

Implementación de un sistema para evaluar la cobertura de la red sigfox en el interior de edificaciones

(Implementation of a system to evaluate the coverage of the sigfox network inside buildings)

Eduardo Revelo Vizcaino¹, Carlos Egas Acosta²

Resumen

Las redes inalámbricas de área amplia de bajo consumo energético son una tecnología clave para el desarrollo del Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés). Como todo sistema de comunicaciones inalámbricas, requiere que durante el diseño se inspeccione el lugar donde se desplegará la red para determinar las ubicaciones donde la señal es débil. Sigfox es una red con acceso inalámbrico que brinda el servicio de conectividad para Internet de las Cosas. Cuando los nodos sensores están ubicados dentro de edificios, el nivel de la señal recibida puede variar, debido a obstrucciones internas e interferencias, por lo que es necesario disponer de sistemas que tomen en cuenta las características técnicas de la red Sigfox, para medir los niveles de intensidad de la señal e identificar las ubicaciones donde no existe señal. El sistema obtiene información de los niveles de señal con el fin de identificar las ubicaciones en las cuales los nodos no tienen conectividad con la red y encontrar soluciones a este problema antes de implementar la red. La implementación del sistema utiliza nodos Sipy programados con Pymark y la nube de Sigfox, mientras que el desarrollo de la aplicación utiliza API y APIREST en el entorno de desarrollo de Visual Studio

Palabras clave

SigFox, señal, potencia, cobertura, IoT.

Abstract

Low-energy wireless wide-area networks are a key technology for the development of the Internet of Things. Like any wireless communications system, it requires that during the design the place where the network will be deployed be inspected to determine the locations where the signal is weak. Sigfox is a network with wireless access that provides the connectivity service for the Internet of Things. When the sensor nodes are located inside buildings, the level of the received signal can vary, due to internal obstructions and interference, so it is necessary to have systems that take into account the technical characteristics of the Sigfox network, to measure the levels. signal strength inside buildings and identify locations where there is no signal. The implemented system allows obtaining information on the signal levels inside the buildings in order to identify the locations in which the nodes do not have connectivity with the network and find solutions to this problem before implementing the network. The system implementation uses Sipy nodes programmed with Pymark and the Sigfox cloud, while the application development uses API and APIREST in the Visual Studio development environment.

Keywords

SigFox, signal, power, coverage, IoT.

1. Introducción

Las redes inalámbricas son una tecnología fundamental para el desarrollo de muchas aplicaciones para el Internet de las Cosas (IoT) - (Internet of Things) (Adepoju, 2022), razón por la cual han aparecido nuevas tecnologías de comunicaciones inalámbricas de bajo consumo de energía y largo alcance que permiten tener redes con cientos de nodos repartidos en grandes

1 Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador [eduardo.revelo@epn.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-3166-0354>].
2 Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador [carlos.egas@epn.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-3540-9768>].

áreas para formar redes de área amplia de baja potencia (LPWAN - Low-power WAN) (Foubert y Mitton, 2020).

El desarrollo y la importancia cada vez mayor del IoT ha creado la necesidad de mejorar los estándares de comunicación inalámbricas para redes LPWAN que garanticen una conectividad confiable entre una multitud de dispositivos de IoT. Los estándares más utilizados son Sigfox (Febriyandi et al., 2020), LoRaWAN (Ali y Sari, 2018) los cuales son redes inalámbricas de área extendida, de bajo consumo de potencia, que permiten conectividad de largo alcance y alta escalabilidad. NBloT (Routray, 2020) es una red diseñada para IoT, que utiliza la red celular para transmisión de datos de baja velocidad. Cuando se diseñan redes IoT, con cientos de nodos fijos y móviles, utilizando Sigfox (Winalisa et al., 2021), es de mucha importancia conocer el comportamiento de esta red en escenarios urbanos puesto que afectan a la intensidad de la señal recibida por los nodos (Nashiruddin y Yusri, 2020).

1.1 Estado del arte

La zona de cobertura es un elemento muy importante en el diseño de redes inalámbricas para IoT, por lo que la elección de la mejor tecnología de comunicaciones y un buen conocimiento de la zona en la cual se propagará la señal es fundamental. Por ello, (Lauridsen et al. 2017) realizan una comparación de las zonas de cobertura de Sigfox, NBloT, LoraWAN y GPRS para evaluar el porcentaje de fallas de cada una de ellas y así determinar cuál es la mejor opción. Los resultados de la comparación dependen de los escenarios seleccionados.

Purnama y Nashiruddin (2020) realizan el análisis del nivel de recepción en zonas urbanas y rurales con el fin de determinar el número de estaciones base de Sigfox para proporcionar una buena calidad de señal a los nodos sensores. En Popli et al. (2019) se evalúa el rendimiento de la comunicación y de las propiedades del canal de radio realizando pruebas en diferentes escenarios para determinar cómo el ambiente urbano afecta a la cantidad de paquetes recibidos de manera correcta y cuantificar la manera como las obstrucciones afectan a la propagación de la señal, con las frecuencias utilizadas por la red Sigfox, además de evaluar la intensidad de la señal recibida en los nodos. En (Febriyandi et al., 2020) se determina el nivel de intensidad de la señal de la red Sigfox en un área metropolitana, con el fin de planificar el número de *gateways* necesarios para implementar una red Sigfox pública y dar el servicio IoT a la ciudad en estudio. El análisis no se realiza al interior de las edificaciones.

