

Estudio de Cobertura

Tarea 2

Integrantes: Leslie Cárdenas
Nicolás Ruminot
Profesor: José González
Fecha de realización: 9 de julio de 2023
Fecha de entrega: 9 de julio de 2023
Santiago de Chile

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
2. Especificaciones técnicas	1
2.1. Sigfox	1
2.2. LoRaWAN	3
3. Estado del arte	5
3.1. Sigfox	6
3.2. LoRaWAN	7
4. Simulación de radio-enlace	7
4.1. Cálculo teórico	7
4.2. Simulación de Radio-Enlace	8
5. Discusión y conclusiones	13
Referencias	14

Índice de Figuras

1. Estructura del paquete ascendente	2
2. Estructura del paquete descendente	2
3. Topología de Sigfox	3
4. Estructura tramas físicas de mensajes ascendentes y descendentes.	4
5. Estructura trama MAC.	5
6. Topología completa de LoRaWAN.	5
7. Información numérica y visual entregada por RadioMobile para el enlace Sigfox.	9
8. Mapa de calor entregado por RadioMobile para enlace Sigfox.	10
9. Información numérica y visual entregada por RadioMobile para enlace LoRaWAN.	11
10. Mapa de calor entregado por RadioMobile para enlace LoRaWAN.	12
11. Visualización del enlace en Google Earth.	12
12. Zoom del edificio en la LOS.	13

Índice de Tablas

1. Características principales del radio-enlace para la tecnología Sigfox	1
2. Características principales del radio-enlace para la tecnología LoRaWAN.	3
3. Valores usados en el modelo de Okumura-Hata	8
4. Resultados de radio-enlace usando Sigfox	8
5. Resultados de radio-enlace usando LoraWAN	9

1. Introducción

En este trabajo se desarrolla el estudio de dos tecnologías aplicables al caso expuesto en la entrega la Tarea 1. En esta se plantea un sistema de monitoreo de la electricidad del Hospital San Borja por parte de SENAPRED, ya que ante una eventual catástrofe es necesario asegurarse de que este y otros servicios críticos se encuentran funcionales.

Para lo anterior, se propone un sistema autónomo de largo alcance y alta redundancia, el cual puede funcionar con variados protocolos de comunicación. Es por esto que en el desarrollo de este informe se ahonda en las características de dos protocolos: SigFox y LoRaWAN, con la finalidad de determinar cual es más factible de implementar. El resto del informe se reparte como sigue: en la sección 2 destaca las tecnologías a estudiar especificando sus características técnicas, la sección 3 entrega el estado del arte sobre el desempeño de los protocolos. La sección 4 ofrece una simulación de radio-enlace detallando cálculos teóricos. Por último, la sección 5 se expone la discusión y conclusiones.

2. Especificaciones técnicas

2.1. Sigfox

Corresponde a un servicio de comunicación IoT diseñado por una compañía francesa, para aplicaciones donde se necesita una baja tasa de transmisión y un bajo consumo.

- **Radio-enlace:** Según la página oficial de Sigfox [1], esta tecnología funciona en la banda ISM, lo que en Chile y parte de latinoamérica, corresponde a los 921 MHz. Los mensajes son modulados usando D-BPSK [2], para luego transmitirlos en uno de los 15 canales de un ancho de banda de 100 Hz a una velocidad máxima de 600 bps. Su mayor limitante es la cantidad de mensajes diarios, la cual es de 140 de 12 máximo bytes cada uno, es decir, aproximadamente uno cada 10 minutos. También se puede enviar mensajes de 4 y 8 bytes.

Por otra parte, cuenta con un rango de 10 km en zonas urbanas y 40 km en zonas rurales [3], estableciendo un radio enlace half-duplex, es decir que existe una comunicación bidireccional en un sentido a la vez. Además, el mecanismo de transmisión de este servicio es redundante, lo que se traduce en que el mensaje se transmite 3 veces en diferentes canales y tiempos.

Lo anterior, se puede resumir en la Tabla 1

Tabla 1: Características principales del radio-enlace para la tecnología Sigfox

Tecnología	Modulación	Banda freq.	Alcance	Velocidad	Modo
Sigfox	D-BPSK	921 MHz	10km (urbano)	600 kbps	Half-Duplex

- **Formato del paquete:** El tamaño y la estructura del paquete varían dependiendo si este es de enlace ascendente o descendente. El primero tiene una longitud total máxima de 224 bits y el segundo tiene una longitud fija también de 224 bits.

EL preámbulo es una secuencia predefinida de 19 bits, seguida de FT, la cual indica en 13 bits que clase de mensaje se está enviando. Luego están LI que indica el largo del mensaje de autenticación MAUTH, BF que indica que procedimiento se realiza para mandar el mensaje (U o B, es decir, uni o bidireccional) y REP es un bit con un valor 0b0.

La secuencia de números de 12 bits es un identificador que es registrado y guardado por Sigfox Cloud. Device ID por su parte, es un identificador único de 32 bits para cada dispositivo en la red de Sigfox. Finalmente están el *payload* que es el contenido que se quiere enviar (4, 8 o 12 bytes), MAUTH que como se mencionaba antes son bits de autenticación, y CRC que son 16 bits asignados para hacer una verificación de redundancia cíclica.

