



Análisis del modelo de sombreado normal-logarítmico aplicado a un enlace LoRa punto a punto

Reynel Olivera-Reyna

reynel@uaz.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-7964-3986>

Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus Jalpa

Jalpa, Zacatecas – México

Posgrado en Ingeniería para la Innovación Tecnológica

Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus Siglo XXI

Zacatecas – México

Roberto Olivera-Reyna

roliverar@uaz.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-0340-9560>

¹Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus Jalpa

Jalpa, Zacatecas – México

Posgrado en Ingeniería para la Innovación Tecnológica

Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus Siglo XXI

Zacatecas – México

Jorge U. Muñoz-Minjares

ju.munoz@uaz.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8097-9551>

Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus Jalpa

Jalpa, Zacatecas – México

Posgrado en Ingeniería para la Innovación Tecnológica

Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus Siglo XXI

Zacatecas – México

Jorge Flores-Troncoso

jflorest@uaz.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8383-6836>

Posgrado en Ingeniería para la Innovación Tecnológica

Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus Siglo XXI

Zacatecas – México

Osbaldo Vite-Chávez

osvichz@uaz.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-0438-8105>

Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus Jalpa

Jalpa, Zacatecas – México

RESUMEN

LoRa es una tecnología inalámbrica de bajo consumo de potencia y largo alcance empleada en redes de área amplia. Además de LoRa, en el mercado existen otras tecnologías inalámbricas para transmisión de datos con diversas cualidades. Sin embargo, la tecnología LoRa se puede explotar en diferentes aplicaciones tales como redes de sensores inalámbricas (WSN, por sus siglas en inglés), rastreo y localización. Esto debido a su gran ventaja de soportar un gran número de dispositivos de comunicación. La tecnología LoRa está basada en la técnica de modulación Chirp Spread Spectrum (CSS, por sus siglas en inglés), esto le proporciona robustez ante el ruido y otros fenómenos de degradación de canal. En el presente trabajo se presenta el desempeño de la tecnología LoRa en ambientes interiores y semi-interiores con una conexión punto a punto para estimar la distancia basado en el indicador de la intensidad de la señal recibida (RSSI, por sus siglas en inglés). Las mediciones de RSSI realizadas, la estimación de las funciones logarítmicas para calcular las distancias y los errores, son presentados en este documento. Finalmente, se puede concluir que los resultados obtenidos son satisfactorios, con un margen de error aceptable para ambientes interiores y semi-interiores.

Palabras clave: distancia; estimación; LoRa, RSSI.

Correspondencia: reynel@uaz.edu.mx

Artículo recibido 15 setiembre 2022 Aceptado para publicación: 15 octubre 2022

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Cómo citar: Olivera-Reyna, R., Olivera-Reyna, R., Muñoz-Minjares, J. U., Flores-Troncoso, J., & Vite-Chávez, O. (2022). Análisis del modelo de sombreado normal-logarítmico aplicado a un enlace LoRa punto a punto. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 5153-5166. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.3802

Analysis of the log-normal shadowing model applied to point-to-point LoRa link

ABSTRACT

LoRa is a low-power wireless technology and long range used in wide area network. In addition to LoRa, there are other wireless technologies for data transmission with several qualities. However, LoRa technology can be exploited in different applications such as Wireless Sensor Network (WSN), tracking and location. This is due to its great advantage to support a high number of communication devices. The LoRa technology is based on the Chirp Spread Spectrum (CSS) modulation, this provides robustness to noise and other phenomena of degradation channel. In this work, it is presented the LoRa Technology performance in indoor and quasi-indoor environments with a point-to-point connection to estimate the distance based on the Received Signal Strength Indication (RSSI). The RSSI measurements, the estimating logarithmic function to compute distances and errors are shown in this manuscript. Finally, it can be concluded that the results are satisfactory, with an acceptable margin of error for indoor and quasi-indoor environments.