En Poddar et al. (2020) presentan los resultados del análisis de la zona de cobertura de Sigfox y los comparan con NB-LoT para ello realizan las pruebas en campus universitarios y basados en el nivel RSSI. En Sallouha et al. (2017) se estudia el funcionamiento de la red Sigfox en entornos extremos que afectan a la propagación y penetración de la señal, y se determina la cantidad de paquetes perdidos, los resultados validan la necesidad de realizar una inspección del sitio en donde se van a colocar los nodos. Los autores Jalowiczor y Voznak, (2020) implementan un prototipo basado Android, el cual consta de módulo RF Sigfox que mide la calidad de la zona de cobertura de la red para encontrar las ubicaciones donde la cobertura es débil, los resultados de las mediciones se presentan en un mapa global.

La herramienta para analizar el área de cobertura en redes IoT (ITHACA - Internet of Things Area Coverage Analyzer) (Parada et al., 2017), es un prototipo de analizador de señales para proporcionar análisis y mapas de cobertura de señales para redes LPWAN. Los experimentos se realizan en entornos rurales y urbanos complejos (Singh et al., 2020)

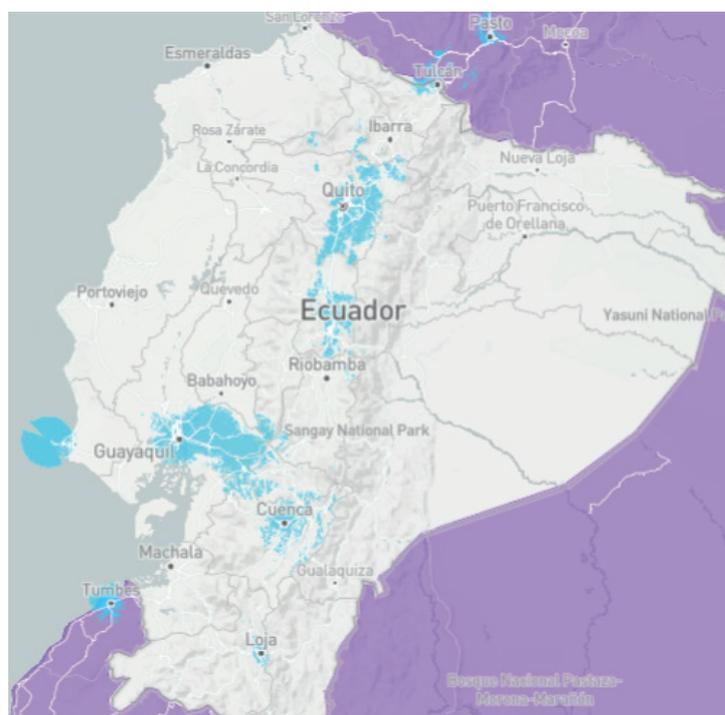
En el medidor de señal para Sigfox INTECH, se proporciona el nivel de intensidad de la señal recibido mediante leds que indican cuatro niveles de la calidad de la señal, excelente, bueno, pobre y sin señal, el medidor no permite almacenar los datos para su posterior análisis de manera conjunta.

Desafortunadamente, además de la necesidad de disponer los mapas de cobertura con niveles de intensidad obtenidos mediante simulaciones, los tomadores de decisiones y los diseñadores de redes para IoT necesitan de mapas de cobertura reales de la red Sigfox, tal como se necesita para el diseño de redes celulares, y de esta manera determinar si el sitio donde se colocará el nodo sensor recibirá la señal adecuada de la red con el propósito de que el nodo pueda transmitir los datos al centro de procesamiento de la red. Es por esta razón que se han realizado estudios de como las interferencias afectan a la señal de la red y como se interfieren entre si las diferentes tecnologías inalámbricas desarrolladas para IoT (Haxhibeqiri et al., 2019).

1.2 Red Sigfox

Sigfox es una red de bajo costo, bajo consumo de energía y confiable, que admite conectar dispositivos utilizados en el IoT (Lavric et al., 2019). Es una tecnología de red de área extendida LPWAN (Low Power Wide Area Networks) que permite la transmisión de datos entre un nodo a una radio base ubicada a varios kilómetros (Foubert y Mitton, 2020). La red Sigfox es administrada en Ecuador por la empresa WND (Wireless Network Development). Sigfox actualmente proporciona cobertura a las principales ciudades del Ecuador, tal como se muestra en la figura 1, la cobertura se indica con el color celeste. La información de la cobertura que proporciona la red Sigfox en Ecuador, no proporciona información detallada de la cobertura de red en los interiores de áreas de campus, edificaciones, casas, escuelas, etc.

