

Análisis para Despliegue de una Red de Sensores Heterogénea

Medina Santiago¹Romero Fernando¹, De Giusti Armando^{1,2}, Tinetti Fernando G.^{1,3}

¹Instituto de Investigación en Informática III-LIDI, CEA-CIC, Facultad de Informática
Universidad Nacional de La Plata, 50 y 120 2do piso, La Plata, Argentina

²CONICET – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

³CIC – Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. de Buenos Aires
{smedina, fromero, degiusti, fernando}@lidi.info.unlp.edu.ar

Abstract. Una red inalámbrica de sensores o Wireless Sensor Network (WSN) en inglés, es un conjunto de nodos compuestos por un microcontrolador, diversos sensores, dispositivos de comunicación y en algunos casos actuadores, que permiten recoger y transmitir datos del entorno físico en cual se aplican e influir sobre él. La comunicación inalámbrica es el medio por el cual los nodos se conectan, utilizando diferentes estándares y protocolos, por ejemplo WiFi, Bluetooth, ZigBee, LoRa, etc. Dentro de una misma Red podemos utilizar una combinación de tecnologías inalámbricas y distintas topologías para la distribución de nodos. En este trabajo se hará un análisis de hardware específico en el que se combinan dos tecnologías diferentes de comunicaciones inalámbricas: WiFi y LoRa. Cada una de esas tecnologías se aprovechará por sus características de alcance y ancho de banda. Los puntos de análisis serán la distancia y confiabilidad en el envío de paquetes.

Keywords: Red de Sensores, LoRa, WiFi, WSN.

1 Introducción

El crecimiento exponencial en el desarrollo de hardware del último tiempo ha generado nuevos microcontroladores de pequeño tamaño, con mayor capacidad de procesamiento y menor consumo energético [3]. Estos dispositivos, combinados con el avance sobre nuevas tecnologías de comunicación inalámbrica nos dan como resultado la capacidad de desplegar diferentes tipos de nodos que conforman Redes de Sensores aplicadas en diferentes ámbitos, para obtener datos y poder realizar operaciones. Entre las características de las redes de sensores podemos nombrar:

- Baja tasa de transferencia
- Limitación en la alimentación o bajo consumo de los nodos sensores
- Alimentación por baterías
- Escalabilidad y/o gran cantidad de nodos

En la estructura básica de una Red de Sensores se pueden definir 3 partes: los nodos

sensores, la red inalámbrica de comunicación y nodos centralizadores o gateways [1].

Los nodos sensores son pequeñas unidades conformadas por un microcontrolador, uno o varios sensores, un módulo de energía, un módulo de comunicación y en algunos casos actuadores. Estos nodos tienen como función primaria la recolección y transmisión de datos para un control centralizado. Entre los sensores que conforman este tipo de nodos podemos nombrar sensores térmicos, de humedad, de movimiento, sísmicos, de diferentes gases, acústicos, de distancia, de luz, de flujo de líquido, etc. También pueden incluir actuadores que influyen directamente en el ambiente, como ser, algún tipo de alarma sonora, una luz, un motor, o simplemente un pulso para activar un mecanismo, como por ejemplo abrir una puerta o cerrar una válvula [1].

Las redes de comunicación que se utilizan están dentro de las denominadas WPAN (Wireless Personal Area network) o las LPWAN (Low Power Wide Area Network), redes inalámbricas basadas en estándares como 802.15.4 y 802.11 [13] [14], que definen los dos primeros niveles del modelo OSI, Capa Física y Capa de Enlace de datos. Las WPAN, son redes que comúnmente no cubren largas distancias y conectan diferentes dispositivos inalámbricos que no requieren de una alta tasa de transferencia, por debajo de 1Mbps, como ejemplo se puede nombrar Bluetooth. Las LPWANs, son redes orientadas a ocupar largas distancias con un bajo consumo, operan en la banda libre ISM (Industrial, Scientific and Medical) por debajo de 1GHz y poseen esquemas de modulación, como modulación en banda estrecha o modulación *Spread Spectrum*, que posibilitan enlaces de varios kilómetros en ciudad, e incluso decenas de kilómetros en ambientes rurales, con un bajo costo energético.