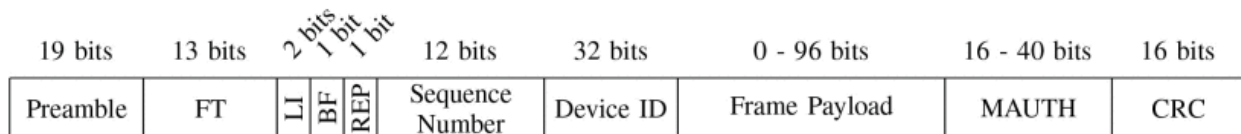


Figura 1: Estructura del paquete ascendente

Varios de los ítems anteriores son comunes con el paquete descendente (Figura 2), pero con variaciones en su tamaño. El preámbulo es de 91 bits, FT mantiene su tamaño de 13 bits, ECC es el código de corrección de errores de 32 bits. Luego, el contenido del mensaje descendente está limitado exclusivamente a 8 bytes, seguido de un MAUTH de 16 bits y cerrando con un CRC de 8 bits [4].

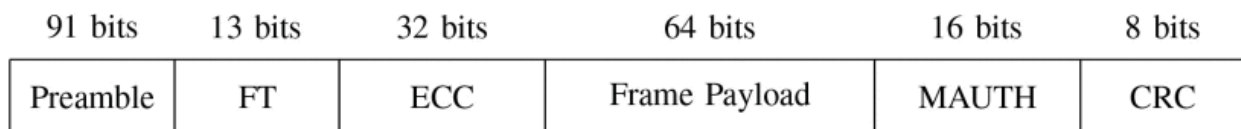


Figura 2: Estructura del paquete descendente

- **Comunicación con el servidor:** Siguiendo el esquema de la Figura 3, se tiene que una vez los datos son detectados por los dispositivos, estos se envían mediante antenas a las estaciones base de Sigfox que se encuentran en diferentes puntos del mundo. Luego, se entregan los datos relevantes a los servidores *back-end* (Sigfox Cloud), a través del *backhaul* el cual usa conectividad DSL, 3G/4G o satelital, dependiendo de la disponibilidad y en orden de prioridad. Estos servidores procesan los mensajes, pues, por ejemplo, el mismo mensaje podría llegar replicado varias veces y es tarea de estos el almacenar solo uno. Los servidores de la red central también monitorean el estado de la red y administran las estaciones base globalmente.

La red está capacitada para almacenar los mensajes ya sea como metadatos (para crear servidores) o de forma que estos sean accesibles a los clientes mediante la interfaz web y la API de Sigfox[5].

