



Análisis de comunicaciones punto a punto con simulaciones open-source de LoRa

Analysis of point-to-point communications with open-source LoRa simulations

Elvis Bonilla Cadena

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

elvis.bonilla@epn.edu.ec

ORCID: 0000-0002-1508-6252

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.10.21.003>

Recibido: Junio 06, 2022

Aceptado: Agosto 05, 2022

Resumen: Con las nuevas tendencias en el IoT surgen cada vez más problemáticas, como la necesidad usar tecnologías de largo alcance y bajo consumo de potencia para resolver los requerimientos de movilidad y acceso a lugares remotos, en respuesta surgen tecnologías como LoRa y LoRaWAN, que permiten implementaciones a bajas velocidades con un gran alcance y muy bajo consumo de energía, ya que basa su técnica de transmisión en CSS (*Chirp Spread Spectrum*), y, tanto su capa física como modos de funcionamiento se han adecuados para enviar cortas cantidades de información en periodos cortos de tiempo, manteniendo así el nodo terminal en estado de reposo mientras no se está realizando la transmisión de datos, esto con el fin de reducir el consumo energético; de esta manera cobran gran importancia las simulaciones de las tecnologías LoRa, tanto para la investigación como para la fase de diseño previa a la implementación, mucho más cuando estas se optimizan para un bajo consumo computacional así como se dará a conocer en el presente trabajo.

Palabras clave: *IoT, Largo Alcance, Bajo Consumo, LoRa, LoRaWAN, Optimizar.*

Abstract: With the new trends in IoT, more and more issues arise, such as the need to use long-range technologies and low power consumption to meet the requirements of mobility and access to remote locations, in response arise technologies such as LoRa and LoRaWAN, which allow implementations at low speeds with a long range and very low power consumption, These technologies are based on CSS (*Chirp Spread Spectrum*) transmission techniques, and both their physical layer and operating modes have been adapted to send short amounts of information in short periods of time, thus keeping the terminal node in an idle state while the data transmission is not being carried out, in order to reduce energy consumption; Thus, simulations of LoRa technologies are of great importance, both for research and for the design phase prior to implementation, especially when they are optimized for low computational consumption, as will be shown in this paper.

Keywords: *IoT, Long-Range, Low Power, LoRa, LoRaWAN, Optimized.*

1. Introducción

Con las nuevas tendencias en el IoT (*Internet of Things*, por sus siglas en inglés), el uso de tecnologías de largo alcance y bajo consumo de potencia para resolver los requerimientos de movilidad y acceso a lugares remotos, se vuelve indispensable; ante esto el uso de Tecnologías con capa física de LoRa (*Long Range*, por sus siglas en inglés) en redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*, por sus siglas en inglés) surge como una solución práctica y relativamente económica que permite establecer comunicaciones de baja velocidad a grandes distancias con un muy bajo consumo de potencia. De esta forma tanto la industria como la academia dedican sus esfuerzos a la investigación para explotar al máximo el rendimiento y la escalabilidad de las redes que usan esta técnica de capa física basada en CSS (*Chirp Spread Spectrum*, por sus siglas en inglés) [1].

Ante la complejidad para el análisis del rendimiento físico de la red que se propone más adelante, se ha optado por la simulación como una solución práctica para los fines pertinentes a este trabajo. En consecuencia, se usarán variantes de módulos open-source de diferentes softwares para la simulación, que varios autores han subido a la red con propósito de ayudar a futuras investigaciones [3], [4], [5], [6], además se presenta los resultados tras realizar simulaciones con carga computacional razonable, obtenidas tras el uso de algoritmos de reducción de la carga computacional, y se dará uso a herramientas informáticas que ayuden a visualizar el funcionamiento tanto del *gateway* como de un sensor.