Los nodos centralizadores son los encargados de recibir los datos que generan los nodos sensores, y servir como puntos de acceso a otra red o como conector a un servidor en donde se procesarán los datos obtenidos para tomar las decisiones correspondientes. Generalmente estos dispositivos tienen una unidad de procesamiento de mayor capacidad, y en la mayoría de los casos con dos módulos de comunicación, uno para la interacción con los nodos sensores y otro para transmitir los datos recolectados al dispositivo de recolección central.

Estas Redes tienen diferentes ámbitos de aplicación debido a que dan la posibilidad de desarrollar los nodos de manera personalizada para su utilización en cada área específica, y adaptar la topología de red a las necesidades del problema. Entre los ejemplos más comunes de aplicación de las Redes de Sensores Inalámbricos están, desarrollos militares, monitoreo ambiental, agricultura, seguridad, domótica, ciudades inteligentes [1] [2]. Quizás justamente por esta razón, no existe una topología determinada común a todas las WSN, pueden no tener un patrón específico para la distribución de nodos o ser combinaciones de topologías conocidas, como estrella, malla y árbol. La estructura de la topología va a ser ad hoc cumpliendo con los requerimientos del desarrollo y las limitaciones que puede tener el ambiente físico en donde se colocan los nodos.

Por último uno de los conceptos nuevos que está fuertemente emparentado con las Redes de Sensores, es el Internet de las Cosas (IoT), ya que comparten características

comunes, como la comunicación inalámbrica, el bajo consumo energético y la recolección de datos en ambientes físicos, pero hay que aclarar que no son lo mismo, a pesar de sus similitudes. Entre las diferencias de estos dos conceptos podemos nombrar, que los componentes de una red de sensores no tienen la necesidad de estar conectados a internet o que el IoT está orientado a la conexión de miles de dispositivos a lo largo del mundo, en cambio los nodos de una WSN generalmente están confinados a un espacio/aplicación específica y limitada.

2 Protocolos

Si bien como se aclaró antes existen diversos protocolos involucrados o que se pueden utilizar en redes de sensores, se describen a continuación los que hemos utilizado en nuestros experimentos.

WiFi: Es una tecnología de interconexión inalámbrica, que hace referencia a “Wireless Fidelity” (fidelidad inalámbrica). Wi-Fi Alliance es una asociación que se encarga de certificar que los dispositivos de WiFi cumplen con el conjunto de IEEE de estándares inalámbricos 802.11 [13]. Este estándar define los niveles inferiores de la capa del Modelo OSI, la capa física y la capa de enlace de datos, para conexiones inalámbricas que utilizan ondas electromagnéticas. Dentro de este estándar existen distintas variaciones en las cuales se definen características específicas para cada caso, modificando principalmente la frecuencia en la cual se trabaja y la velocidad de transferencia de datos. 802.11 b/g/n es el estándar de mayor utilización en los dispositivos, trabaja en la frecuencia de 2.4GHz y alcanza velocidades de hasta 300Mbps. Su topología de red consiste en la creación de puntos de acceso en donde se conectan los diferentes dispositivos que quieren pertenecer a una red. Respecto a la seguridad, la conexión a los puntos de acceso puede ser o no protegida con algún tipo de contraseña.

LoRa (acrónimo de Long Range): es una tecnología de modulación de radio desarrollada por la empresa Semtech, que define y es propietaria de la capa física. Las demás capas (denominadas LoRaWAN) son desarrolladas por una organización sin fines de lucro denominada Lora Alliance de forma abierta. Semtech se encarga de comercializar los dispositivos [10] [11].

La estructura de la red LoRa tiene 3 partes: Servidores de Red que centralizan y procesan la información, estaciones base o concentradores que hacen de punto de acceso entre el servidor, y la tercera parte de la infraestructura, que son los nodos finales. Estos nodos finales se encargan de recolectar la información del ambiente y transmitirla. Los nodos finales y el concentrador forman una topología estrella de un solo salto. La Fig. 1 muestra esquemáticamente una red LoRa [15]. Esta red permite seleccionar 6 factores ortogonales de ensanche de espectro (Spreading Factor- SF) numerados del 7 al 12, para los cuales define una relación de potencia y tasa de transferencia. Como resultado, a mayor SF mayor alcance y menor velocidad en la comunicación. Las velocidades varían entre 0.3kbps y 50kbps. La banda de frecuencia en donde trabaja se encuentra dentro de la banda libre ISM, por debajo de 1GHz, específicamente funciona en, 868MHz, 433MHz y 915MHz, las dos primeras en Europa y la tercera en América. LoRaWAN, es el

protocolo de red que utiliza LoRa para las capas inferiores. Agrega características como: Encriptación AES 128, 3 clases de nodos, administración de dispositivos, redes públicas y privadas.