Figura 1. Mapa de cobertura de la red Sigfox en Ecuador (Sigfox, 2022)



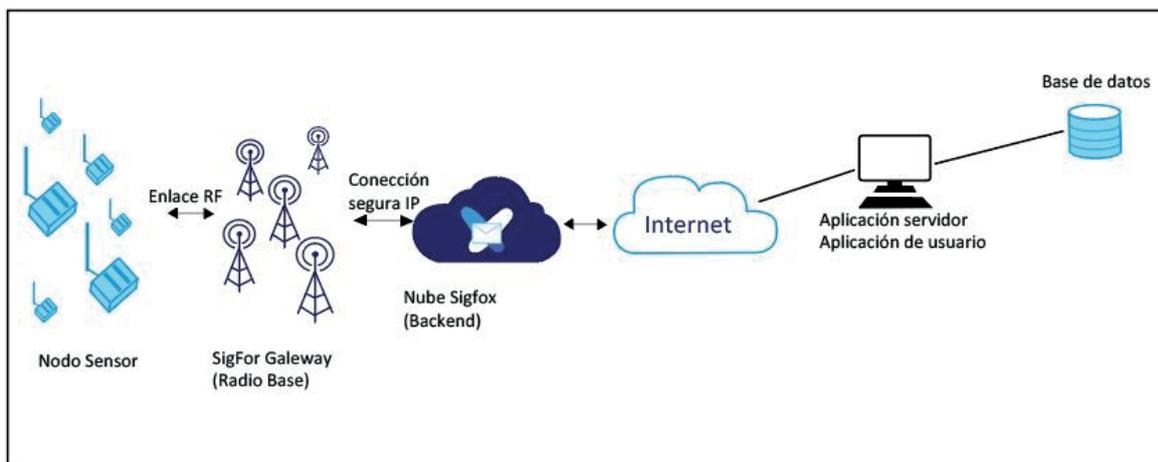
La evaluación de la cobertura de la red de inalámbrica es esencial para su diseño, despliegue y mantenimiento con múltiples estaciones base (Stusek et al., 2022) como es el caso de Sigfox. Por otra parte, es necesario contar con una herramienta que facilite el diseño de la red, con el propósito de asegurar que todos los objetos ubicados dentro de las edificaciones, a los cuales se conectan los nodos inalámbricos, puedan ser monitoreados además de facilitar la inspección del sitio en el que se realiza antes de la implementación de la red, actividad muy común en el diseño e implementación de comunicaciones inalámbricas.

El desconocimiento de los sitios dentro de las edificaciones donde no existe señal o cobertura adecuada ocasiona problemas en la conectividad de la red. Puesto que cuando el diseñador de la red no cuenta con esta información, ubicará nodos en estas zonas y por lo tanto los nodos no podrán enviar información, obligando al diseñador a realizar un rediseño de la red implementada con el aumento de costos y tiempos de entrega.

2. Materiales y métodos

La implementación del sistema requiere de *hardware* y *software*, los cuales forman parte del diagrama que se presenta en la figura 2.

Figura 2. Esquema del sistema para evaluar la zona de cobertura



La nube Sigfox (Zuniga y Ponsard, 2016) se compone de nodos sensores o actuadores, radio bases, la nube Sigfox y la red internet. La red internet le permite a un nodo conectado a la red Sigfox transmitir los datos de cualquier parte del mundo.

- Nodo sensor: se encarga de enviar los mensajes con el LQI correspondiente a las radio bases que conforman la red.
- Radio bases: se encarga de recibir los mensajes del nodo utilizando las frecuencias de 915 Mhz y retransmite el mensaje a la nube Sigfox. Estas estaciones bases no pueden ser configuradas y accedidas por los usuarios
- Nube de Sigfox: conocido como BackEnd, se encarga del almacenamiento, gestión y administración de los mensajes y nodos de la red. Se encuentra dentro del internet y proporciona los mensajes al servidor del usuario en donde se ejecutan la una aplicación servidor y una aplicación de usuario.

- Servidor: se encarga de la conexión con la nube de Sigfox para obtener los mensajes enviados por los nodos, además permite la conexión con la base de datos donde Sigfox almacena los datos de monitoreo y con la aplicación de usuario. Físicamente es implementado en la computadora del usuario. Las aplicaciones interactúan con los datos que se recolectan por los dispositivos, a través de una interfaz web y una serie de interfaces de programa de aplicación (API- Application Programming Interface) (Feng et al., 2019)
- Base de Datos: Es el componente encargado de almacenar toda la información necesaria de los mensajes del servidor de manera ordenada. Físicamente se encuentra en una computadora.

Dentro de los componentes del prototipo de red implementado, las radio bases y la nube forman parte de la red administrada por Sigfox que ya se encuentran implementadas por el operador y se hace uso de ellas. Los demás componentes del prototipo, como son el servidor, la base de datos, la aplicación de usuario y la aplicación de configuración del nodo son implementados por los autores del artículo.

Es necesaria la implementación de *software* para la operación de los nodos sensores Pycom que permita enviar información a las radios bases Sigfox, y del *software* para los aplicativos que se ejecutan en el computador personal que permita el desarrollo de la aplicación servidor, la aplicación de usuario y la base de datos.

Nodo sensor

El prototipo de red implementado utiliza los nodos sensores Sipy (Pycom, 2020) del fabricante Pycom que se presentan en la [figura 3](#).

Figura 3. Nodo sensor sipy



El *software* ejecutado en los nodos sensores Pycom permite la interacción entre el usuario y el nodo sensor Pycom, además de enviar los datos al BackEnd, también envía la ubicación dentro de la edificación, el indicador de calidad de la señal (LQI - Link Quality Indicator) (Purnama y Nashiruddin, 2020), el código que permita la identificación del diagrama de la zona dentro de la edificación que se utiliza y el código que permite indicar la posición dentro de la edificación.