Finalmente se conseguirá visibilizar el comportamiento de la transmisión de datos usando técnicas LoRa y su rendimiento, tanto para ocupación del ancho de banda como para el análisis de errores en recepción, además se ha esquematizado el posible rango de funcionamiento que tendría una red punto a punto en ubicaciones geográficas favorables, mismos resultados que, tras la variación de parámetros y optimización de recursos computacionales para la ejecución de las simulaciones en computadores personales de prestaciones medias, se pondrán en evidencia en el presente trabajo.

2. LoRa y LoRaWAN

2.1. LoRa

Es una técnica de capa física utilizada para crear canales de comunicación de largo alcance para topologías WAN. Sus principales características son la operación a grandes distancias, un bajo consumo de potencia y la operación en bandas ISM. Análogamente utiliza un tipo de modulación llamado LoRa, este está basado en CSS.

2.1.1 CSS

La modulación CSS o *Chirp Spread Spectrum* es una técnica de modulación de espectro ensanchado que utiliza pulsos “*chirp*” modulados en frecuencia lineal de banda ancha para codificar información [1], de manera que la señal se transmite en ráfagas, saltando entre las frecuencias de una secuencia pseudoaleatoria. Un *chirp* es un tono en el cual la frecuencia se incrementa (*up-chirp*) o decrecienta (*down-chirp*) con el tiempo. Su ancho de banda es equivalente al ancho de banda espectral de la señal [1].

Para la operación se presenta un rango de frecuencias según la región, especificado en la Tabla 1 en donde se regula la no operación fuera de los rangos definidos.

Tabla 1. Rango de frecuencias de operación de LoRa para diferentes regiones.

Europa	Norteamérica	China	Japón	India
863-870 MHz	902-928 MHz	470-510 MHz	920-925 MHz	865-867 MHz

Fuente: Basado en [1].

Además de esto se tiene que el SF (*Spreading Factor*, por sus siglas en inglés) puede tomar valores entre 7 y 12, según la aplicación a usarse, las distancias requeridas y la velocidad de transmisión; como ejemplo se toma las especificaciones instauradas para Europa como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Configuraciones de transmisión usando LoRa.

Técnica	SF	AB (kHz)	Vtx(bps)
LoRa	12	125	250

11	125	440
10	125	980
9	125	1760
8	125	3125
7	125	5470
7	250	11000

Fuente: Basado en [1].

2.1.2 Spreading Factor

Define el número de bits usados para codificar un símbolo, que es la relación entre la tasa de símbolos y la tasa de *chirp* [1].

2.2. LoRaWAN

Es un protocolo MAC open source que consta de tres elementos importantes:

1. **Nodos:** son los encargados de la transmisión de datos, dependiendo de la aplicación y el número de datos emitidos puede variar el tiempo de uso de la batería [3].
2. **Gateway:** conectan a los nodos que se encuentran en el rango de cobertura de la propia red troncal [3].
3. **Red troncal:** son los enlaces establecidos entre los nodos y el Gateway.

En comunicaciones LoRaWAN se sigue un modelo simple en donde los sensores (nodos terminales) se conecta a una puerta (*Gateway*), que tiene una gran cantidad de conexiones disponibles usando tecnologías LoRa, y este último le da acceso a internet a través de la comunicación con servidores mediante protocolos con un rendimiento optimizado para internet [3], así como se muestra en la Figura 1.