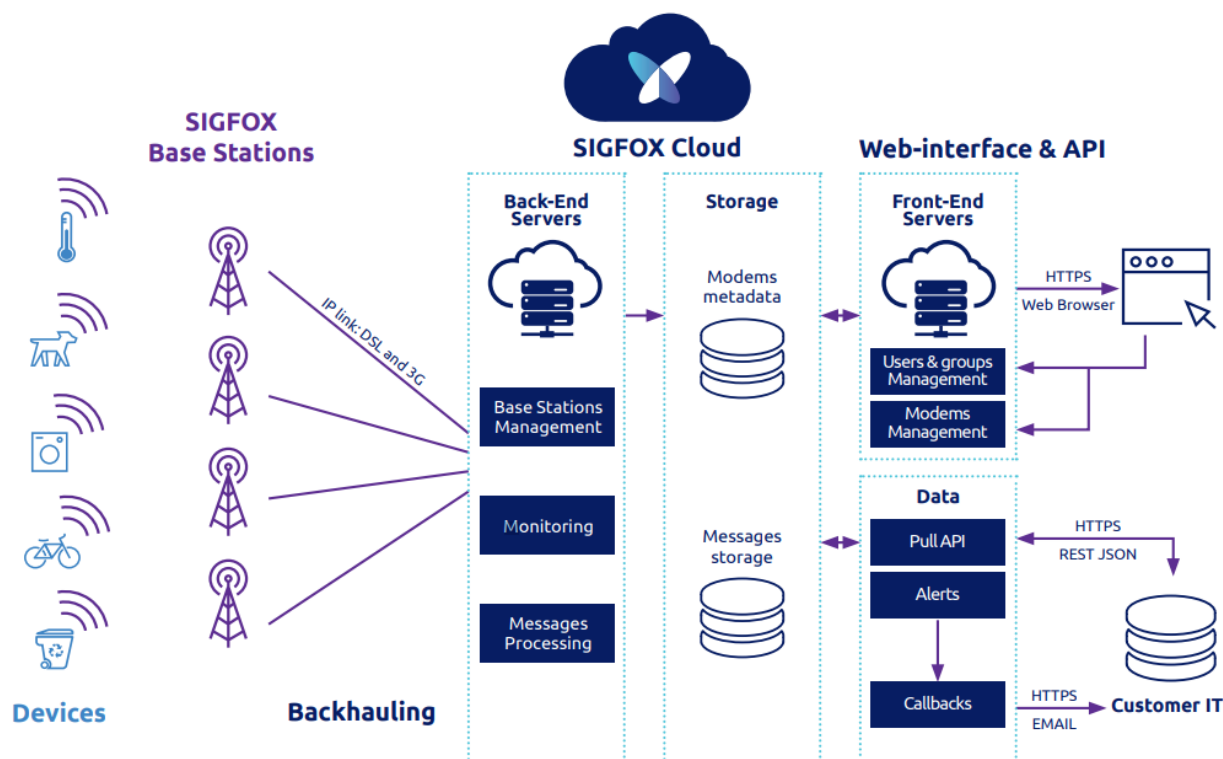


Figura 3: Topología de Sigfox

2.2. LoRaWAN

- **Radio-enlace:** En América Latina, LoRaWAN opera en dos bandas de frecuencia: 915 MHz y 868 MHz. Cada banda tiene un ancho de banda de 125 kHz y 8 canales. Además, los canales del 3 al 7 de la banda de 915 MHz tienen un ancho de banda de 500 kHz. La velocidad máxima de transmisión es de 50 kbps. LoRaWAN utiliza la técnica de modulación *chirp spread spectrum* (CSS), con un factor de propagación (FS) que varía según el ancho de banda utilizado. El radio enlace es *half-duplex*, lo que significa que la comunicación solo puede ser bidireccional en una dirección a la vez. En resumen, el radio enlace de LoRaWAN en América Latina se caracteriza por su bajo consumo de energía, su larga distancia de transmisión y su capacidad para funcionar en entornos urbanos y rurales. Se puede ver un resumen de las características más importantes del LoRaWAN en la Tabla 2.

Tabla 2: Características principales del radio-enlace para la tecnología LoRaWAN.

Tecnología	Modulación	Banda de frec.	Alcance	Velocidad	Modo
LoRaWAN	CSS	868MHz, 915MHz	20km	50kbps	Half-Duplex

- **Formato del paquete:** El formato del paquete varía entre mensajes de enlace ascendente (*uplink*) y de enlace descendente (*downlink*). En la Figura 4 se muestran los dos tipos de tramas físicas o tramas de radio de LoRa. A continuación se describen cada una de sus secciones:
 - Preámbulo: Su función principal es de sincronización, define el esquema de modulación de

paquete (permite indicar el esquema de transmisión para cada paquete en función de la distancia al *gateway*). Finaliza con un byte de sincronización que permite diferenciar entre las redes LoRa que están emitiendo en la misma banda de frecuencia.

- Cabecera: Formada por el PHDR y PHDR_CRC, su función es añadir más información sobre la trama y el control de errores. Permite configurar el número de bytes de carga útil e informar de la existencia de CRC para la carga útil.
- Carga útil: Formada por el PHYPayload y el CRC, contiene la trama de la capa de acceso al medio. El tamaño máximo del *payload* es de 255 bytes.

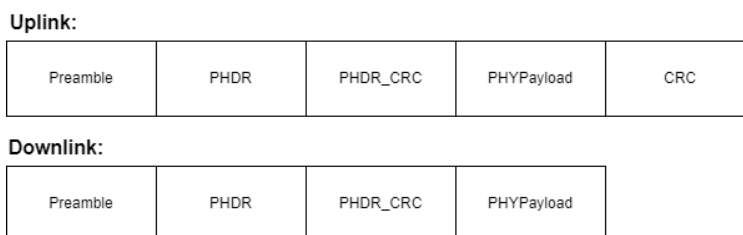


Figura 4: Estructura tramas físicas de mensajes ascendentes y descendentes.

Por otro lado, la trama MAC o trama LoRaWAN se sitúa en el campo PHYPayload (payload de la trama física). Esta trama está formada por los siguientes paquetes como muestra la Figura 5. A continuación, se describen los paquetes que componen la trama MAC:

- Cabecera MHDR: Está formada por un conjunto de información en la que se muestra el tipo de mensaje que se envía en el MACPayload.
 - MACPayload: Dividido en tres partes, FHDR contiene la dirección del dispositivo final (DevAddr), un octeto de control (FCtrl), un contador de dos octetos (FCnt) y hasta 15 octetos de opciones de trama (FOpts) para transportar comandos MAC. Si FOpts está presente se cifrará con NwkEncKey. Luego, Fport contiene el puerto desde el que el dispositivo esta transmitiendo hacia el servidor. Por último, FRMPayload contiene órdenes o información específica de las aplicaciones (también cifrado mediante NwkSkey).
 - MIC: Es un código calculado a partir de diferentes parámetros de la trama LoRa con el fin de garantizar la integridad y la autenticidad del mensaje.
- **Topología de red:** LoRaWAN utiliza una topología de red de tipo estrella, en la que múltiples nodos finales (dispositivos de IoT) se comunican con una o varias estaciones base (gateway) que actúan como punto central de la red. Los nodos finales envían paquetes de datos a las estaciones base, que a su vez los retransmiten a través de la red de backhaul hacia los servidores de red de LoRaWAN como se muestra en la Figura 6. Este diseño de topología de red permite una alta escalabilidad y eficiencia en la transmisión de datos a larga distancia.