El prototipo de red implementado permite configurar los nodos sensores Pycom en el sitio en el cual se está realizando la obtención del nivel de intensidad de la señal. La información que

el nodo requiere para su funcionamiento es principalmente la ubicación del nodo dentro de la edificación y los intervalos en los cuales el nodo envía los mensajes a la red Sigfox.

Previa a la realización de la inspección de sitio para obtener los niveles de intensidad de la señal recibidos de la red Sigfox, se definen con anticipación los lugares donde se ubicarán los nodos sensores dentro de la edificación y el tiempo en el que el nodo estará operando en cada ubicación para obtener el nivel de intensidad de la señal.

El proceso de inspección del lugar requiere de la utilización de varios nodos sensores dentro de la edificación los que permitirán evaluar los niveles de la señal de una manera más rápida, esto debido a que la red Sigfox tiene una limitante en el tiempo mínimo entre dos transmisiones consecutivas de un nodo, cuyo valor es de 10 minutos aproximadamente.

Sistema de software

El sistema de *software* desarrollado para cumplir con el objetivo planteado consta de los siguientes 4 subsistemas:

El subsistema aplicación para configuración de los nodos se encarga de crear el código que permite a los nodos sensores Pycom enviar mensajes a la red Sigfox, para lo cual utiliza las herramientas Atom (Atom, 2022) y Pymark (Python Software Foundation, 2021).

El subsistema aplicación Servidor permite que el computador se conecte con el BackEnd, para recuperar los datos obtenidos del nodo sensor. La conexión al BackEnd se realiza mediante el uso de la API REST. Para la implementación se utiliza el entorno de desarrollo integrado (IDE - Integrated Development Environment) de Visual Studio (Microsoft, 2022).

La aplicación servidor permite que la computadora se conecte con el BackEnd, que es la plataforma en donde se almacena toda la información obtenida por los nodos sensores, y puede ser accedida mediante aplicaciones que utilicen la API (Feng et al., 2019) de devolución de llamada (*callbacks*) y la API REST (Li et al., 2016). De manera general, las API de devolución de llamadas se utilizan para recuperar los mensajes de los dispositivos, y la API REST se utiliza para la administración y gestión de todos los dispositivos que están conectados.

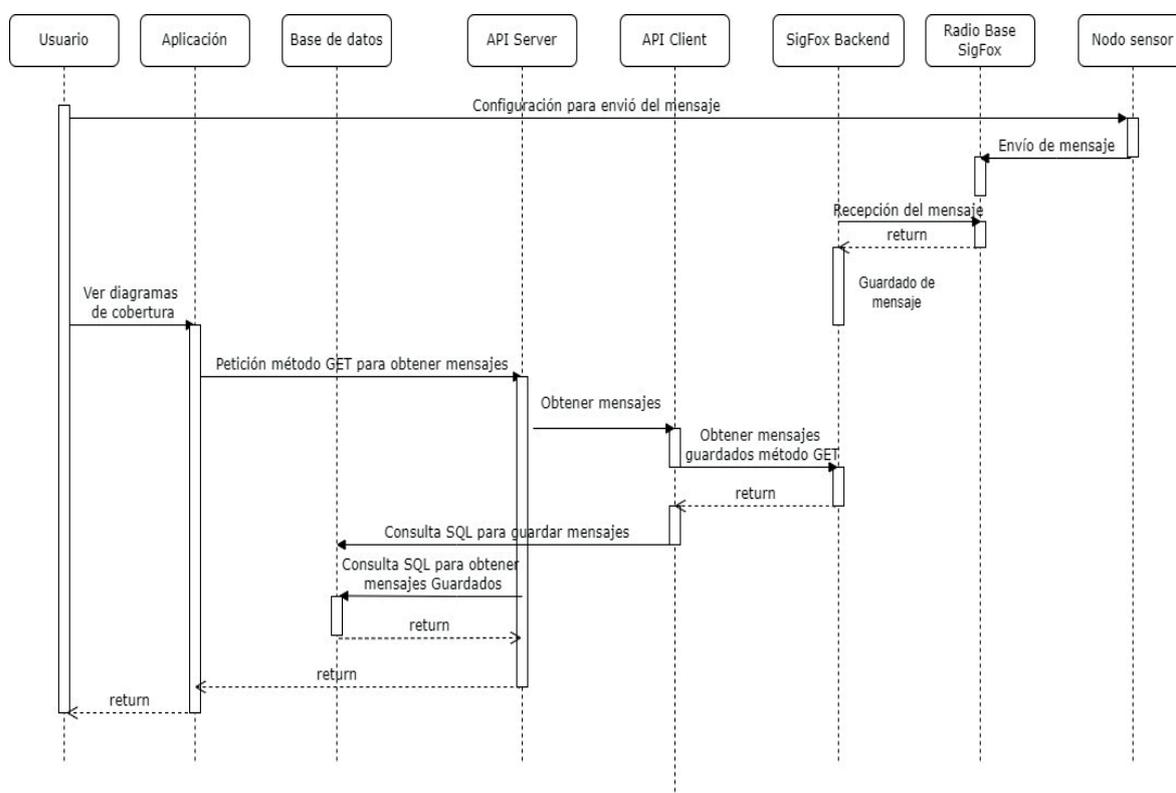
El subsistema base de datos se encarga del almacenamiento de los mensajes correspondientes al subsistema aplicación de usuario para lo cual se utiliza Microsoft SQL Server Management Studio 18 (Microsoft, 2019).