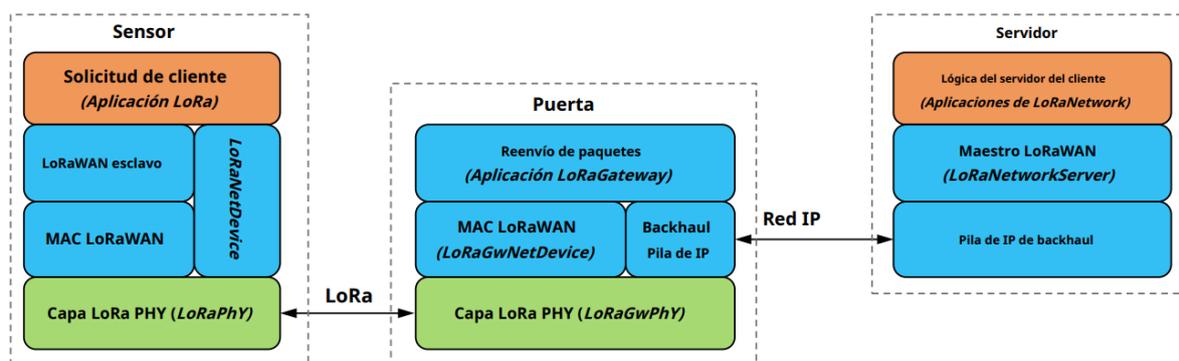


Figura 1. Modelo de funcionamiento de una red LoRaWAN. Fuente: Basado en [2].

Dependiendo de las aplicaciones a implementarse y de sus requerimientos para una correcta operación se han definido tres clases diferentes para la configuración de los nodos. [1]

- **Clase A:** Es la configuración con mayor vida de uso de la batería ya que el nodo se encuentra en estado de hibernación la mayoría del tiempo y despierta únicamente en ciertas ocasiones para enviar paquetes de datos pequeños.
- **Clase B:** En esta configuración los nodos sensores se encienden tanto para *Up-link* (clase A) y *Down-link*.
- **Clase C:** Es la configuración con menos vida de uso ya que los nodos sensores siempre mantienen abierto el canal de comunicación.

2.3. Seguridad

LoRa utiliza dos capas de seguridad, la primera se encarga de asegurar la capa física y la siguiente se encarga de dar seguridad a la capa aplicación. Para esta última se utiliza el cifrado AES (*Advance Encryption Standard*) con intercambio de claves, utilizando un identificador IEEE EUI64 [1].

Para LoRaWAN se han definido 3 claves de seguridad de 128 bits, las mismas tienen las siguientes características:

- **Clave de aplicación AppKey:** Se utiliza en el proceso de activación cuando el dispositivo se une a la red, esta es conocida únicamente por el dispositivo y por la aplicación [1].

Tras el proceso de activación se generan las dos llaves siguientes:

- **Clave de sesión de aplicación AppSKey:** Es usada para encriptar y desencriptar la carga útil.
- **Clave de sesión de red NwkSKey:** Es usada para la interacción entre el nodo y el servidor de red, se encarga de verificar la validez de los mensajes.

Si en el proceso de activación se usa ABP (*Activation by Personalization*), las claves serán las mismas hasta que sean cambiadas por el usuario, mientras que si se usa OTAA (*Over-the-air Activation*), serán regeneradas en cada activación [1].

3. Simuladores

3.1. MATLAB

Entorno y lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y *arrays* directamente [7]. Además, cuenta con gran variedad de herramientas llamadas Toolbox o Add-On que facilitan el proceso de programación y simulación al agregar funciones estables y de uso intuitivo.

Para el presente trabajo se han usado varias de estas funciones, tanto las que se incluyen por defecto como “*plot*” como las funciones de paso por canales de comunicaciones presentes en el Communications Toolbox.

3.2. Radio Mobile

Software dedicado a la simulación de radio enlaces, permite hacer varios tipos de análisis ya que parametriza todas las variables pertinentes para un canal de comunicación inalámbrico [8]. Es de libre acceso y permite la simulación tanto en 2D como en 3D del radio enlace.

4. Optimización de trabajos previos

Para la optimización de los trabajos revisados [3], [4], [5], se decidió seccionar el array de entrada original y trabajar sobre las diferentes secciones para unir los resultados en un array de salida final, con esto se evitó el problema de desbordamiento de memoria detectado en las versiones preliminares.