A continuación, se explican los elementos más importantes de la topología mencionada:

- Dispositivos finales: Dispositivos de bajo consumo encargados de recoger la información de un fenómeno en específico y transmitirlo a la pasarela (comunicación single-hop con uno o varios Gateway).
- Gateway o pasarela: Estaciones base LoRa, retransmiten de forma bidireccional entre los dispositivos finales y los servidores de red.

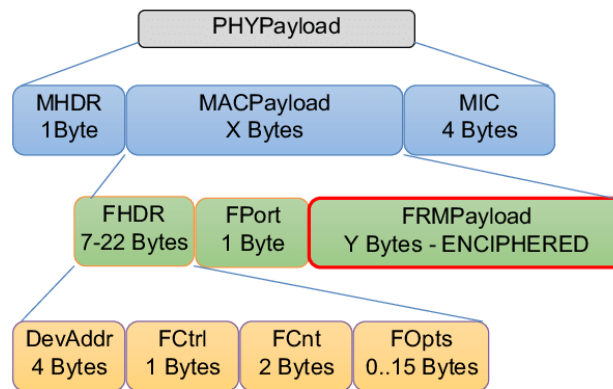


Figura 5: Estructura trama MAC.

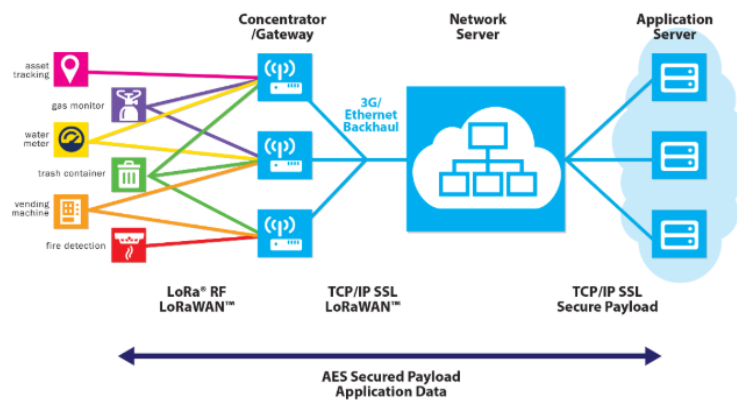


Figura 6: Topología completa de LoRaWAN.

- Servidores de red: Se conectan a través de una conexión TCP/IP SSL. Se encargan de la recepción y procesamiento de la información proveniente de los dispositivos finales (eliminación de duplicados), así como de la gestión y configuración de la red y dispositivos finales.
- Servidor de aplicaciones: Evalúan la información recibida de los nodos finales y determinan las acciones del nodo final.

3. Estado del arte

Los fenómenos inalámbricos que afectan el desempeño de la propagación de la señal son los siguientes:

1. *Path Loss*: Es la reducción de la potencia de la señal a medida que se propaga a través del espacio, debido a la atenuación por la distancia y otros factores ambientales.
2. *Fading*: Es la variación aleatoria de la amplitud, la fase o la frecuencia de la señal debido a la propagación multipath, la reflexión y la difracción de la señal en los objetos del entorno.

3. *Shadowing*: Es el bloqueo parcial o total de la señal debido a la atenuación por obstáculos físicos como edificios, árboles, etc.
4. *Interferencia*: Es la presencia de señales no deseadas en la misma banda de frecuencia, que pueden causar interferencia y degradación del enlace.
5. *Ruido*: Es la presencia de señales aleatorias en la banda de frecuencia, que pueden afectar la calidad de la señal y aumentar la tasa de errores.

Luego, para medir el desempeño de un enlace existen distintas métricas, dentro de las más populares encontramos el *Packet Error Rate* (PER) y el *Signal-Noise Ratio* (SNR). Estas métricas están descritas de la siguiente forma:

- **Packet Error Rate (PER)**: Tasa de error de paquete es la probabilidad de que la transmisión de un paquete no tenga éxito. La tasa de pérdida de paquetes es la probabilidad de que un paquete generado no se entregue porque se alcanzó el límite de reintentos o porque se eliminó un paquete debido a la llegada de un nuevo paquete [6] ??.

$$\text{PER} = \frac{\text{Número de paquetes erróneos}}{\text{Número total de paquetes transmitidos}} \quad (1)$$

- **Signal-Noise Ratio (SNR)**: El SNR indica la razón entre la potencia de la señal y la del ruido expresada en dB. Se puede calcular de la siguiente forma:

$$\text{SNR}_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_N} \right) \quad (2)$$

donde SNR_{dB} es la relación señal a ruido en decibelios, P_S es la potencia de la señal y P_N es la potencia del ruido. Por lo tanto, mientras mayor sea el SNR mejor será la comunicación entre transmisor y receptor.