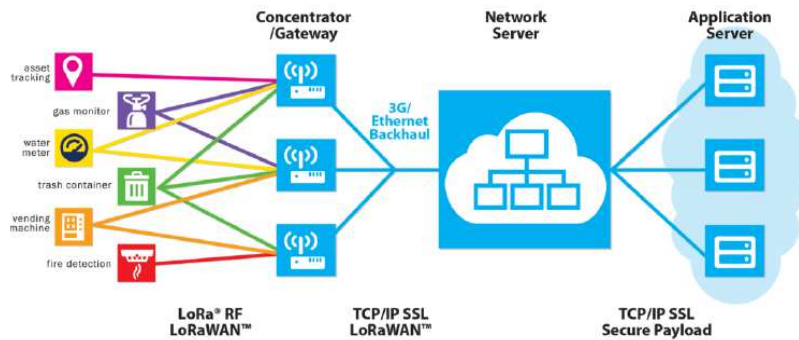


Fig. 1 – Topología de Red LoRaWAN

3 Hardware Utilizado

De manera similar a lo que sucede con las tecnologías de comunicaciones inalámbricas, los microcontroladores y sensores utilizados en las redes de sensores son muy heterogéneos. Describiremos a continuación los utilizados en la experimentación para este trabajo.

NodeMCU: es un firmware y una placa de desarrollo open source, basada en el chip de la empresa Espressif ESP8266-12E. La placa agrega al microcontrolador el chip para la conexión UART a través de un puerto micro USB, que sirve como alimentación y punto de comunicación [9]. ESP8266 es un microchip WiFi de bajo consumo que contiene como CPU al procesador Tensilica LX106 de 32-bit RISC, a 80MHz; con 64 KB de memoria de instrucciones y 96KB de datos [4] [5]. Este integrado varias características de hardware que lo hacen apropiado para una variedad muy amplia de aplicaciones:

- 1 ADC de 10-bit
- 17 GPIO pins
- Interfaces: 3 SPI, 1 I2C, 1 I2S y 2 interfaces UART
- PWN
- Protocolo WiFi 802.11 b/g/n

Las dos características más importantes, sin embargo, no son necesariamente de hardware: bajo costo y amplio soporte de programación. En particular, la programación utilizando el IDE y las bibliotecas de Arduino han generado una gran cantidad de ejemplos disponibles gracias al uso masivo. En la Fig. 2 se puede apreciar, por ejemplo, que los pines GPIO son identificados como los del Arduino UNO (D0, D1, etc.).

Heltec WiFi LoRa 32: La Fig. 3 muestra la placa de desarrollo construida por la empresa Heltec. Esta placa incluye dos chips principales, el ESP32 y el transceptor LoRa

SX1278 (con conector I-PEX, para antena externa), sumados a un convertidor CP210x MicroUSB a UART, una pantalla 0,96" OLED y un conector Molex PicoBlade de 2 pines para batería LiPo/Li-Ion [12]. El módulo WiFi puede transmitir a una tasa de hasta 150Mbps. El módulo Bluetooth, tiene funcionamiento normal y también BLE (Bluetooth Low Energy).



Fig. 2 – Placa de desarrollo NodeMCU



Fig. 3 – Placa de Desarrollo de Heltec

EL chip ESP32 es una solución integrada de WiFi-Bluetooth con radiofrecuencia de 2.4GHz. Basado en el microprocesador Tensilica Xtensa LX6 de 32 bit, a 160MHz, con 448 KB de memoria ROM y 520 SRAM [6] [7]. Algunas de sus características más importantes de hardware son:

- 34 GPIOs programables
- 1 SAR ADC de 12bit, 2 DAC de 8 bit
- Interfaces: 4 SPI, 2 I2S, 2 I2C
- PWM
- Protocolo 802.11 b/g/n

EL SX1278 es un chip transceptor de radio frecuencia LoRa desarrollado por Semtech, dentro de la placa de desarrollo de Heltec, tiene dos versiones de frecuencia: 433MHz y otro que soporta las frecuencias 868MHz y 915MHz [8]. Este módulo se conecta vía SPI al ESP32 (conexión que integrada en la propia placa).

