
Comunicaciones LPWA

PID_00247331

Jesús Alonso-Zárate

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 2 horas



Universitat
Oberta
de Catalunya

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste eléctrico, químico, mecánico, óptico, grabación, fotocopia, o cualquier otro, sin la previa autorización escrita de los titulares del copyright.

Índice

| | |
|--|----|
| Introducción | 5 |
| Objetivos | 6 |
| 1. ¿Por qué existen las redes LPWA? | 7 |
| 2. Sigfox | 10 |
| 2.1. Introducción | 10 |
| 2.2. Descripción de la tecnología | 11 |
| 2.3. La capa PHY | 12 |
| 2.4. La capa MAC | 13 |
| 2.5. Rango de cobertura | 14 |
| 2.6. El modelo de negocio de Sigfox | 15 |
| 3. LoRa | 16 |
| 3.1. Introducción | 16 |
| 3.2. Descripción de la tecnología | 17 |
| 3.3. La capa PHY: LoRa Modulation | 18 |
| 3.4. La capa MAC: LoRa MAC | 21 |
| 3.5. Rango de cobertura | 22 |
| 3.6. El modelo de negocio de LoRa | 23 |
| 4. Otras alternativas | 24 |
| 4.1. Weigthless | 24 |
| 4.2. RPMA | 25 |
| Resumen | 27 |

Introducción

Este material introduce el concepto de redes LPWA (*low power wide area*), que han emergido en los últimos años para cubrir una necesidad surgida del desarrollo y la progresiva adopción de las aplicaciones basadas en el internet de las cosas.

Efectivamente, antes de la aparición y éxito de las redes LPWA, no había disponible ninguna tecnología capaz de ofrecer, de manera eficiente, conectividad para unos dispositivos que tienen que transmitir pocos datos, a mucha distancia de la estación base, y consumiendo el mínimo posible de energía.

En este material, introducimos el concepto de LPWA y describimos el porqué de su aparición y éxito. Además, revisamos las principales tecnologías que dominan el mercado en estos momentos: Sigfox y LoRa, fundamentalmente, así como otras alternativas que intentan abrirse camino aunque, hoy día, con menos éxito que las dos primeras grandes contendientes.

Finalmente, en las conclusiones resumimos los mensajes principales que se quieren transmitir con este módulo, y ponemos sobre la mesa la necesidad de valorar para cada aplicación en concreto qué tecnología es la más adecuada en cada caso.

Cabe recalcar que no es objetivo de este material describir con detalle las tecnologías Sigfox y LoRa, sino plantear sus fundamentos para entender, a vista de pájaro, su funcionamiento, ventajas y limitaciones, con el único objeto de crear un criterio crítico para poder elegir una tecnología u otra según nuestras necesidades particulares.

Objetivos

Los objetivos de este material son:

- 1) Entender la motivación del surgimiento de las nuevas redes LPWA (*low power wide area*) en el contexto del internet de las cosas y la industria 4.0.
- 2) Conocer las fortalezas y debilidades de estas tecnologías.
- 3) Entender el posicionamiento de las tecnologías LPWA respecto de las tecnologías estándar de corto alcance y las tecnologías estándar celulares.
- 4) Conocer la tecnología Sigfox.
- 5) Conocer la tecnología LoRaWAN.
- 6) Conocer otras alternativas existentes en el mercado.
- 7) Adquirir un pensamiento crítico para poder comparar y valorar las alternativas existentes, con el objetivo de poder seleccionar la mejor solución de conectividad para cada aplicación de la industria 4.0.

1. ¿Por qué existen las redes LPWA?

La industria 4.0 tendrá en el internet de las cosas una clara palanca tecnológica. La posibilidad de tener conectados todos los objetos abre un abanico de posibilidades enormes.

Para poder hacer realidad este mundo hiperconectado, es necesario disponer de tecnologías que ofrezcan **conectividad**. Esta conectividad tiene que permitir satisfacer las necesidades de comunicación remota teniendo en cuenta los requisitos de distintas aplicaciones, y ofreciendo ciertas garantías en términos de, al menos:

- 1) Tasa de transmisión de bits.
- 2) Retardo de transmisión.
- 3) Latencia.
- 4) Alcance y/o cobertura.
- 5) Consumo de energía por parte de los dispositivos y de la red.
- 6) Fiabilidad.

En muchos casos, estos *key performance indicators* (KPI) son contrapuestos y es necesario tomar una decisión de compromiso.

Algunas tecnologías ofrecen grandes tasas de transmisión de bits por segundo, pero su consumo energético es muy elevado. Otras tecnologías ofrecen buen consumo energético, pero su alcance es limitado.

Es decir, existe siempre un equilibrio que hay que gestionar a la hora de tomar decisiones estratégicas sobre qué tecnología seleccionar para cada aplicación en particular.

Simplificando el ecosistema de tecnologías de **comunicación sin cables**, podríamos decir que hasta hace pocos años había **cuatro grandes grupos** de tecnologías en entornos terrestres (dejamos aparte las comunicaciones vía satélite en esta clasificación):

- 1) Tecnologías de muy corto alcance para «sustituir» a los cables, tipo Bluetooth, con consumos de energía moderados.
- 2) Tecnologías de corto-medio alcance ofreciendo grandes tasas de transmisión, tipo Wi-Fi, y con elevados consumos de energía.
- 3) Tecnologías de corto-medio alcance ofreciendo bajas tasas de transmisión, tipo Zigbee, con moderado consumo de energía.