El subsistema aplicación de usuario se conecta a la aplicación Servidor utilizando la API REST. Estas API REST se implementan en la aplicación servidor y de esta manera acceder a la información de la base de datos. La herramienta utilizada que facilita la implementación la interfaz gráfica para la presentación de los resultados es Visual Studio Code.

En la figura 4 se presenta la interacción en el proceso de comunicación entre los elementos del sistema.

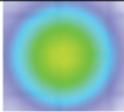
La información enviada por los nodos sensores Pycom, se procesa en la aplicación de usuario con el propósito de presentar, de manera visual, los niveles de intensidad de la señal en la edificación en la que se está realizando la inspección. La aplicación de usuario hace uso de un plano de la edificación, en la que se grafican los valores del LQI. El plano es previamente ingresado en formato digital para su utilización en la aplicación de usuario. Los resultados de los niveles de intensidad de la señal relacionados con la cobertura de la señal de Sigfox se grafican en el plano de la edificación previamente ingresado.

Figura 4. Interacción entre los elementos del sistema



La aplicación de usuario presenta el nivel de intensidad de la señal en la posición indicada, el nivel de intensidad se presenta con un color asociado al nivel de la calidad del enlace (LQI - Link Quality Indication) presente en esa posición. Los colores asociados a cada nivel de intensidad de la señal se indican en la [figura 5](#).

Figura 5. Colores asociados al nivel de intensidad

Nivel de LQI	Color
Excelente	
Bueno	
Limitado	

3. Resultados y discusión

En ambientes libres de obstrucciones, la intensidad de la señal recibida depende únicamente de la distancia entre el Gateway y el nodo sensor; es decir, nodos que están ubicados a la misma distancia reciben la misma cantidad de energía; nodos más cercanos a la estación base reciben mayor cantidad de energía que los más alejados. Los nodos ubicados en el interior de las edificaciones, considerando que su distancia a la estación base de Sigfox es prácticamente la misma, deberían recibir el mismo nivel de intensidad de la señal cuando no existan elementos que obstruyan la señal que causa reflexiones y difracciones. Sin embargo, las paredes, las edificaciones contiguas y los materiales utilizados en el interior de las edificaciones, afectan de manera independiente a cada nodo, por lo que el nivel de intensidad de la señal que es captada por el nodo sensor puede ser diferente, a tal punto de que el nodo no pueda transmitir datos.

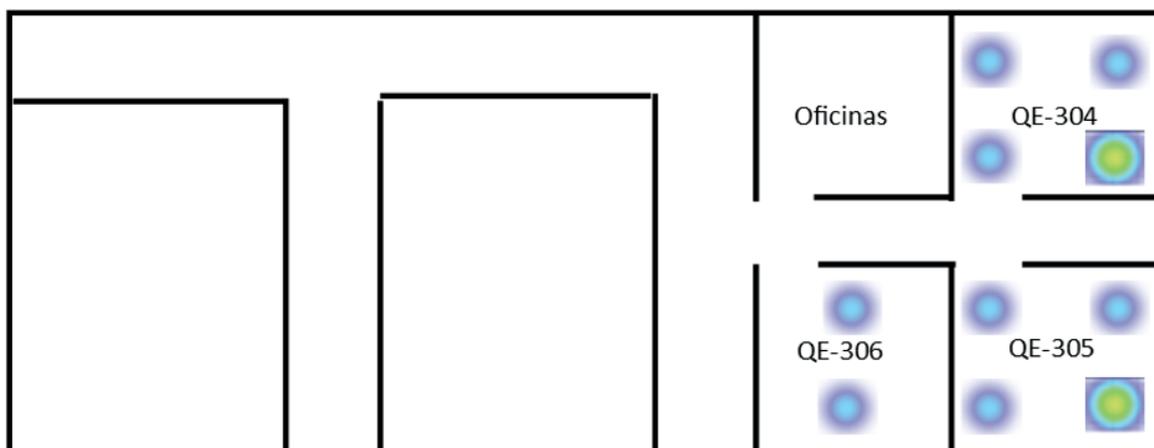
El primer escenario de pruebas, se lo realizó en el edificio de Química/Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional que se presenta en la [figura 6](#).

Figura 6. Edificio Química-Eléctrica



Las pruebas se realizaron en las peores condiciones, para ello se seleccionaron sitios dentro de la edificación rodeados por obstrucciones que afectaron la recepción de la señal para verificar la utilidad del prototipo implementado. En la [figura 7](#) se presentan los resultados obtenidos de los niveles de intensidad de la señal de la red Sigfox dentro de las aulas del tercer piso del edificio.