4 Arquitectura de la Red Heterogénea

La Fig. 4 muestra esquemáticamente la red inalámbrica heterogénea construida para los experimentos. Los nodos finales se conectan al nodo master utilizando WiFi y en distancias relativamente cortas. El nodo master se conecta a distancias mayores con el nodo gateway utilizando Lora. El nodo gateway puede estar conectado al exterior del

sistema utilizando una variedad muy amplia de tecnologías. El rango de estas tecnologías varía desde la conexión directa a un servidor donde se procesan los datos y se controla el sistema hasta enviar vía internet los datos a una nube (*cloud*) donde se concentran datos a procesar de diferentes sistemas.

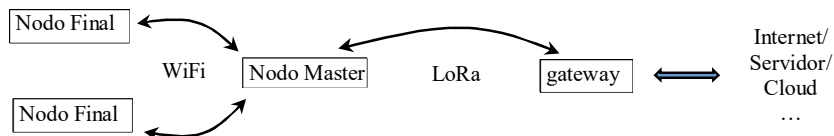


Fig. 4 – Red Inalámbrica Heterogénea

WiFi es la tecnología de comunicación que utilizan los nodos finales, basados en la placa de desarrollo NodeMCU. Este tipo de nodo se conecta a la red wifi generada por el master a través de una dirección ip fija preconfigurada. Iterativamente genera un paquete (de manera análoga a lo que sería el muestreo de un sensor), lo envía y espera la respuesta del master para verificar la integridad de la comunicación. Específicamente en la implementación actual, se utiliza el protocolo de transporte UDP que tiene muy poca sobrecarga y actividad de administración para el nodo master (no representa un problema, sin embargo, en los nodos finales). Además, el uso de UDP tiene la ventaja de ahorro de consumo de energía respecto a TCP, dado que con UDP no se tienen los mensajes propios de establecimiento de sesión/conexión necesarios para usar TCP.

El nodo master se basa en la placa de Heltec presentada anteriormente y tiene tres funcionalidades básicas:

- Generar un Punto de Acceso WIFI para los nodos finales recolectores
- Reconocer a cada nodo final que se conecta a su red
- Retransmitir la información a través de la comunicación LoRa

En ejecución, el nodo master iterativamente recibe en un puerto específico los mensajes de los nodos finales, los responde con un ACK y retransmite lo recibido hacia el nodo gateway. Básicamente un nodo master concentra los datos de los nodos finales y los retransmite al nodo gateway.

El nodo gateway también utiliza una placa Heltec, que con el SX1272 se maneja los mensajes LoRa y con el integrado ESP32 se conecta vía WiFi a la red en donde se ejecuta un servidor para el manejo/procesamiento de los datos. La funcionalidad del gateway es similar a la de los nodos master, aunque utilizando LoRa: concentra los paquetes LoRa de cada uno de los nodos master de la red, y los reenvía hacia el servidor para su procesamiento.

5 Experimentación

Todos los experimentos se llevaron a cabo en el mismo contexto, que se muestra en la Fig. 5: el nodo gateway se instaló en la terraza de la Facultad de Informática de la UNLP, a unos 10 metros de altura. La posición del nodo master se fue variando para hacer las distintas mediciones, siempre dentro de este ambiente “semi urbano”, intentado lograr

una línea de vista clara hacia el gateway para la conexión LoRa. Cabe aclarar que en este punto hay varias antenas trabajando a diferentes frecuencias: de telefonía móvil, de conexiones punto a punto WiFi y hasta un gateway LoRaWAN. Las distancias del nodo master al nodo gateway se muestran también en la Fig. 5, donde a partir de las cuales determinamos de manera específica las características de conectividad de LoRa a 100m, 200m, 350m y 500m. A 350m y a 500m ya la línea de visión no es tan despejada como en los casos de 100m y 200m.