Keywords: *distance; estimation; LoRa, RSSI.*

INTRODUCCIÓN

La tecnología LoRa ha sido diseñada específicamente para comunicaciones inalámbricas de baja velocidad de datos, con el objetivo de cubrir largas distancias y consumir poca energía. Estas características hacen que LoRa sea ideal para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) (Zhou, Q., 2019). Esta tecnología se basa en la técnica de modulación Chirp de Espectro Esparcido (CSS, por sus siglas en inglés), que codifica la información a través de chirridos con una variación lineal de frecuencia en el tiempo. Dado que los pulsos Chirp varían linealmente, una desviación de frecuencia entre el transmisor y el receptor puede verse como una desviación de tiempo, que puede compensarse fácilmente en el decodificador. Además, esta característica hace que la modulación sea robusta ante el efecto Doppler.

Hoy en día existen tecnologías inalámbricas para transmisión de datos, tales como WiFi, Bluetooth de baja energía (BLE, por sus siglas en inglés), identificación por radio frecuencia (RFID, por sus siglas en inglés), ZigBee, Banda Ultra Ancha (UWB, por sus siglas en inglés), entre otras. Algunas de estas tecnologías, como WiFi y BLE, han alcanzado un grado de madurez tal que ya es de uso común en dispositivos móviles, en redes domésticas y de oficina, etc. Sin embargo, tecnologías como LoRa (Kjendal, 2021), son ampliamente utilizadas debido a que poseen características interesantes tales como largo alcance, bajo consumo de potencia, alta sensibilidad en el receptor, entre otras (Kim et al., 2021, Zafari et al., 2019). Estas ventajas provocan que esta tecnología sea propicia para aplicaciones de sensado, rastreo y localización, búsqueda y rescate (Bianco et al., 2021), sobre todo en ambientes exteriores.

A pesar de las amplias ventajas de la tecnología LoRa, su uso en interiores se ha restringido debido a los fenómenos de reflexión, refracción y difracción de las ondas de radio (Rappaport, 2002). La causa de estos defectos en la transmisión se debe a la colisión de las ondas en los objetos presentes en la escena como paredes, puertas, ventanas, muebles, etc. Principalmente por esta causa, se requiere modelar el canal de transmisión para un espacio cerrado en particular si se pretende garantizar una transmisión óptima de datos entre dispositivos de radiofrecuencia.

Se han realizado diversos estudios para evaluar la efectividad de la comunicación de un enlace LoRa en entornos cerrados como casas, oficinas, edificios, etc. En (Bertoldo et al., 2019) se evaluaron cinco modelos empíricos de propagación en interiores para un enlace

de radio LoRa en un entorno de oficina. Aquí se utilizaron diferentes modelos empíricos con información de banda estrecha que utilizan como base al modelo de atenuación en el espacio libre. Los resultados mostraron que la tecnología LoRa se puede utilizar con un muy buen rendimiento en un entorno interior de oficina. En el documento presentado por (Hosseinzadeh et al., 2017) también se realizó una evaluación empírica del desempeño de la propagación de LoRa para un ambiente interior. En este trabajo se mostró que la distancia logarítmica es buena opción cuando no hay un modelo de la estructura, el modelado del entorno es difícil y el cálculo y la complejidad del modelo de trazado de rayos 3D son incómodos.

Los trabajos mencionados utilizan un parámetro en común para calcular la distancia en una comunicación punto a punto de dispositivos LoRa, el indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI por sus siglas en inglés). El RSSI se puede utilizar para realizar sistemas de localización en interior y exterior. En (Goldoni et al., 2019) se presentó un conjunto completo de datos experimentales de mediciones del RSSI recopilados en diferentes entornos interiores y exteriores utilizando radios LoRa. Además, aplicaron algoritmos de localización simples y energéticamente eficientes al conjunto de datos, los algoritmos empleados son de trilateración y de máxima verosimilitud.

Tradicionalmente, para modelar el canal de comunicaciones se inicia con la ecuación de transmisión de Friis y para convertir la potencia de watts a decibeles (dBm) y obtener una relación entre la potencia recibida de RSSI y la distancia. Los parámetros necesarios para modelar el canal de comunicaciones están relacionados con las propiedades físicas del dispositivo de radio, el entorno y la frecuencia de funcionamiento. La estimación de la distancia en función del parámetro RSSI mediante tecnologías inalámbricas como ZigBee o WiFi está ampliamente documentado en la literatura (Mohammed, 2016) y (Vara et al., 2015). Estos trabajos muestran como mediante tecnologías de bajo costo se pueden implementar sistemas de localización y rastreo en aplicaciones como redes de sensores inalámbricas (Oguejiofor et al., 2013).