3.1. Sigfox

En una publicación realizada en 2019 [3], se comparan las especificaciones técnicas de Sigfox con LoRaWAN y NB-IoT, encontrándose que esta primera es ideal cuando se quiere contactar a largas distancias, siempre y cuando, la velocidad no sea un requisito, pues su latencia es mucho mayor a las otras dos tecnologías.

Por otra parte, en casos de estudio reales, se realizaron algunos estudios en una ciudad de República Checa [6], donde se concluyó que en entornos urbanos el SNR en un radio de 10km mayormente se encuentra entre 10 y 14 [dB], es decir, la variabilidad de SNR es altísima y depende de factores como la línea de vista.

Además, en otro caso de estudio realizado en dos campus de ciudades de Estonia [7] se obtuvo que en espacios abiertos Sigfox no pierde paquetes, pero en espacios abiertos y subterráneos si existe pérdida, aunque mínima.

3.2. LoRaWAN

En el campo de las comunicaciones inalámbricas, se ha evaluado el rendimiento de LoRaWAN a través de diversas investigaciones, que han proporcionado resultados que no siempre se corresponden con las expectativas y no siempre explotan la principal característica de esta tecnología: la comunicación de larga distancia.

Por ejemplo, en un estudio llevado a cabo en la Universidad de OLU en Finlandia [10], se desplegaron 331 nodos con 5 sensores cada uno en una superficie de 2163 metros cuadrados. Los resultados muestran que a medida que los nodos se alejan del gateway, el SNR disminuye y el PER aumenta. Otro estudio [8] examinó el rendimiento de LoRaWAN en los alrededores de un aeropuerto en Bangkok, donde se probaron las comunicaciones tanto en interiores como en exteriores. Los resultados indican que en interiores, a una distancia de 120 metros, se había perdido casi la totalidad de los paquetes, mientras que en exteriores, a los 2 kilómetros, la pérdida era de aproximadamente el 22 %. Se sugiere que estos resultados pueden deberse a la cantidad de interferencias de señales presentes en un aeropuerto.

Por último, en un experimento realizado en Líbano [9], se evaluó el rendimiento de LoRaWAN en distintos ambientes (interiores, urbanos y rurales), y se analizaron y presentaron modelos de pérdida de señal. Además, se evaluó el rendimiento en términos de PDR y SNR. Los resultados muestran que en áreas urbanas densas, el rango de cobertura fue de 9 km, mientras que en áreas rurales fue de 47 km, utilizando solo un gateway. Estos hallazgos validan el uso de LoRaWAN en implementaciones tecnológicas como smart cities y smart agriculture, entre otros.

4. Simulación de radio-enlace

4.1. Cálculo teórico

Para el cálculo de pérdida en espacio libre de radio-enlace de ambas tecnologías, se considera el modelo de *Okumura-Hata*, especificado por las siguientes ecuaciones:

$$PL = A + B \log(d) + C$$

$$A = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_b) - \alpha$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log(h_b)$$

Luego, para áreas metropolitanas y $f \geq 400$ MHz se cumple que:

$$C = 0 \quad \alpha = 3.2 \log((11.75 \cdot h_m)^2) - 4.97$$

Donde se utilizan los parámetros y valores presentados en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores usados en el modelo de Okumura-Hata

Parámetro	Valor	Descripción
d	2.3	Distancia en [km] entre transmisor y receptor
f_c	921/915	Frecuencia central en [MHz] de la transmisión de datos
h_a	5	Altura en [m] del receptor
h_m	30	Altura en [m] del transmisor

Entonces, para Sigfox, es decir, considerando $f_c = 921$ [MHz] se tiene una pérdida en espacio libre de -140.6 [dB], y dado que las frecuencias centrales son muy similares con LoRaWAN, se tiene aproximadamente la misma pérdida considerando $f_c = 915$ [MHz].

A continuación se hace el cálculo total del radio-enlace para cada una de las tecnologías, considerando además que se usan antenas Yagi con una ganancia de 10 [dBi], tanto en transmisor como receptor y que existe pérdida de 0.5 [dB] por metro lineal en las guías de onda.

Sigfox

Para estos cálculos se considera un chip SF01 [11], el cual es un módulo de Sigfox que funciona en la zona geográfica de Chile (RC4), tanto en el receptor como en el emisor. Se obtienen los resultados de la Tabla 4.

Tabla 4: Resultados de radio-enlace usando Sigfox

Elemento	Descripción	Valor
Transmisor	Chip de comunicación o elemento transmisor [dBm].	24
Guía de onda	Pérdida por metro lineal [dB]	-0.5
Antena transmisora	Antena Yagi (direccional) [dB]	+10
Modelo de propagación	Okumura-Hata para áreas metropolitanas [dB]	-140.6
Antena receptora	Antena Yagi (direccional) [dBi]	+10
Guía de onda	Pérdida por metro lineal [dB]	-0.5
Total en el receptor	En [dB]	-97.6
Sensibilidad del receptor	Especificado por el datasheet [dBm]	-130

LoRaWAN

Reemplazando los valores antes descritos y considerando un chip SEMTECH SX1276 [12], se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 5.