Además se utilizó la facilidad de MATLAB para trabajar con operaciones matriciales (+, -, .*, ./, .^), de esta forma se cambiaron los lazos reiterativos (bucle for) por operaciones entre matrices, reduciendo así de gran manera la carga computacional que estos exigían al momento de la ejecución.

Tras las operaciones mencionadas anteriormente se logró correr todas y cada una de las simulaciones presentes en la siguiente sección sin ningún problema, haciendo uso de un computador personal con prestaciones medias.

5. Simulaciones

Las simulaciones tanto de capa física como del protocolo LoRa ayudan a visibilizar resultados bastante similares a los obtenidos por los diferentes autores tras la implementación [3], [4], [5], de esta manera se presenta una compilación de los resultados obtenidos.

5.1. Spectrogramas a distintas velocidades

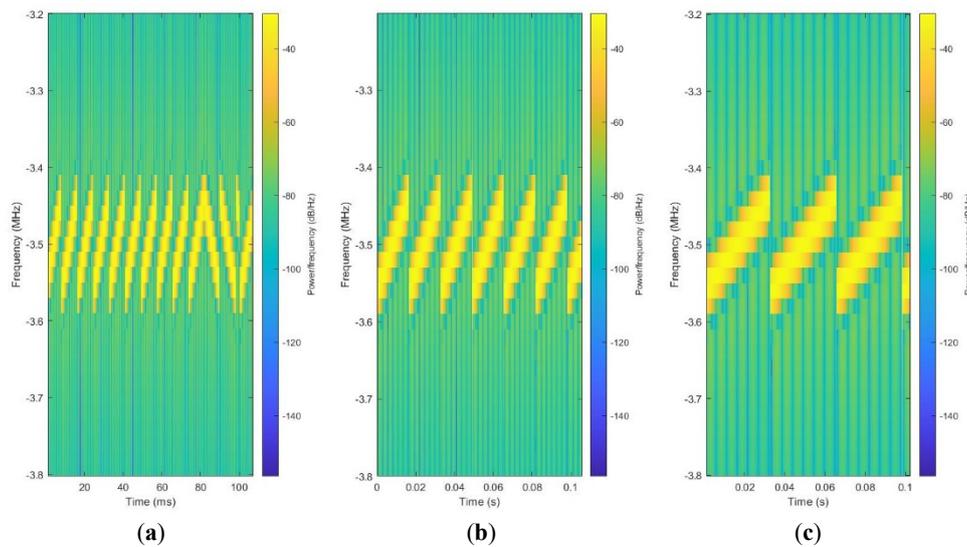


Figura 2. Comparación de transmisiones LoRa a diferentes velocidades en un mismo intervalo de tiempo: (a) Factor de *Spreading* de 10; (b) Factor de *Spreading* de 11; (c) Factor de *Spreading* de 12.

Como se presentó en la Tabla 2, se han estandarizado diferentes velocidades alcanzables con cada *spreading* factor (SF) de esta manera se usó el rango de operación europeo tomando una frecuencia central de 865 MHz y un ancho de banda de 125 kHz, además se usó la recomendación de varios autores para definir una potencia de transmisión de 14 dBm [6] y un SNR estático de 20 dB para la primera simulación.

Con este conjunto de configuraciones se realizó la simulación obteniendo como resultado la comparación de los espectrogramas presentes en la Figura 2 con la que se observa claramente la forma diagonalizada del SF, que al tener niveles aceptables de SNR para el funcionamiento en espectro ensanchado realiza transmisiones correctas para las velocidades de 980 bps, 440 bps y 250 bps correspondientes a los factores de *spreading* de 10, 11 y 12 respectivamente, pese a que se han obtenido resultados similares para mayores velocidades haciendo uso de SFs más bajos se muestra únicamente las tres simulaciones ya que cumplen a cabalidad con los fines pertinentes en busca de una mayor vida útil.