Sin embargo, si se pretende utilizar la tecnología LoRa para la localización en interiores, se requiere de la caracterización de la intensidad de la señal en el lugar determinado. Esto, debido a que los materiales de construcción y los objetos en el área determinan cómo se comportan los fenómenos de reflexión, refracción y difracción de las ondas de radio. Por ello, en este trabajo se pretende realizar la caracterización de las mediciones

de RSSI en un enlace LoRa en las instalaciones de una Universidad para calcular la distancia entre el Transmisor y el Receptor, Tx y Rx, respectivamente. Para esto, se realizarán mediciones en dos ambientes, uno interior en un laboratorio de electrónica de potencia y otro semi-interior en los pasillos de las aulas. Así, se observará la diferencia del comportamiento de la señal y se obtendrá el modelado del canal de comunicación para los ambientes propuestos.

MATERIALES Y MÉTODOS

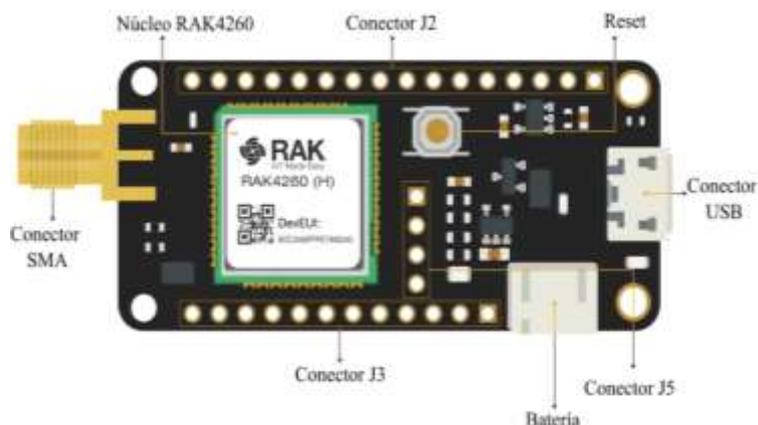
En esta sección se presenta la descripción del hardware utilizado, la definición del parámetro de indicador de intensidad de la señal recibida y el modelo propuesto para describir la relación RSSI y distancia.

El dispositivo LoRa BastWAN

Para el desarrollo de este trabajo se eligió la tarjeta BastWAN® debido a que cuenta con el módulo RAK4260 que produce un consumo de energía ultra-bajo y alto desempeño (Electronic Cats, 2020). La descripción general de la interfaz de la placa BastWAN se presenta en la Figura 1. El RAK4260 es un chip todo en uno para implementar LoRa. La BastWAN incluye un puerto micro USB y un cargador de batería LiPo además de elementos únicos en su tipo como el chip de autenticación criptográfica ATECC608A. La placa BastWAN viene ensamblada por completo, probada y programada con el bootloader USB UF2. Esto quiere decir que para reprogramarla solo se tiene que copiar y pegar el archivo con el firmware como si se estuviera copiando un archivo a una memoria USB. Además, la BastWAN es compatible con el IDE de Arduino, con MakeCode y otros entornos de desarrollo. Para desarrollar el proyecto se utilizó el IDE de Arduino.

Figura 1.

Descripción general de la interfaz de la placa de conexión RAK3244 BastWAN®.



RSSI

El indicador RSSI es uno de los parámetros más empleados para medir la calidad de la señal en interiores debido a su facilidad para obtener, no requiere de sincronización ni de arreglos especiales de antenas, entre otras ventajas, aunque esta ventaja se podría traducir en poca precisión. El RSSI se puede utilizar para realizar sistemas de localización en interior y exterior basados en dicho parámetro. Además, este parámetro se puede utilizar mediante diferentes modelos para estimar la distancia entre nodos de una red. A pesar de la facilidad para obtener las mediciones RSSI, el factor determinante para calcular distancias con gran precisión, es la estimación de los parámetros del canal de transmisión, los cuales son determinados por el ambiente del canal y varían de manera significativa, si las pruebas experimentales se realizan en ambientes exteriores o interiores.