4.2. Simulación de Radio-Enlace

Para la simulación de radio enlace se procedió a seleccionar las coordenadas en Google Earth para luego ingresarlas a la aplicación RadioMobile (se utilizaron antenas a 30m y 5m).

Tabla 5: Resultados de radio-enlace usando LoraWAN

Elemento	Descripción	Valor
Transmisor	Chip de comunicación o elemento transmisor [dBm].	20
Guía de onda	Pérdida por metro lineal [dB]	-0.5
Antena transmisora	Antena Yagi (direccional) [dB]	+10
Modelo de propagación	Okumura-Hata para áreas metropolitanas [dB]	-140.6
Antena receptora	Antena Yagi (direccional) [dBi]	+10
Guía de onda	Pérdida por metro lineal [dB]	-0.5
Total en el receptor	En [dB]	-101.6
Sensibilidad del receptor	Especificado por el datasheet [dBm]	-148

Sigfox

En la Figura 7 y 8 se observan las simulaciones generadas en RadioMobile, donde la primera entrega la información numérica del sistema, mientras que la segunda es un mapa de calor de la calidad de la señal. Se observa que la señal no tiene línea de vista y llega con poca potencia.

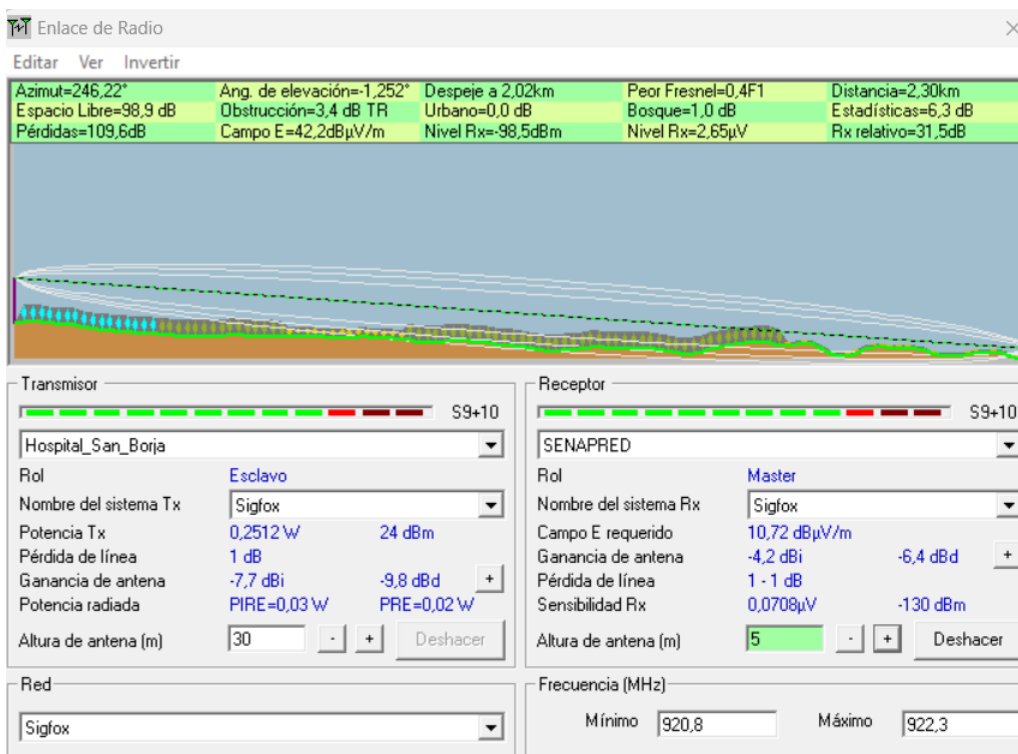


Figura 7: Información numérica y visual entregada por RadioMobile para el enlace Sigfox.

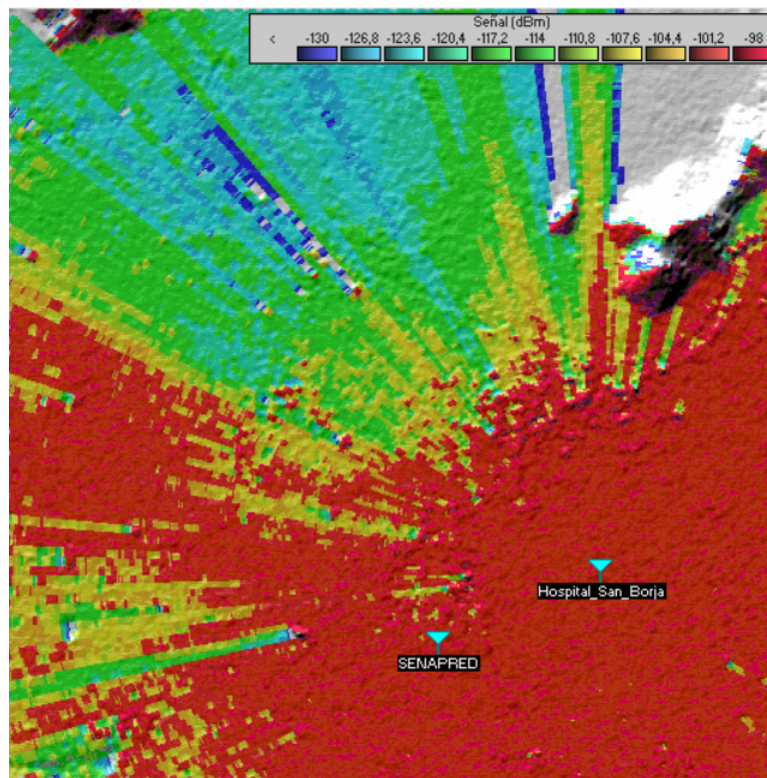


Figura 8: Mapa de calor entregado por RadioMobile para enlace Sigfox.