Fig. 5 – Ambiente de Experimentación

Inicialmente se realizaron experimentos para analizar el funcionamiento de WiFi de manera tal que luego sea posible enfocarse en los experimentos específicos de la red LoRa a diferentes distancias. De estos experimentos iniciales se obtuvo como resultado que la comunicación WiFi entre el nodo final y el nodo master debe mantenerse por debajo de los 50 metros (siempre utilizando el protocolo de transporte UDP). Superando los 50m no se puede garantizar una reconexión a la red en caso de reinicio del módulo (escenario que se puede dar por ejemplo al utilizar los modos sleep para ahorro de energía de los módulos). La distancia máxima de comunicación lograda fue de 100m, pero solo si se realizó la conexión a la red en una distancia menor y luego se mantiene.

Se plantearon dos clases de experimentos en función de la cantidad de nodos finales que se utilizan, para verificar algunos aspectos importantes de análisis de redes de sensores heterogéneas además de la propia distancia detallada anteriormente:

- Un único nodo final, generando un paquete de 10 bytes cada 1 segundo, simulando el censado de un dato del ambiente. Este paquete es enviado por un socket UDP al nodo master quien lo encapsula en LoRa y lo reenvía al gateway de manera inmediata. Como se detalló antes, la distancia entre el nodo master y el nodo final se mantuvo constante en 50 metros y siempre con una línea de vista directa entre los dos puntos de la conexión.

- Varios nodos finales con un máximo de 4, generando un paquete de 10 bytes cada 1 segundo cada uno. El nodo master en este caso se encarga de recibir cada mensaje y armar un paquete LoRa compuesto a partir de los (hasta 4) mensajes UDP para luego enviarlo al gateway. En este caso las distancias entre los nodos finales y el nodo master no fueron constantes, pero siempre se respetó no sobrepasar el límite de 50 metros de radio y manteniendo una línea de visión directa.

6 Resultados

Para la presentación de los resultados obtenidos en la experimentación se incluyen diferentes aspectos de la comunicación, en las diferentes distancias entre el nodo gateway y el nodo master. Específicamente, en términos de tiempo de llegada entre paquetes se muestra el promedio, el máximo y el mínimo (todos en segundos). Para el análisis de la pérdida de paquetes se muestra la cantidad total de mensajes enviados y la cantidad de paquetes perdidos.

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos en el experimento con 1 nodo final. Las variaciones de tiempo pueden adjudicarse a que los diferentes métodos para el manejo de tiempo que tienen los nodos no son exactos, en especial el tiempo de retardo que genera el nodo final para la periodicidad del envío de paquetes. Quizás los resultados que pueden ser menos esperables se refieren a la pérdida de paquetes para 200m y 350m. Lo que se puede estimar de antemano es que a mayor distancia haya mayor pérdida de paquetes, pero no lo inverso, es decir que haya más pérdida de paquetes en 200m que en 350m. Es posible que la diferencia de ángulo respecto del nodo gateway genere que la señal tenga que atravesar un área de mayor interferencia (cercano al nodo gateway hay al menos una antena direccional en esa dirección). Sin embargo, para confirmar esta hipótesis deberíamos llevar a cabo más experimentos al menos a 200m, para que el ángulo respecto del nodo gateway sea el mismo que el de 350m. Se tomaron algunas muestras a 500m con 1 nodo final y los resultados fueron relativamente esperables en cuanto a que el promedio, máximo y mínimo se mantuvieron relativamente similares a los de la Tabla 1: 1,002s, 1,02s y 0,98 respectivamente, y en 100 mensajes se perdieron 21. Se debe tener en cuenta que una frecuencia de 1 segundo entre paquetes es relativamente alta para la tecnología LoRa.

