles similares para los dos ambientes industriales. Esto a pesar de las diferencias entre su maquinaria y la disposición de su infraestructura. Los valores de SNR y RSSI son similares a los medidos por [36] en ambientes urbanos y por [37] en ambientes forestales. En estos casos, los niveles para una distancia aproximada de 100 m bordean un SNR cercano a 10 unidades y el RSSI niveles cercanos a 80 dBm. Los valores de SNR y RSSI permitieron un enlace estable en el que el porcentaje de pérdidas de paquetes se mantuvo por debajo del 6 % para todos los casos (Figura 9).

En las mediciones para los escenarios de control se utilizaron parámetros iguales de configuración tanto en el nodo sensor como en el gateway. Los valores de SNR obtenidos en las mediciones de control, muestran niveles de ruido superiores a los obtenidos en ambientes industriales (Figura 7). Las mediciones de RSSI indican una mayor atenuación en todas las distancias analizadas, esto en comparación con los valores obtenidos dentro de las fábricas.

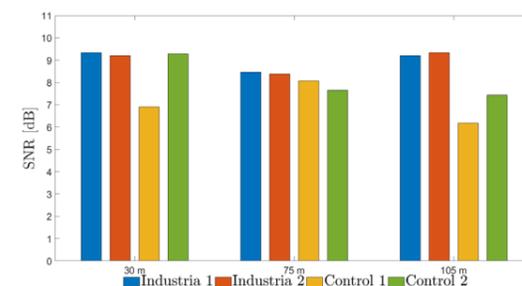


Fig. 7 Resultados de SNR para los ambientes industriales y de control

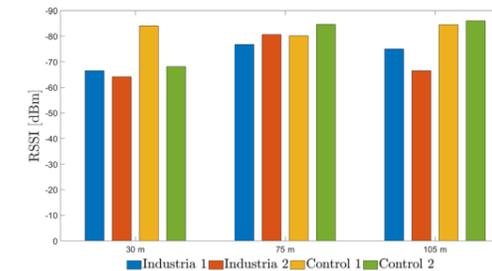


Fig. 8 Resultados de RSSI para los ambientes industriales y de control

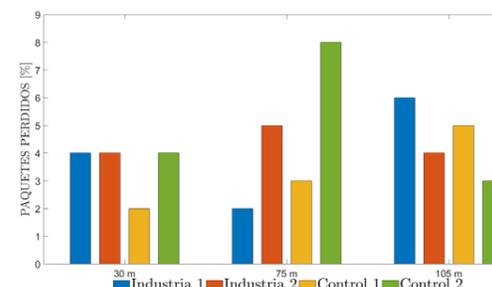


Fig. 9 Resultado de la Tasa de Pérdida de Paquetes

A pesar de las condiciones obtenidas en los ambientes de urbanos abiertos, fue posible establecer un enlace estable con pérdidas de paquetes inferiores al 6 % en la mayoría de los casos.

Los niveles de SNR medidos en los ambientes industriales y urbanos abiertos, indican un posible solapamiento de la señal debido a la propagación multi-camino [38], [39]. En los ambientes industriales, este solapamiento parece afectar de forma constructiva a la señal recibida, debido a las dimensiones y materiales de las naves industriales donde se realizaron las pruebas. En el caso de los parques de los escenarios urbanos abiertos, se observa un solapamiento con efectos de cancelación, provocando los bajos niveles de SNR medidos. El parque elegido como segundo escenario urbano abierto, mostró mejores niveles de SNR y RSSI, en contraste con el primer escenario de control. El segundo parque contaba con una menor área despejada, al estar rodeado por una zona urbana residencial. Estas condiciones afectaron en menor manera el desfase y retardo de la señal. Por las limitaciones de los equipos empleados, se utilizó solo un SF de 7, según [39] esta configuración permite una gran sensibilidad a los efectos de la propagación multi-camino en un canal Rayleigh [40].

VI. CONCLUSIONES

Los primeros resultados presentados en este trabajo muestran una importante evidencia de la aplicabilidad de la tecnología LoRa y la arquitectura LoRaWAN, en comunicaciones de corto alcance para ambientes industriales. La WSN provee una robustez y escalabilidad adecuada para el monitoreo de eventos recurrentes y aleatorios que influyen en procesos de producción y mantenimiento.

El reducido costo, baja complejidad y seguridad de los nodos sensores y gateways, facilitan su despliegue e inter-operabilidad, sin necesidad de una infraestructura existente.

Las fuentes de ruido e interferencia (motores trifásicos AC, acometidas de alta tensión, estructuras metálicas, redes WAN) identificadas en los ambientes de pruebas, no influyeron de forma considerable en la calidad del enlace, a pesar de que tanto el nodo sensor como el gateway se ubicaron en alturas cercanas al nivel del suelo.

Los parámetros de SNR, RSSI y PER, muestran poca degradación en la calidad del enlace dentro de los ambientes industriales analizados. En contraste, en las pruebas de control, se observó que los ambientes urbanos abiertos 1 y 2, cuentan con niveles considerablemente superiores de SNR, y valores

similares de RSSI y PER. Esto lleva a intuir que la nave metálica de las fábricas atenúa interferencia y ruido del exterior, además de reducir efectos destructivos de la propagación multi-camino, a la cual es más sensible el enlace configurado con un SF de 7.