Modelo de Sombreado Normal-Logarítmico

Las ondas de radio se propagan cuando una señal inalámbrica se expande a través del aire y la potencia de esta señal podría ser atenuada por los factores de reflexión, deflexión, dispersión, sombreado y difracción (Li, 2009). Así, cualquier parámetro relacionado con la transmisión de datos, como el RSSI, puede ser afectado por estos fenómenos. Dado que la medición RSSI es afectada significativamente por el ambiente de la comunicación del canal, se requiere de un modelo que ayude a compensar las pérdidas durante la comunicación. Para este trabajo se pretende utilizar el modelo de Sombreado Normal-Logarítmico (LNS, por sus siglas en inglés) para estimar la distancia entre un nodo móvil (etiqueta) y un nodo coordinador (ancla) basado en las mediciones de RSSI. Usando este parámetro puede ser estimada la distancia mediante el modelo LNS y la trayectoria perdida (Malajner, 2009). Así el modelo LNS puede ser descrito como en (Cho, 2010):

$$PL(d) = PL_0 + 10\alpha \left(\frac{d}{d_0} \right) + \sigma, \text{ en dBm} \quad (1)$$

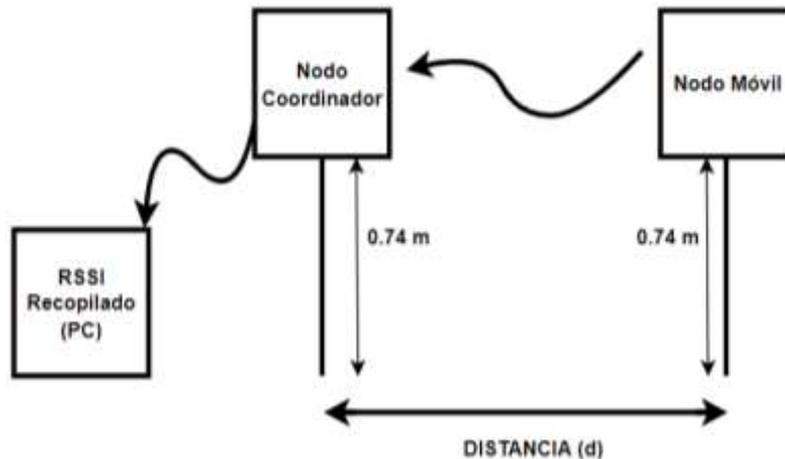
donde $PL(d)$ es la pérdida de trayectoria a una distancia d en metros para exteriores, PL_0 es la pérdida de trayectoria con una distancia de referencia d_0 , PL_0 puede ser obtenido con la ecuación de Friis o con mediciones de campo, α es el exponente de la pérdida de trayectoria que indica la velocidad en la que el parámetro RSSI disminuye con la distancia, d es la distancia entre el ancla y la etiqueta, y σ es la desviación estándar en decibeles. La distancia d_0 es recomendado a un metro (Cotuk, 2013).

IMPLEMENTACION

Con el objetivo de estimar los parámetros del canal de comunicación de los dispositivos LoRa, se propone el diagrama a bloques que se muestra en la Figura 2.

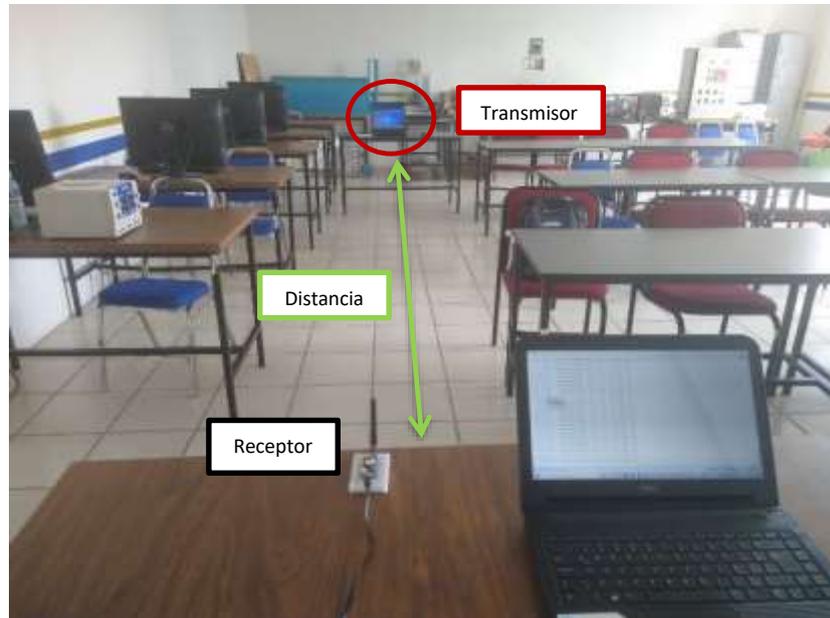
Figura 2.