LoRaWAN

En la Figura 9 y 10 se observan las simulaciones generadas en RadioMobile, donde la primera entrega la información numérica del sistema, mientras que la segunda es un mapa de calor de la calidad de la señal. Se observa que la señal no tiene línea de vista y llega con poca potencia.

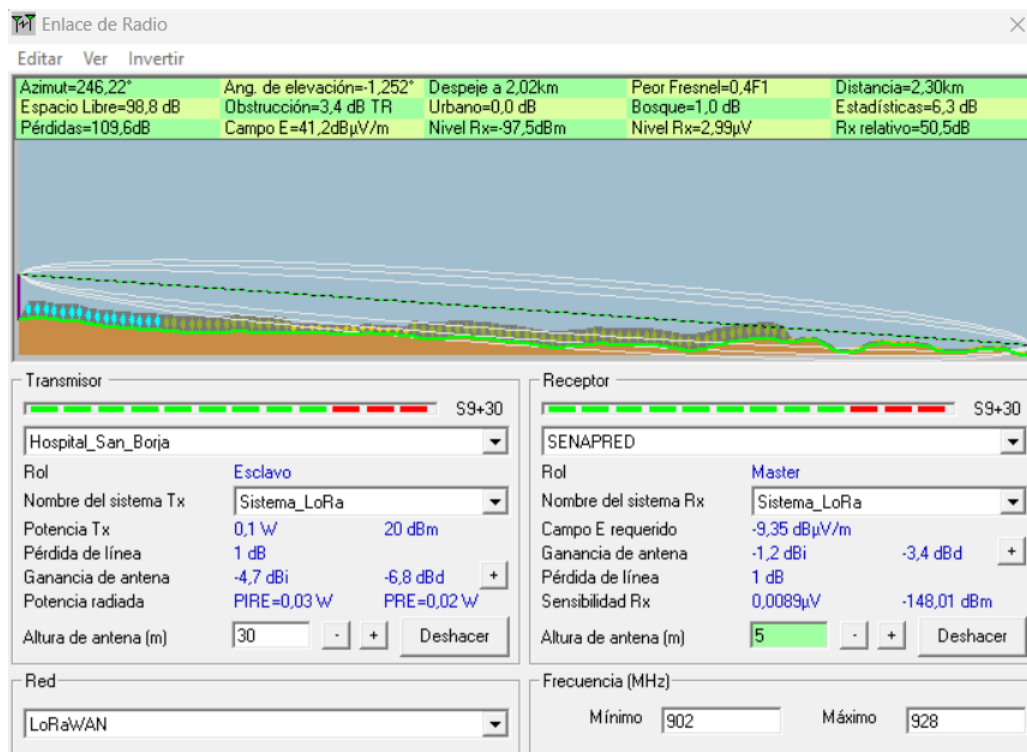


Figura 9: Información numérica y visual entregada por RadioMobile para enlace LoRaWAN.

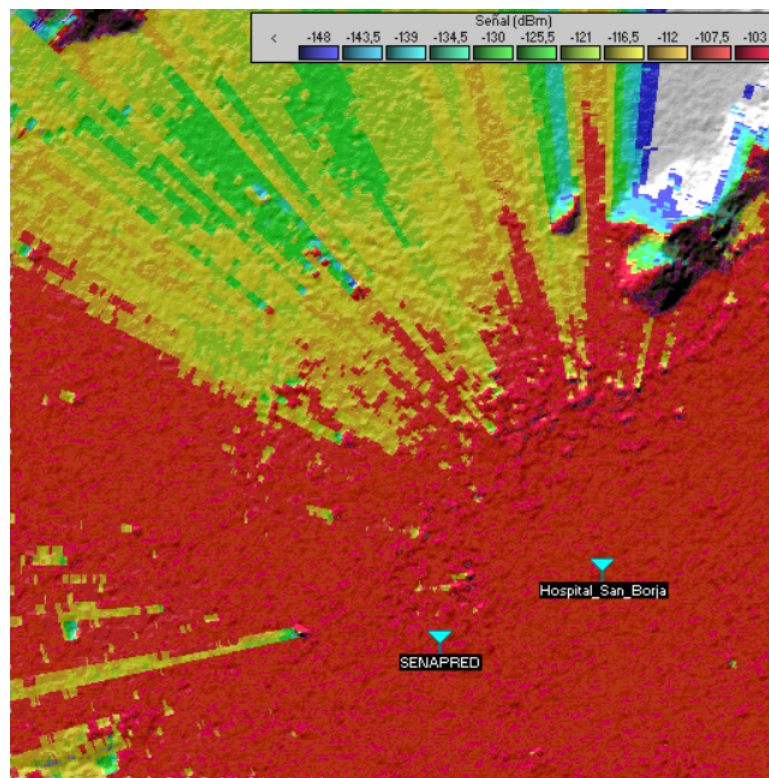


Figura 10: Mapa de calor entregado por RadioMobile para enlace LoRaWAN.