El chip SX1278 cumplió satisfactoriamente las funciones de transmisor en el nodo sensor. Al ser configurado como gateway, la fiabilidad del chip de la tarjeta Heltec WiFi LoRa, puede disminuir, debido a que no está diseñado para cumplir con estas funciones.

En trabajos futuros se complementarán las campañas iniciales de medición, analizando con mayor detalle los escenarios de control y la cantidad de paquetes y repeticiones por medición. Se ve oportuno además el análisis de los efectos de dispersión multi-camino dentro de naves y estructuras metálicas así como en ambientes urbanos, en especial para SF superiores al analizado en este trabajo. Otro aspecto, sería evaluar la ubicación de gateways en niveles más elevados de las naves industriales, que faciliten una línea de vista desde cualquier punto de las instalaciones. Este trabajo también es un primer paso para evaluar la factibilidad de implementar soluciones industriales concretas basadas en la tecnología LoRa en las industrias locales.

VII. REFERENCIAS

- [1] V. Gungor and G. Hancke, "Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4258-4265, Oct. 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4796311/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [2] L. Li, J. Ren, and Q. Zhu, "On the application of LoRa LPWAN technology in Sailing Monitoring System," in 2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS). Jackson, WY, USA: IEEE, Feb. 2017, pp. 77-80. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7888762/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [3] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, *Wireless sensor networks*, ser. Ian F. Akyildiz series in communications and networking. Chichester, West Sussex, U.K. ; Hoboken, NJ: Wiley, 2010, oCLC: ocn564132645.
- [4] T. Lennvall, S. Svensson, and F. Hekland, "A comparison of WirelessHART and ZigBee for industrial applications," in 2008 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems. Dresden, Germany: IEEE, May 2008, pp. 85-88. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4638746/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [5] S. Lin, J. Liu, and Y. Fang, "ZigBee Based Wireless Sensor Networks and Its Applications in Industrial," in 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Jinan, China: IEEE, Aug. 2007, pp. 1979-1983. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4338898/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [6] S. Devalal and A. Karthikeyan, "LoRa Technology - An Overview," in 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and

- Aerospace Technology (ICECA). Coimbatore: IEEE, Mar. 2018, pp. 284-290. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8474715/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [7] M. Rizzi, P. Ferrari, A. Flammini, E. Sisinni, and M. Gidlund, "Using LoRa for industrial wireless networks," in 2017 IEEE 13th International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). Trondheim, Norway: IEEE, May 2017, pp. 1-4. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7991972/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [8] L. Leonardi, F. Battaglia, G. Patti, and L. L. Bello, "Industrial LoRa: A Novel Medium Access Strategy for LoRa in Industry 4.0 Applications," in IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Washington, DC: IEEE, Oct. 2018, pp. 4141-4146. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8591568/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [9] V. J. Hodge, S. O'Keefe, M. Weeks, and A. Moulds, "Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 1088-1106, Jun. 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6963375/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [10] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855-873, 2017. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7815384/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [11] M. Aref and A. Sikora, "Free space range measurements with semtech lora™ technology," in 2014 2nd International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, 2014, pp. 19-23.
- [12] S. Daud, T. S. Yang, M. A. Romli, Z. A. Ahmad, N. Mahrom, and R. A. A. Raof, "Performance Evaluation of Low Cost LoRa Modules in IoT Applications," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 318, p. 012053, Mar. 2018. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/318/1/012053> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [13] LoRa-Alliance, "About LoRaWAN® | LoRa Alliance®," 2020. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/about-lorawan> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [14] R. F. A. M. Nor, F. H. K. Zaman, and S. Mubdi, "Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN," in 2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC). SHAH ALAM, Malaysia: IEEE, Aug. 2017, pp. 132-137. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8070582/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [15] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, "Understanding the Limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, 2017. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8030482/>
- [16] L. Casals, B. Mir, R. Vidal, and C. Gomez, "Modeling the Energy Performance of LoRaWAN," *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2364, Oct. 2017. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2364> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [17] S.-I. Toc and A. Korodi, "Modbus-OPC UA Wrapper Using Node-RED and IoT-2040 with Application in the Water Industry," in 2018 IEEE 16th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY). Subotica: IEEE, Sep. 2018, pp. 000 099-000 104. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8524749/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [18] K. Al Agha, M.-H. Bertin, T. Dang, A. Guitton, P. Minet, T. Val, and J.-B. Viollet, "Which Wireless Technology for Industrial Wireless Sensor Networks? The Development of OCARI Technology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4266-4278, Oct. 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5173521/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [19] L. Tessaro, C. Raffaldi, M. Rossi, and D. Brunelli, "LoRa Performance in Short Range Industrial Applications," in 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). Amalfi: IEEE, Jun. 2018, pp. 1089-1094. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8445392/> [Accessed: Oct.22, 2020].