Sistema propuesto.



El sistema consta de dos partes, las cuales son el transmisor Tx y el receptor Rx LoRa, los cuales corresponden al Nodo coordinador y al Nodo Móvil, respectivamente. El Tx y el Rx se componen de dos placas de desarrollo BastWAN, descritas en el capítulo anterior, configurados a una frecuencia de 915 MHz. Para lograr la evaluación de desempeño de comunicación de las tarjetas BastWAN, en este trabajo se proponen dos ambientes de experimentación. En la primera prueba se realizaron mediciones dentro de un laboratorio de Electrónica de Potencia y una segunda prueba fue realizada en el pasillo de un edificio de dos plantas.

La Figura 3 muestra cómo se configuró el primer experimento antes de recopilar y analizar los datos dentro del laboratorio. Se conectó una computadora portátil a cada transmisor y receptor respectivamente, en el lado del transmisor la computadora portátil únicamente sirve para alimentación; en el lado del receptor la computadora sirve para almacenar y visualizar los datos. Dado que la configuración de las tarjetas se realizó en el IDE de Arduino, en el monitor serial se pueden observar los datos del RSSI, el número de paquetes y la hora de llegada. El procedimiento para la segunda prueba se realizó siguiendo el mismo procedimiento.

Figura 3.*Ubicación de la prueba de campo.*

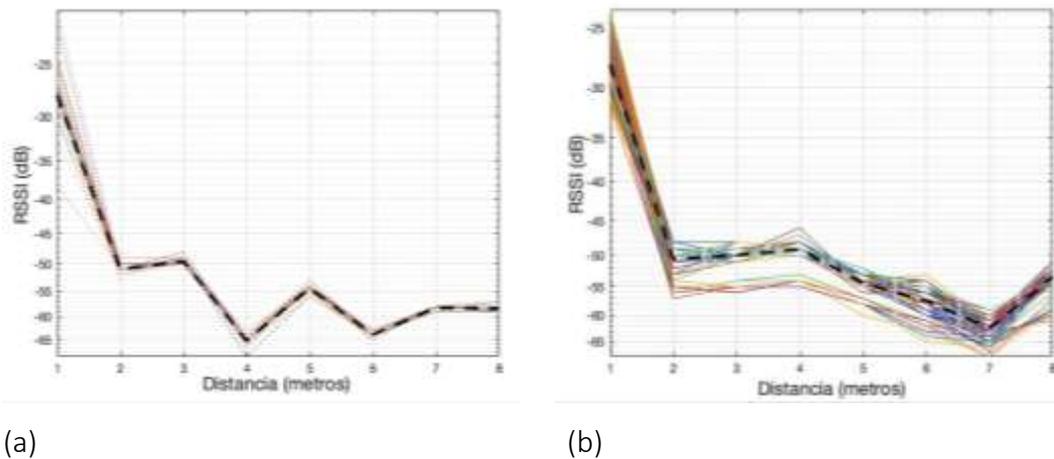
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se ha descrito anteriormente, se propusieron dos etapas experimentales, una en ambiente de interior y la otra en un ambiente semi-interior. Para la primera etapa se realizaron dos propuestas incrementando el número de mediciones. Mientras que para la segunda etapa, se incrementó el rango de distancia para la evaluación de las estimaciones y el desempeño de las placas.