5.2. Simulación de envío de mensaje y ocupación del ancho de banda

Para las pruebas de transmisión se comprueba si ha sido efectivo el envío de mensajes demodulando la señal recibida y mostrando por pantalla el mensaje obtenido tal y como se muestra en la Figura 3.

```

Ingrese el mensaje: '{"S1":true,"S2":false,"SALuz":240,"SAHume":125}'
1. 250 bps \n2. 440 bps \n3. 980 bps \n4. 1760 bps \n5. 3125 bps \n6. 5470 bps
ingrese la velocidad: 3
Transmit Power = 14 dBm
Message Received = '{"S1":true,"S2":false,"SALuz":240,"SAHume":125}'
:>>

```

Figura 3. Transmisión y recepción de un mensaje típico de un sistema LoRaWAN.

Además de que, se logra una excelente ocupación del ancho de banda debido al uso de CSS como se puede visualizar en la Figura 4, ya que se ocupa el 99% del ancho de banda y al ser una modulación en espectro ensanchado se busca ocupar el mayor espacio posible del mismo.

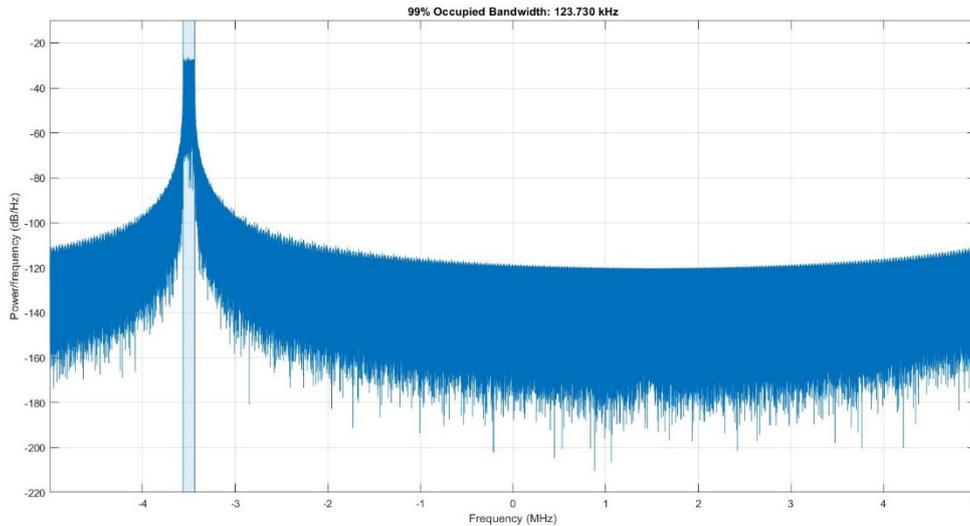


Figura 4. Uso de ancho de banda para transmisión con SF=10.

Tras los resultados alcanzados anteriormente surge el inconveniente de que un canal real no presenta niveles de SNR estrictamente definidos además de que el análisis en una transmisión de LoRa se puede realizar en paquetes, en símbolos y en bits transmitidos.

5.3. Simulaciones para diferentes canales a diferentes niveles de ruido

Se procede a realizar la simulación para el canal con diferentes niveles de SNR y E_b/N_0 de esta forma se logra una apreciación más real del comportamiento tanto de la capa física de LoRaWAN como del canal de comunicaciones a usarse.

Para reducir la carga de procesamiento se ha realizado cambios en los programas originales dejando un total de 10 paquetes transmitidos, cada uno conformado por 10 símbolos, con la finalidad de no sobrepasar las capacidades computacionales con las que se cuenta, además se mantiene la consideración de los autores de usar los cálculos para un BER (*Bit Error Rate*), SER (*Symbol Error Rate*) y PER (*Packet Error Rate*) teóricos y compararlos en canales AWGN, Rayleigh y nCOH AWGN, tanto teóricos como simulados, obteniendo los siguientes resultados.