- [20] F. Gui, Y. Yin, and A. Lu, "Research on ship wireless communication technology based on lora," in 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communication, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2018, pp. 976-979.
- [21] A. Nessa, F. Hussain, and X. Fernando, "Adaptive latency reduction in lora for mission critical communications in mines," in 2020 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS), 2020, pp. 1-7.
- [22] P. Branch and T. Cricenti, "A lora relay based system for detonating explosives in underground mines," in 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2020, pp. 259-264.
- [23] M. O. Farooq and D. Pesch, "Analyzing lora: A use case perspective," in 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). IEEE, 2018, pp. 355-360.
- [24] A. Lavric and V. Popa, "Internet of things and lora™ low-power wide-area networks: a survey," in 2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS). IEEE, 2017, pp. 1-5.
- [25] R. S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang, "A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot," *Ict Express*, vol. 3, no. 1, pp. 14-21, 2017.
- [26] T. Bouguera, J.-F. Diouris, J.-J. Chaillout, R. Jaouadi, and G. Andrieux, "Energy consumption model for sensor nodes based on lora and lora-wan," *Sensors*, vol. 18, no. 7, p. 2104, 2018.
- [27] L. Casals, B. Mir, R. Vidal, and C. Gomez, "Modeling the energy performance of lorawan," *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2364, 2017.
- [28] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, "A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, 2016.
- [29] J. de Carvalho Silva, J. J. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic, and A. L. Aquino, "Lorawan—a low power wan protocol for internet of things: A review and opportunities," in 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech). IEEE, 2017, pp. 1-6.
- [30] P. San Cheong, J. Bergs, C. Hawinkel, and J. Famaey, "Comparison of lorawan classes and their power consumption," in 2017 IEEE symposium on communications and vehicular technology (SCVT). IEEE, 2017, pp. 1-6.
- [31] H. Automation, "WIFI LoRa 32 (V2)." [Online]. Available: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [32] F. R. Pi, "Raspberry Pi 3 Model B - Raspberry Pi." [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [33] "Cayenne Docs." [Online]. Available: <https://developers.mydevices.com/cayenne/docs/lora/lora-cayenne-low-power-payload>
- [34] V. Cola, "vpcola/ESP32SingleChannelGateway," Sep.2020, original-date: 2018-03-03T06:38:08Z. [Online]. Available: <https://github.com/vpcola/ESP32SingleChannelGateway> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [35] "SX1278 | 137MHz to 525MHz Long Range Low Power Transceiver | Semtech." [Online]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1278> [Accessed: Oct.22, 2020].
- [36] C. L. Carrión, "Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos con LoRaWAN en ambientes urbanos," Tesis de grado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2018. [Accessed: Oct.22, 2020].
- [37] P. Avila, "Evaluación del Rango de Transmisión de LoRa para Redes de Sensores Inalámbricas con LoRaWAN en Ambientes Forestales," Tesis de grado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2017. [Accessed: Oct.22, 2020].
- [38] Y. Ai, M. Cheffena, and Q. Li, "Radio frequency measurements and capacity analysis for industrial indoor environments," in 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2015, pp. 1-5. [Accessed: Oct.22, 2020].
- [39] K. Staniec and M. Kowal, "LoRa Performance under Variable Interference and Heavy-Multipath Conditions," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, Article ID 6931083, Apr. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2018/6931083>
- [40] B. Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. i. characterization," *IEEE Communications magazine*, vol. 35, no. 7, pp. 90-100, 1997.

AUTHORS

Adrián E. Heredia



Recibió el título de tercer nivel en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador en 2020. Participó en el programa internacional "Seeds for the Future" de Huawei Technologies, Shenzhen, China en 2018. Sus intereses de investigación incluyen redes móviles, redes de sensores inalámbricos y ciberseguridad.

Paúl F. Lucero

Recibió el título de tercer nivel en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador en 2020. Sus intereses de investigación incluyen redes móviles, redes de sensores inalámbricos, redes industriales, sistemas de transmisión por fibra óptica, microondas, enlaces satelitales, automatización, ciberseguridad, cloud computing y Tecnologías de la información.



Fabián Astudillo Salinas



Recibió el título de tercer nivel en Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, en 2007, y los grados de MSc. y Ph.D del "Institut National Polytechnique de Toulouse", Toulouse, Francia, en 2009 y 2013, respectivamente. Desde 2013 es Investigador a Tiempo Completo del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. Sus intereses de investigación incluyen redes de sensores inalámbricos, redes vehiculares, simulación de redes, ciberseguridad y HPC.

Andrés Vázquez Rodas



Recibió el grado de Ingeniero Electrónico en el año 2004 de la Universidad Politécnica Salesiana Cuenca - Ecuador, el grado de Master en Telemática (con honores) de la Universidad de Cuenca - Ecuador in 2010, y el grado de Ph.D. del Departamento de Ingeniería Telemática de la Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech (UPC), España en 2015. Desde el 2015, es profesor a tiempo completo en la Universidad de Cuenca en el Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (DEET). Sus intereses de investigación incluyen redes inalámbricas malladas, redes inalámbricas de sensores, redes industriales y sistemas complejos.