Análisis en Interiores

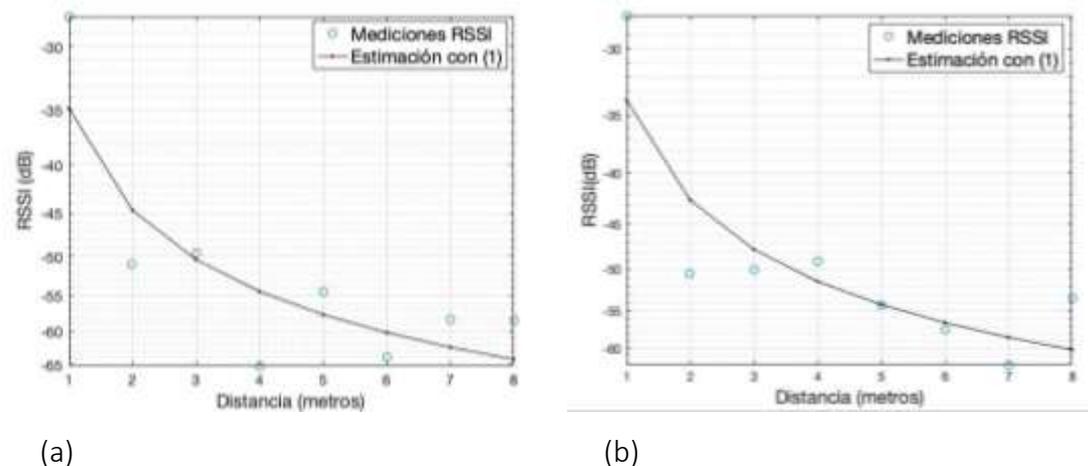
Para la primera prueba propuesta, dentro del laboratorio de Electrónica de Potencia, se realizaron dos etapas para probar la robustez de la comunicación entre tarjetas realizando 30 y 300 mediciones, respectivamente. Esto con el objetivo de observar que, si al aumentar el número de muestras, existe una gran diferencia al estimar el modelo LNS. Estas etapas de las mediciones se muestran en la Figura 4a y Figura 4b. Aquí se puede apreciar las mediciones realizadas desde 1 hasta 8 metros de distancia entre las tarjetas, donde la media de las señales se indica con una línea punteada de un mayor grosor. En estas figuras se puede apreciar un comportamiento logarítmico de las mediciones conforme el transmisor y el receptor se alejan.

Figura 4. Mediciones en interior con a) 30 y b) 300 muestras.



Para realizar la estimación de la medición se utilizó la herramienta “Curve Fitting” de Matlab. Así, tomando como base la media de las mediciones, se aproxima la función descrita en la ecuación (1) y se estiman las constantes α y σ para cada una de las mediciones. Las cuales para propósitos de este trabajo las indicaremos como α_{30} , α_{300} y σ_{30} , σ_{300} , respectivamente.

Figura 5. a) Estimación de modelo LNS en interior con: a) 30 muestras y b) 300 muestras.



La estimación de las mediciones se muestra en las Figuras 5a y 5b. Las ecuaciones resultantes para cada una de las muestras se pueden formular como:

$$PL_{30}(d) = PL_{0_{30}} + 10\alpha_{30} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \sigma_{30}, \text{ en dBm} \quad (2)$$

$$PL_{300}(d) = PL_{0_{300}} + 10\alpha_{300} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \sigma_{300}, \text{ en dBm} \quad (3)$$

donde $PL_{0_{30}} = -27.87$, $PL_{0_{300}} = -28.03$, $\alpha_{30} = -1.413$, $\alpha_{300} = -1.271$ y $\sigma_{30} = -6.985$, $\sigma_{300} = -5.748$ dB, respectivamente. Para la ecuación (2) el error medio cuadrático es de $E_{30} = 6.84$ dB mientras que para la ecuación (3) el error medio cuadrático fue de $E_{300} = 5.34$.