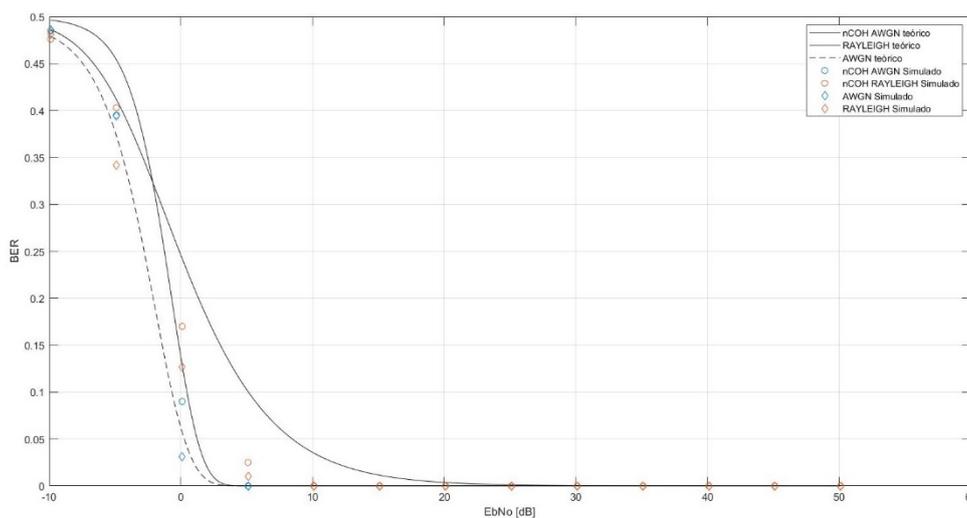


Figura 5. Comparación del BER.

En la Figura 5 se puede observar que el mejor rendimiento es obtenido con un Canal AWGN simulado que a la vez es muy cercano al AWGN teórico ya que tiene un BER por debajo de los 0.05 con niveles de E_b/N_0 muy

cercanos al cero, esto quiere decir que, es un sistema de muy buen rendimiento inclusive en condiciones de mucho ruido. Este análisis se realizó a partir de muestras tomadas bit a bit para la comparación entre emisión y recepción.

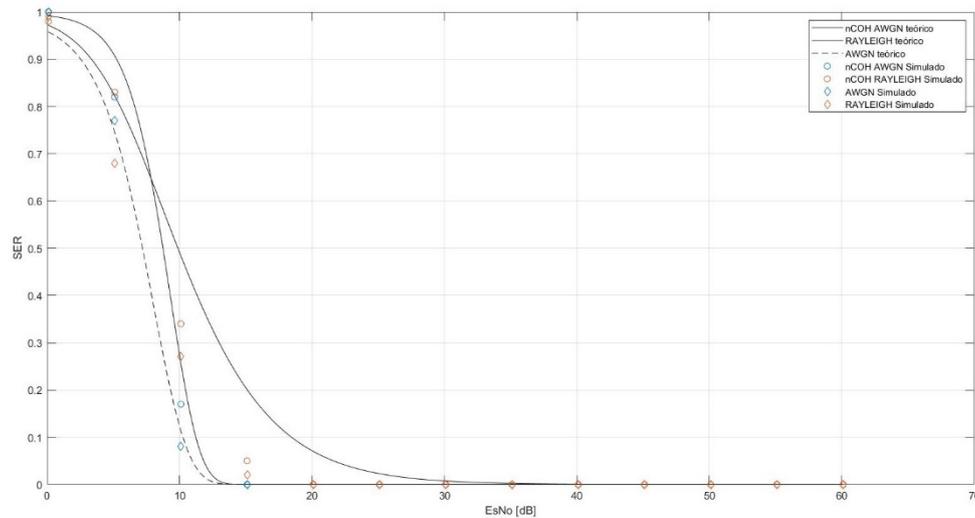


Figura 6. Comparación del SER.