Luego, se procedió a exportar los datos obtenidos en la simulación de LoRaWAN (ya que entrego resultados levemente mejores que Sigfox y las simulaciones deben ser practicamente iguales) a Google Earth donde podemos ver un panorama general en la Figura 11 y una ampliación sobre un edificio que se encuentra en la línea de vista. Dado que ahora conocemos existe un edificio en la linea de vista y podemos obtener su altura podríamos calcular cuanto afecta este objeto a la señal para tener un calculo más exacto pero esto se realizará como trabajo futuro (próximas tareas).



Figura 11: Visualización del enlace en Google Earth.



Figura 12: Zoom del edificio en la LOS.

5. Discusión y conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se tiene que en general ambas tecnologías cuentan con las capacidades para cumplir gran parte los requerimientos del sistema presentados en la tarea anterior obteniéndose una pequeña ventaja de LoRaWAN frente a Sigfox en la calidad del enlace. Sin embargo, tras la investigación y las simulaciones realizadas en esta tareas, hay características importantes que salen a la luz. La más relevante para este caso es la limitación de mensajes diarios que tiene Sigfox, pues se impuso una frecuencia de 1 mensaje cada 1-2 minutos máximo y esta tecnología, por muy eficaz que sea en términos energéticos, está limitada a 1 mensaje cada 10 minutos aproximadamente.

Otra situación que se logro determinar en base a lo realizado es que, en la línea de vista entre los puntos de recepción y transmisión, existe un edificio inmobiliario de dimensiones no despreciables. Este obstáculo no previsto no es considerado por ninguno de los cálculos realizados hasta el momento, por lo que se propone para futuras entregas el dimensionar el efecto de este en la señal.

Además, se logro determinar que el calculo teórico del enlace es bastante coincidente con el calculo realizado por RadioMobile, pudiendose visualizar la leve ventaja que tiene LoRaWAN frente a Sigfox en los mapas de calor.

Finalmente, se determinó que para la aplicación en cuestion se utilizará LoRaWAN debido a que se puede utilizar más abiertamente que Sigfox, existe mayor documentación al respecto, tiene una leve ventaja en la calidad del enlace y no tiene limite de mensajes por dia.

Referencias

- [1] “Radio configurations”, *Sigfox*, <https://build.sigfox.com/sigfox-radio-configurations-rc> (accedido 14 de Mayo de 2023).
- [2] A. Lavric, A. I. Petrariu and V. Popa, “Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis Under Large-Scale, High-Density Conditions” en *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35816-35825, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2903157.
- [3] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A comparative study of Lpwan Technologies for large-scale IOT deployment”, en *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2019, doi: 10.1016/j.ict.2017.12.005.
- [4] S. Aguilar et al., “Packet Fragmentation Over Sigfox: Implementation and Performance Evaluation of SCHC ACK-on-Error”, en *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 13, pp. 11057-11070, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3127170.
- [5] <https://www.avnet.com/wps/wcm/connect/onesite/03aebfe2-98f7-4c28-be5f-90638c898009/sigfox-technical-overview.pdf?MOD=AJPERES&CVID=magVa.N&CVID=magVa.N&CVID=magVa.N>
- [6] K. Mikhaylov et al., “Communication Performance of a Real-Life Wide-Area Low-Power Network Based on Sigfox Technology,” *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Dublin, Ireland, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC40277.2020.9148645.
- [7] N. Poddar, S. Z. Khan, J. Mass and S. N. Srirama, “Coverage Analysis of NB-IoT and Sigfox: Two Estonian University Campuses as a Case Study”, *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Limassol, Cyprus, 2020, pp. 1491-1497, doi: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148570.
- [8] Bankov, D., Khorov, E., & Lyakhov, A. (2016, November). On the limits of LoRaWAN channel access. In 2016 International conference on engineering and telecommunication (EnT) (pp. 10-14). IEEE.
- [9] El Chall, R., Lahoud, S., & El Helou, M. (2019). LoRaWAN network: Radio propagation models and performance evaluation in various environments in Lebanon. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 2366-2378.
- [10] Yasmin, R., Petäjäjärvi, J., Mikhaylov, K., & Pouttu, A. (2018, September). Large and dense lorawan deployment to monitor real estate conditions and utilization rate. In 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) (pp. 1-6). IEEE.
- [11] “SF01”, *Sigfox Partner Network*, <https://partners.sigfox.com/products/sf01> (accedido 17 de Mayo de 2023).
- [12] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/800239/SEMTECH/SX1276.html>