Figura 7. Resultados del piso 3 del edificio de Química-Eléctrica

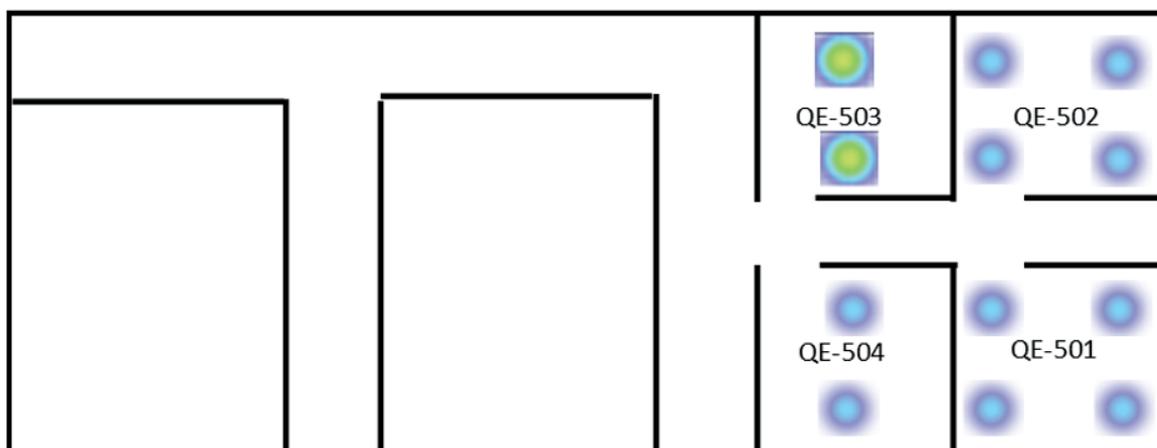


Como se puede apreciar, los niveles de intensidad son "Excelentes" únicamente en dos ubicaciones, lo cual no debería suceder, porque teóricamente todos deberían tener el mismo nivel de intensidad de la señal; es decir, todos tener el nivel excelente, ya que su distancia a la estación base es prácticamente la misma y su ubicación dentro de las aulas es de apenas una distancia de 10 metros.

Las razones por las cuales los nodos tienen diferentes niveles de señal recibida, están relacionadas con las reflexiones, difracciones y atenuaciones que sufre la señal cuando ingresa al interior del edificio, debido a las paredes y pisos. En este caso al tener los demás nodos un nivel de señal Bueno, se considera que los nodos van a funcionar óptimamente, no obstante, se debe resaltar que no todos los nodos tienen el mismo umbral de recepción, lo cual debe ser tomado en cuenta cuando se realiza el diseño con el propósito de determinar los niveles de recepción adecuados de los nodos a adquirir.

En la [figura 8](#) se pueden apreciar los resultados obtenidos en el quinto piso, del mismo edificio. Cabe recalcar que la distribución física de las oficinas y aulas es exactamente la misma, lo único que cambia es su altura con referencia a la planta baja, sin embargo, se observa que para la misma ubicación de los nodos los niveles de intensidad son diferentes.

Figura 8. Resultados del piso quinto del edificio de Química-Eléctrica



En este caso, a pesar de que los nodos están ubicados a una altura mayor, existen ubicaciones donde el nivel de la señal es "Limitada", lo cual obligaría al diseñador de la red IoT a tomar las precauciones del caso.

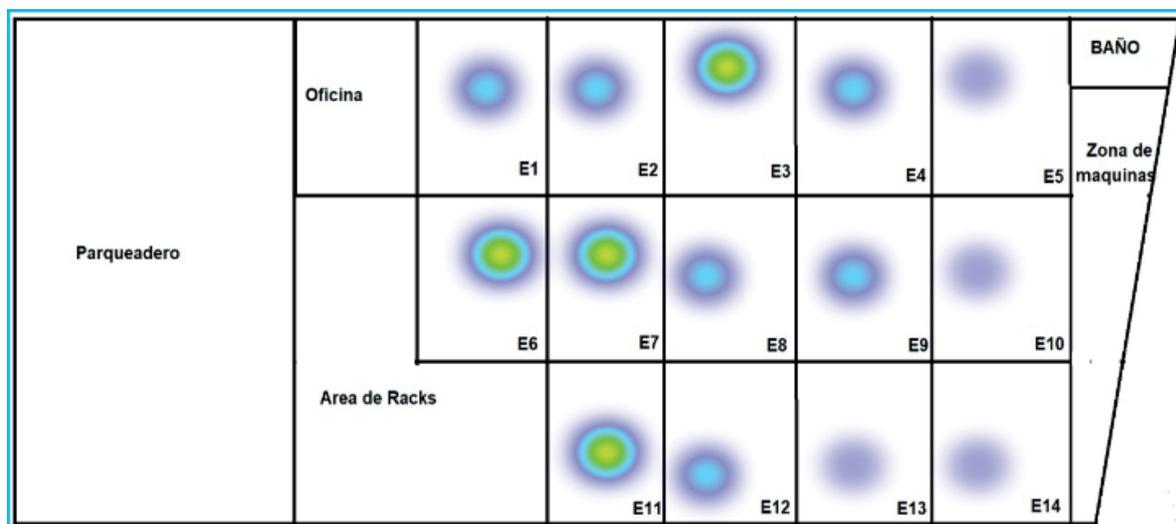
El segundo escenario para realizar las pruebas es el Gimnasio Ignite Athletic, el cual se presenta en la [figura 9](#).