Distancia	100m	200m	350m
Promedio	1,001	1,011	1,007
Max	1,02	1,09	1,02
Min	0,97	0,92	0,98
Cant. Paquetes	200	200	200
Cant. paq. perdidos	0	9	2

Tabla 1 – Resultados con Un Nodo Final

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos en el experimento con 2 nodos finales. En este caso se debe recordar que la frecuencia es de 2 segundos y cada mensaje contiene 2 muestras. Una vez más se podrían considerar que es anómalo que se pierdan más paquetes a una distancia de 200m (17 de 100) que a una distancia de 350m (2 de 100). La razón puede ser la misma que en el caso anterior, dado que la posición del nodo master es la misma que para el experimento con 1 nodo final. Queda, por lo tanto, la validación al menos experimental de la hipótesis comentada anteriormente para el experimento con 1 único nodo final.

Distancia	100m	200m	350m
Promedio	2,008	2,021	2,005
Max	2,18	2,73	2,17
Min	1,98	1,99	1,98
Cant. paquetes	100	100	100
Cant. paq. perdidos	0	17	2

Tabla 2 – Resultados con Dos Nodos Finales

Como se comentó anteriormente, las frecuencias con las que se hicieron los experimentos fueron relativamente muy altas para la comunicación LoRa. En parte, para abreviar el tiempo de los experimentos propiamente dichos, y en parte para verificar lo que sucede en la práctica para frecuencias altas de comunicaciones con esta tecnología. Muchas aplicaciones con las características detalladas de alimentación por batería no necesariamente tienen requerimientos de muy alta frecuencia para los mensajes.

7 Conclusiones y trabajo futuro

Este trabajo muestra el funcionamiento de dos tecnologías de comunicación inalámbrica aplicadas dentro de una misma red de Sensores. Se realizaron distintos análisis del funcionamiento de estas tecnologías dentro del hardware utilizado. Como mínimo, se ha construido la red y se ha verificado la factibilidad de su funcionamiento. Asimismo, se tiene una mínima caracterización de tiempo y pérdida de paquetes.

Queda pendiente en este trabajo la medición del consumo energético de cada tipo de nodo con algún equipamiento externo (como por ejemplo, el sensor INA219 de Adafruit). En función de esas mediciones se podría, por ejemplo, utilizar modos bajo consumo, o disminuir la periodicidad de envío de datos. Dado que la placa Heltec ESP32 LoRa, cuenta también con un módulo Bluetooth de bajo consumo, también queda como prueba a futuro, integrar a la red de sensores módulos de esta tecnología (por ejemplo HM-10), para evaluar las distancias y velocidades de transmisión. Esto también lleva a la interrogante de cómo afectaría el funcionamiento conjunto de WiFi y Bluetooth dentro la misma placa trabajando sobre la misma frecuencia.

Por último, puede ser de interés profundizar en las pruebas de la tecnología LoRa, esto implica la utilización de módulos más complejos, que soporten LoRaWAN, combinados

con gateways que permitan funcionar como concentradores de la red. La utilización de nuevos módulos permitiría ampliar las distancias de funcionamiento de la red y desarrollos de mayor escala, por ejemplo aplicaciones orientadas Internet de las cosas y las ciudades inteligentes.

Bibliografía

1. Sohraby, K., Minoli, D., Znati T.: Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications. John Wiley & Sons (2007).
2. Raghavendra, C. S., Sivalingam, K. M., Znati, T.: Wireless sensor networks. Springer (2006).
3. Akyildiz, I., Vuran, M.: Wireless sensor networks(Vol. 4). John Wiley & Sons (2010).
4. ESP8266EX Datasheet Version 5.8, Espressif Systems. Año 2018. Disponible en https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf
5. ESP8266 Technical Reference Version 1.3, Espressif Systems. Año 2017. Disponible en https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf
6. ESP32 Datasheet Version 2.3, Espressif Systems. Año 2018. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
7. ESP32 Technical Reference Manual Version 3.4, Espressif Systems. Año 2018. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf
8. SX1272/73 Datasheet Rev 3.1, Semtech. Año 2017. <https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1272.pdf>
9. Documentación NodeMCU, www.nodemcu.com
10. Documentación LoRa, www.semtech.com
11. Documentación LoRaWAN, www.lora-alliance.org
12. Documentación WIFI LoRa 32, <http://www.heltec.cn>
13. IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks-Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, in IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012), doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7786995, IEEE (2016)
14. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks, in IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011), doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7460875, IEEE, (2016).
15. Topología LoRa, <https://www.semtech.com/technology/lora/what-is-lora>