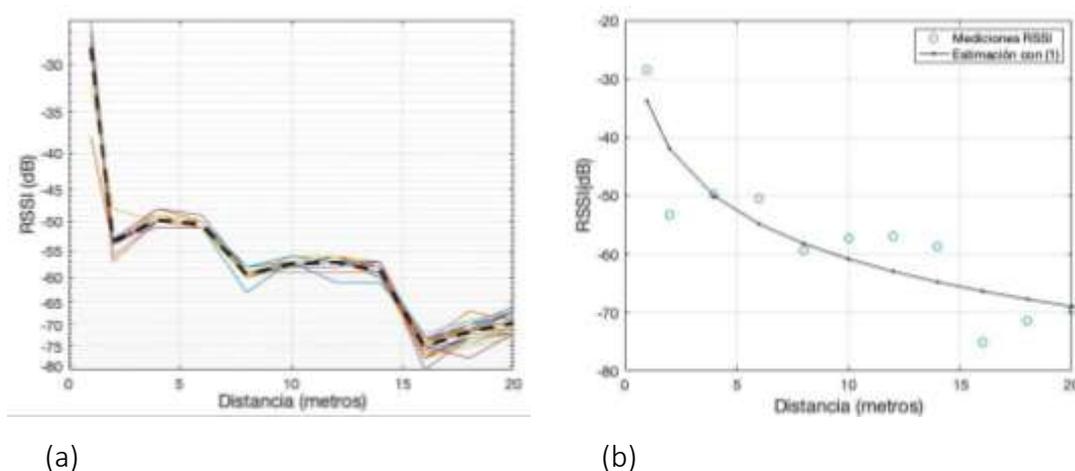
Mediciones Semi-Interiores

Para las mediciones de la segunda prueba se planteó un escenario semi-interior, es decir, debajo del techo de un pasillo, pero sin una de sus paredes laterales. Esta etapa se propuso con la intención de observar la diferencia del modelo estimado con los experimentos anteriores y comparar el error de la estimación. Para este experimento se propuso un rango de 20 metros y solo 24 datos por metro, realizando mediciones cada 2 metros.

En la Figura 6, se observan las mediciones obtenidas y la función calculada a partir de la media de los datos RSSI recabados. En la Figura 6a se muestran las mediciones obtenidas en cada metro recorrido y la media con una línea punteada con un grosor mayor. A pesar de un comportamiento irregular de las mediciones, también se puede apreciar en esta imagen un comportamiento logarítmico de las mediciones. Es decir, una disminución logarítmica de intensidad con el incremento de distancia entre Tx y Rx. La estimación del modelo LNS y la media de las mediciones para esta prueba se aprecian en la Figura 6b. En la aproximación a un metro se observa una diferencia significativa de intensidad con el parámetro RSSI medido. Sin embargo se observa un mejor ajuste de la curva para otras mediciones como las ubicadas en 4, 8 y 20 metros. Las variables obtenidas fueron $PL_{0CI} = -28.46$, $\alpha_{CI} = -1.175$ y $\sigma_{CI} = -5.369$ dB. Obteniendo un error medio cuadrático de 6.268 dB.

Figura 6.

a) Mediciones y b) estimación de modelo LNS en escenario cuasi-interior.



CONCLUSIONES

Las mediciones de RSSI a diferentes distancias lograron ser registradas mediante las placas BastWAN que basan su comunicación en la tecnología LoRa. Esto se logró utilizando un nodo móvil como transmisor y un nodo coordinador como receptor. Los datos obtenidos en los dos experimentos propuestos presentan el mismo comportamiento logarítmico.

Los parámetros para realizar la estimación del modelo LNS y ajustarlo a las mediciones de RSSI obtenidas, se lograron calcular con relativa facilidad mediante la herramienta de ajuste de curvas del Matlab. Para la primera etapa se logró identificar que incrementando las mediciones de 30 a 300, el error medio cuadrático disminuye 1.5 dB en el ajuste de la función. Para el caso del entorno semi-interior, se obtuvo un error de ajuste de 6.268 dB con pocas muestras en relación con la segunda etapa del primer experimento. Basándose en estos resultados, se puede concluir que es factible calcular la distancia entre dos tarjetas BastWAN que utilizan tecnología LoRa en zonas cerradas o parcialmente cerradas.

Como trabajo a futuro, se pretende calcular la distancia automáticamente entre transmisor y receptor en un entorno cerrado colocando el transmisor en un objeto móvil y calcular la posición de este en tiempo real.