Para el siguiente análisis presente en la Figura 6 se tomó las muestras por símbolo, es decir un bit errada hecha a perder todo el símbolo, de esta manera se observa un declive en el rendimiento y mantiene como mejor opción al AWGN simulado, sin embargo, pasado el valor 10 dB de E_b/N_0 cada canal simulado empieza a alcanzar valores aceptables de SER al punto que, al llegar a un valor de 20, todos a excepción del canal Rayleigh han obtenido su máximo rendimiento.

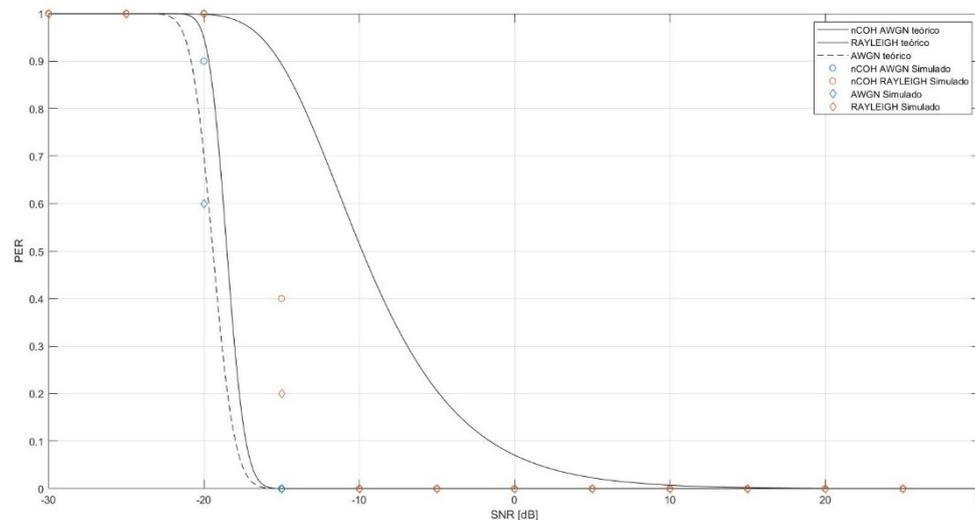


Figura 7. Comparación del PER.

Por último, se procede a realizar un análisis del PER, donde cada bit errada hecha a perder todo el paquete compuesto por símbolos, y se vuelve a determinar que la mejor opción es el canal AWGN simulado, logrando transmisiones óptimas a partir de los -16 dB de SNR aproximadamente, tal y como se puede observar en la Figura 7.

5.4. Simulación de enlace punto a punto en Radio Mobile

Tras obtener los resultados esperados en las diversas simulaciones tanto de la capa física como del protocolo, y el canal se trata de simular un enlace entre un *gateway* ubicado en la facultad de Sistemas a 50 m del suelo aproximadamente y un sensor ubicado en el estacionamiento de la facultad de eléctrica y electrónica de la Escuela