Figura 9. Gimnasio "Ignite Athletic"



Los resultados obtenidos se presentan en la [figura 10](#). Las estaciones de trabajo donde se colocan los nodos sensores se los representa con la letra E.

Figura 10. Resultados Gimnasio "Ignite"



Todas las mediciones se realizaron en cada estación del trabajo (máquinas para realizar ejercicio), en el gimnasio en donde se planifica ubicar los nodos IoT. Teóricamente el nivel de intensidad de la señal recibida debería ser el mismo en todas las ubicaciones donde se realizaron las medidas, pues no existen paredes entre las estaciones de trabajo, a pesar de esto los resultados obtenidos indican lo contrario. Las ubicaciones que están cerca del área de *racks* tienen un nivel de recepción "Excelente", es muy probable que esto se deba a que están cerca a la puerta de acceso; por otra parte, las ubicaciones que se encuentran cerca de la zona de máquinas, tienen un nivel limitado lo que dificultaría que el nodo sensor envíe la información de manera satisfactoria. El bajo nivel de intensidad se debe a que la pared del gimnasio que está cerca de las ubicaciones E5, E10 y E14, está adosada a una pared de un edificio lo que complica la recepción de un buen nivel de la señal.

La red Sigfox proporciona varias estaciones Base para conectarse con el nodo sensor, y el servicio proporcionado por Sigfox selecciona aquella que permite al nodo sensor tener un nivel de señal alto. En este caso específico, ninguna de las estaciones bases de Sigfox disponibles proporciona a los nodos que están en estas ubicaciones críticas una mejor señal.

Si se comparan los resultados del prototipo implementado con otras alternativas, las soluciones propuestas por Parada et al. (2017) y Jalowiczor y Voznak (2020) no resuelven el problema al interior de las edificaciones, por ello utilizan el GPS para la determinación de la ubicación del nodo sensor. En el caso de medidores de intensidad de campo profesionales como Adeunis (2022) no presentan los resultados en los planos de las edificaciones ya que el diseñador de manera manual, debe ubicar las posiciones problemáticas en un plano.

4. Conclusiones y recomendaciones

El sistema implementado requirió del desarrollo de *software* para que el Backend de Sigfox interactúe con la aplicación de usuario y con el nodo sensor, de manera que los datos obtenidos se presenten al usuario utilizando una interfaz gráfica.

Las pruebas se realizaron físicamente en el gimnasio "Ignite Athletic" y en las aulas del edificio de Química - Eléctrica en la Escuela Politécnica Nacional. Los resultados obtenidos permitieron comprobar la utilidad y la importancia del sistema implementado, ya que de una manera visual se determinan ubicaciones específicas dentro de las edificaciones con niveles de intensidad de la señal bajos y en algunos casos ausencia de señal recibida, lo que provocó errores en la transmisión de datos y por consecuencia que la red IoT no proporcione la calidad de servicio que requieren las aplicaciones determinando un mal servicio al usuario.

Sigfox proporciona al diseñador zonas de cobertura que nos indican cual es el nivel de señal óptimo en zonas abiertas, sin embargo en un edificio que está dentro de estas zonas, las difracciones y refracciones de la señal en el interior del edificio hay que tomarlas muy en cuenta el momento de realizar el diseño, ya que son la causa para que dentro de la edificación los nodos reciban diferentes niveles de señal, lo cual es imposible detectar en diseños teóricos.

A pesar que la red Sigfox tiene varias estaciones base a las cuales pueden conectarse los nodos, las paredes, las edificaciones vecinas, colinas y obstrucciones en general, atenúan la señal que reciben los nodos. El sistema implementado se constituye en una herramienta fundamental para el diseño óptimo de este tipo de redes, debido a que permite de manera temprana la solución de problemas debido a la falta de conectividad de los nodos sensores con la red Sigfox.

Si se considera que los cientos de nodos ubicados al interior de las edificaciones forman parte de la red de Internet de las Cosas, recomendamos verificar el nivel de la señal en cada una de las posiciones en donde se colocaran los nodos, independientemente que Sigfox indique que el nivel de la señal es excelente.

A partir de los resultados obtenidos que confirman la validez de la propuesta, se pretende implementar el sistema para su comercialización, para lo cual es necesario construir los nodos específicamente adaptados al monitoreo del nivel de la señal en la red Sigfox.