Contribución de Autores

Análisis de propuesta formal: J.U. Muñoz-Minjares, J. Flores-Troncoso.

Conceptualización: Re. Olivera-Reyna.

Resultados: Re. Olivera-Reyna, Ro. Olivera-Reyna.

Validación: J.U. Muñoz-Minjares, J. Flores-Troncoso.

Redacción general: Re. Olivera Reyna.

Formato de revista: J.U. Muñoz-Minjares, O. Vite-Chávez

Revisiones y correcciones generales: J.U. Muñoz-Minjares, O. Vite-Chávez.

LISTA DE REFERENCIAS

Bianco, G. M., Giuliano, R., Marrocco, G., Mazzenga, F., & Mejia-Aguilar, A. (2020). LoRa system for search and rescue: path-loss models and procedures in mountain scenarios. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(3), 1985-1999.

Bertoldo, S., Paredes, M., Carosso, L., Allegretti, M., & Savi, P. (2019, March). Empirical indoor propagation models for LoRa radio link in an office environment. In *2019*

- 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)* (pp. 1-5). IEEE.
- Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., & Kang, C. G. (2010). *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB*. John Wiley & Sons.
- Cotuk, H., Bicaçci, K., Tavli, B., & Uzun, E. (2013). The impact of transmission power control strategies on lifetime of wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Computers*, 63(11), 2866-2879.
- Electronic Cats. (2020). 2022-11-16. https://electroniccats.com/?s=BastWAN&post_type=product&product_cat=
- Goldoni, E., Prando, L., Vizziello, A., Savazzi, P., & Gamba, P. (2019). Experimental data set analysis of RSSI-based indoor and outdoor localization in LoRa networks. *Internet Technology Letters*, 2(1), e75.
- Hosseinzadeh, S., Larijani, H., Curtis, K., Wixted, A., & Amini, A. (2017, July). Empirical propagation performance evaluation of LoRa for indoor environment. In *2017 IEEE 15th international conference on industrial informatics (INDIN)* (pp. 26-31). IEEE.
- Kim, K., Li, S., Heydariaan, M., Smaoui, N., Gnawali, O., Suh, W., & Kim, J. I. (2021). Feasibility of LoRa for smart home indoor localization. *Applied Sciences*, 11(1), 415.
- Kjendal, D. (2021). LoRa-Alliance regional parameters overview. *Journal of ICT Standardization*, 35-46.
- Li, H., Zhao, L., Darr, M. J., & Ling, P. (2009). Modeling wireless signal transmission performance path loss for ZigBee communication protocol in residential houses. In *2009 Reno, Nevada, June 21-June 24, 2009* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Malajner, M., Benkic, K., Planinsic, P., & Cucej, Z. (2009, June). The accuracy of propagation models for distance measurement between WSN nodes. In *2009 16th International Conference on Systems, Signals and Image Processing* (pp. 1-4). IEEE.
- Mohammed, S. L. (2016). Distance estimation based on RSSI and Log-Normal shadowing models for ZigBee wireless sensor network. *Eng. Technol. J*, 34(15), 2950-2959.
- Oguejiofor, O., Okorogu, V., Adewale, A., & Osuesu, B. (2013). Outdoor localization system using RSSI measurement of wireless sensor network. *International journal*

of innovative technology and exploring engineering, 2(2), 1-6.

Rappaport, T. (2002). *Wireless communications: Principles and Practice* (second edition). Prentice Hall.

Simka, M., & Polak, L. (2022). On the RSSI-based Indoor Localization employing LoRa in the 2.4 GHz ISM Band. *Radioengineering, 31(1)*, 135-143.

Vara, N., Poletto, G. A., Cáceres, M., & Busso, A. J. (2015). Cálculo de distancia entre los nodos de una Red Inalámbrica Zigbee en función del parámetro RSSI. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica, 2*, 8-13.

Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K. (2019). A survey of indoor localization systems and technologies *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(3)*, 2568-2599.

Zhou, Q., Zheng, K., Hou, L., Xing, J., & Xu, R. (2019). Design and implementation of open LoRa for IoT. *Ieee Access, 7*, 100649-100657.