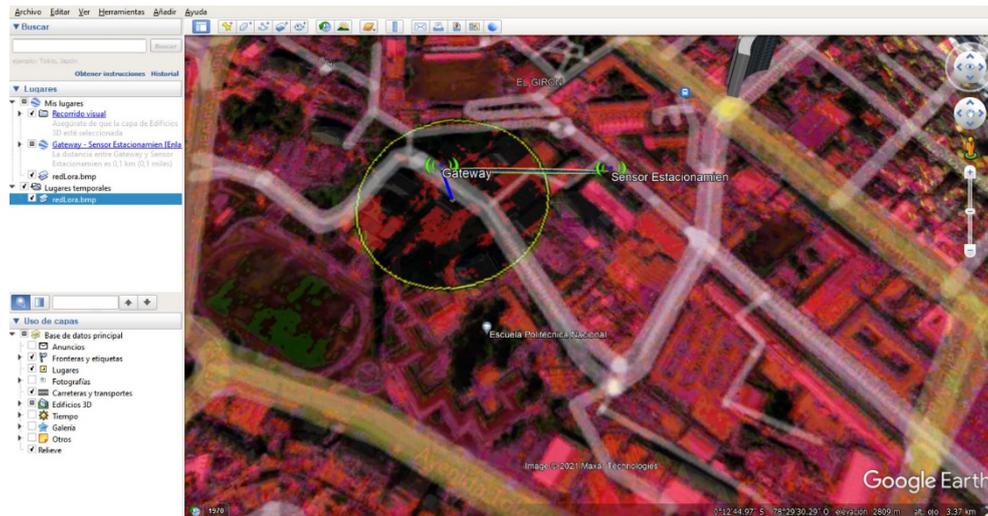


Figura 9. Simulación trasladada a *Google Earth*.

6. Conclusiones

En este trabajo se han presentado los resultados obtenidos tras la edición de varios módulos *open source* de Matlab configurados de tal manera que un computador de especificaciones medias pueda realizar cada simulación sin ningún inconveniente, y en las mismas se ha evidenciado que LoRaWAN pese a encontrarse aún en etapas de desarrollo e investigación presenta soluciones IoT bastante robustas en conexión punto a punto, llegando a mostrar un gran alcance con velocidades de transmisión de datos bajas y configurables a través de la configuración del *spreading* factor, dándonos simulaciones más que aceptables en cada prueba realizada, ya sea esta con transmisiones semejantes a la realidad o con datos aleatorios.

Se ha demostrado a través de las simulaciones que para un modelo de canal AWGN se consiguen condiciones más que propicias para la transmisión de datos usando tecnologías LoRa ya que no requiere altos niveles de SNR en el análisis de transmisión más complejo que se realizó (PER) funcionando de manera óptima a partir de los -10 dB cumpliendo así con las condiciones que establece el uso de espectro ensanchado.

Por último se realizó la simulación haciendo uso de la herramienta Radio Mobile con la que se evidenció el gran alcance que tiene tanto los sensores LoRa como el *gateway* y que pese a realizar una simulación cuasi ideal al no tener obstrucciones en el rango de vista entre ambos también se observó que las pérdidas que se generan por la presencia de objetos intermedios no lograrían un decaimiento de la señal inferior al tope de sensibilidad de -120 dBm si se mantiene la distancia simulada entre el *gateway* y el sensor.

7. Referencias

- [1] Andreu Dólera, A. (2019). *Modelado de redes LoRaWAN aplicadas a la conservación preventiva de patrimonio cultural* [Tesis de Maestría]. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/127816>
- [2] Reynders, B., Qing, W., Pollin, S. (2018). *A LoRaWAN module for ns-3: implementation and evaluation*. 10th Workshop on ns-3. Surathkal, India. <https://doi.org/10.1145/3199902.3199913>
- [3] Fialho, V., Azevedo, F. (2018). Wireless Communication Based on Chirp Signals for LoRa IoT Devices. *I-ETC : ISEL Academic Journal of Electronics Telecommunications and Computers*, 4 (1), 1–5. <http://dx.doi.org/10.34629/ipl.isel.i-ETC.51>
- [4] Croce, D., Gucciardo, M., Mangione, S., Santaromita, G., Tinnirello, I. (2018). Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-Level Performance. *IEEE Communications Letter*, 2 (4), 796-799. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2797057>
- [5] Al Homssi, B., Dakic, K., Maselli, S., Wolf, H., Kandeepan, S., Al-Hourani, A. (2021). IoT Network Design Using Open-Source LoRa Coverage Emulator. *IEEE Access*, 9, 53636–53646. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3070976>

- [6] LoRa. (2022). *Simulation of Network Coverage*. <https://lora.vsb.cz/index.php/simulation-of-network-coverage/>
- [7] MATLAB. (2022). *MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico*. <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [8] VE2DBE. (2022). *Radio Mobile*. <https://www.ve2dbe.com/english1.html>