Referencias

- Adepoju, O. (2022). Internet of Things (IoT). En *En Re-skilling Human Resources for Construction.4.0. Springer Tracts in Civil Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85973-2_8
- Adeunis. (2022). *TD: network tester*. <https://www.adeunis.com/en/produit/ftd-network-tester/>
- Ali, I. T., y Sari, R. F. (2018). Research Opportunities of LoRaWAN for Internet of Things Implementation. *2018 2nd International Conference on Applied Electromagnetic Technology, AEMT 2018*, 61–66. <https://doi.org/10.1109/AEMT.2018.8572427>
- Atom. (2022). *Atom* (1.6). <https://atom.io/>
- Febriyandi, F., Arifin, A. S., & Nashiruddin, M. I. (2020). Sigfox Based Network Planning Analysis for Public Internet of Things Services in Metropolitan Area. *Proceedings - 2020 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology, IAICT 2020*. <https://doi.org/10.1109/IAICT50021.2020.9172012>
- Feng, Y., Junyi, H., Weipeng, A., Flanagan, C., MacNamee, C., y McGrath, S. (2019). API Monitor based on internet of things technology. *Proceedings of the International Conference on Sensing Technology, ICST, 2018-December*. <https://doi.org/10.1109/ICSensT.2018.8603566>
- Foubert, B., y Mitton, N. (2020). Long-range wireless radio technologies: A survey. In *Future Internet* 12, (1). <https://doi.org/10.3390/fi12010013>
- Haxhibeqiri, J., Shahid, A., Saelens, M., Bauwens, J., Jooris, B., De Poorter, E., y Hoebeke, J. (2019). Sub-Gigahertz Inter-Technology Interference. How Harmful is it for LoRa? *2018 IEEE International Smart Cities Conference, ISC2 2018*. <https://doi.org/10.1109/ISC2.2018.8656742>
- Jalowiczor, J., y Voznak, M. (2020). Proposal and implementation of probe for sigfox technology. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 554. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14907-9_41
- Lauridsen, M., Nguyen, H., Vejlgard, B., Kovacs, I. Z., Mogensen, P., y Sorensen, M. (2017). Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km Area. *IEEE Vehicular Technology Conference, 2017-June*. <https://doi.org/10.1109/VTCSprinyg.2017.8108182>
- Lavric, A., Petrariu, A. I., y Popa, V. (2019). SigFox Communication Protocol: The New Era of IoT? *2019 International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era, ISSI 2019*. <https://doi.org/10.1109/ISSI47111.2019.9043727>
- Li, L., Chou, W., Zhou, W., & Luo, M. (2016). Design Patterns and Extensibility of REST API for Networking Applications. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 13(1). <https://doi.org/10.1109/TNSM.2016.2516946>
- Microsoft. (2019). *Microsoft SQL Server Management Studio* (No. 18). <https://docs.microsoft.com/en-us/sql/ssms/sql-server-management-studio-ssms?view=sql-server-ver15>
- Microsoft. (2022). *Visual Studio* (17.1). <https://visualstudio.microsoft.com/es/vs/>
- Nashiruddin, M. I., y Yusri, A. (2020). SigFox Network Planning for Smart Metering Based on Internet of Things for Dense Urban Scenario. *2020 8th International Conference on Information and Communication Technology, ICICT 2020*. <https://doi.org/10.1109/ICICT49345.2020.9166398>

- Parada, R., Cárdenes-Tacoronte, D., Monzo, C., y Melià-Seguí, J. (2017). Internet of Things Area Coverage Analyzer (ITHACA) for complex topographical scenarios. *Symmetry*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/sym9100237>
- Poddar, N., Khan, S. Z., Mass, J., y Srirama, S. N. (2020). Coverage Analysis of NB-IoT and Sigfox: Two Estonian University Campuses as a Case Study. *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing, IWCMC 2020*. <https://doi.org/10.1109/IWCMC48107.2020.9148570>
- Popli, S., Jha, R. K., y Jain, S. (2019). A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NB-IoT): Architecture, Application and Challenges. In *IEEE Access* (Vol. 7). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2881533>
- Purnama, A. A. F., y Nashiruddin, M. I. (2020). Sigfox-based internet of things network planning for advanced metering infrastructure services in urban scenario. *Proceedings - 2020 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology, IAICT 2020*. <https://doi.org/10.1109/IAICT50021.2020.9172022>
- Pycom. (2020). *pycom go invent*. <https://docs.pycom.io/datasheets/development/sipy/>
- Python Software Foundation. (2021). *PyMark* (0.7.1). <https://pypi.org/project/PyMark/>
- Routray, S. K. (2020). Narrowband IoT for Emergency Medicine. En S. Routray y S. Mohanty (Eds.) *Principles and Applications of Narrowband Internet of things*. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-4775-5.ch007>
- Sallouha, H., Chiumento, A., y Pollin, S. (2017). Localization in long-range ultra narrow band IoT networks using RSSI. *IEEE International Conference on Communications*. <https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7997195>
- Sigfox. (2022). *Cobertura Sigfox*. <https://www.sigfox.com/en/coverage>
- Singh, R. K., Aernouts, M., De Meyer, M., Weyn, M., y Berkvens, R. (2020). Leveraging LoRaWAN Technology for Precision Agriculture in greenhouses. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 20, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/s20071827>
- Stusek, M., Moltchanov, D., Masek, P., Mikhaylov, K., Hosek, J., Andreev, S., Koucheryavy, Y., Kustarev, P., Zeman, O., y Roubicek, M. (2022). LPWAN Coverage Assessment Planning Without Explicit Knowledge of Base Station Locations. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(6), 4031-4050. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3102694>
- Winalisa, S., Nashiruddin, M. I., y Murti, M. A. (2021). Designing Sigfox Network for Public Internet of Things in Batam Island. *IoTaIS 2020 - Proceedings: 2020 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems*. <https://doi.org/10.1109/IoTais50849.2021.9359703>
- Zuniga, J. C., y Ponsard, B. (2016). Sigfox System Description. *Ietf 97*. <https://www.ietf.org/proceedings/97/slides/slides-97-lpwan-25-sigfox-system-description-00.pdf>