4) Tecnologías de largo alcance ofreciendo medias/altas tasas de transmisión, tipo redes celulares basadas en 2G/3G/4G, con muy alto consumo de energía.

Salta a la vista que existe un hueco por cubrir: el de las tecnologías de largo alcance optimizadas para la transmisión de bajas tasas de transmisión y con bajos consumos de energía por parte de los dispositivos.

Este tipo de conectividad es muy apropiada para un gran número de aplicaciones del IoT en las que la cantidad de datos que hay que transmitir es muy pequeña, pero es necesario tener largos rangos de cobertura (para minimizar la cantidad de infraestructura necesaria) y ofrecer consumo de energía (en el lado del dispositivo) realmente bajo, para permitir tiempos de vida de los dispositivos contados en decenas de años.

De esta necesidad y esta oportunidad, nacieron las que hoy llamamos tecnologías **low power wide area networks** (LPWAN).

Estas tecnologías se caracterizan por lo siguiente:

- Trabajan en bandas ISM, libres de licencia, por debajo de 1 GHz.
- Ofrecen **excelente cobertura**, con capacidad de dar coberturas a decenas de kilómetros desde la estación base, en áreas remotas y rurales.
- Tienen gran capacidad de penetración a través de paredes y el propio suelo, y habilitan aplicaciones bajo tierra.
- Ofrecen tasas de transmisión modestas a cambio de poca complejidad.
- Ofrecen tiempos de vida de los dispositivos medidos en años, llegando incluso a ofrecer duración de baterías de hasta 10 años en algunas condiciones.
- Son, en general, fáciles de instalar y de mantener.
- Tienen un bajo coste de adquisición y operación. Hoy día, el coste de adquisición de los dispositivos está por debajo de los 5 euros, y el coste de operación ronda el euro anual.

Estas características superan las limitaciones de tecnologías celulares en términos de cobertura, gestión de la energía y coste, y a las tecnologías de bandas ISM, tipo Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, etc. también en términos de gestión de energía, cobertura y rendimiento de la red.

Aunque existe un cierto debate sobre qué tecnología es mejor para cada caso, los grupos de influencia de este tipo de tecnologías insisten en que se trata de una opción **inclusiva** y **no excluyente**. Es decir, las redes LPWA intentan cubrir huecos que otras tecnologías no cubren, o no lo hacen de manera eficiente, ni para el operador de red

ni para el usuario final. Es decir, se trata de un tipo de tecnologías que plantean un modelo *win-win*. Por supuesto, este criterio es siempre discutible, pero, de entrada, no se plantean como sustitutivas de tecnologías existentes ya en el mercado.

En los últimos años, han destacado dos tecnologías LPWA que merece la pena destacar:

1) **Sigfox**: es una tecnología celular promovida por una empresa emergente francesa, que está siendo ampliamente extendida en un ámbito internacional. Su modelo de negocio se asimila al de las operadoras de telefonía móvil tradicionales; con tan solo comprar un dispositivo Sigfox, ya es posible conectarse a su infraestructura, gestionada y operada por la propia empresa Sigfox.

2) **LoRa**: promovida por una alianza muy potente en un ámbito internacional (LoRa Alliance), ofrece una tecnología con bajas tasas de transmisión de datos y gran capacidad de comunicación bidireccional. En este caso, el modelo de negocio es diferente; cada solución LoRa particular requiere el despliegue dedicado de una red LoRa, así como su mantenimiento y gestión.

Además de estas dos tecnologías, que son posiblemente las que han tenido mayor aceptación comercial hoy por hoy, existen otras tecnologías que también intentan hacerse un hueco en el mercado de las LPWA; ejemplos de ello son la tecnología nWave o RPMA (de Ingenu).

Finalmente, hay que tener en cuenta que el 3GPP, organismo que promueve los estándares de telefonía móvil en bandas con licencia (2G, 3G, 4G, 5G), por su parte también trabaja en definir sus estándares LPWA. Este es el caso de la tecnología NB-IoT (*narrow band IoT*), que se describirá con mayor detalle en el material «Comunicaciones celulares» dedicado a las tecnologías de comunicación celulares basadas en estándares del 3GPP.

La gran mayoría de los analistas auguran que un 45-55 % del tráfico de las redes del IoT se servirán a través de redes LPWA, de modo que quedará un 10-15 % para los operadores móviles tradicionales, y el tráfico restante para tecnologías tipo Bluetooth o Wi-Fi, entre otras alternativas.

En los próximos apartados, describiremos estas tecnologías y nos centraremos en la propia tecnología, sus diferentes modelos de negocio y los casos de uso más relevantes de cada una de ellas.

2. Sigfox

2.1. Introducción

Sigfox es una compañía francesa dedicada al internet de las cosas. Para ello, utiliza su propia tecnología LPWA, que trabaja en las bandas ISM sub-GHz.

Sigfox ofrece una red de comunicaciones independiente, pero no contempla despliegues propietarios privados de su tecnología. Sigfox despliega su infraestructura de red y ofrece conectividad como servicio. Poco a poco, Sigfox está desplegando su red en todo el planeta.

Para conectarse a la red SiFox, es necesario incorporar en los dispositivos que se quieren conectar a la red un chip de comunicaciones que sea compatible con su tecnología. Para facilitar su penetración en el mercado, Sigfox trabaja directamente con fabricantes como Texas Instruments, Atmel, o Silicon Labs, entre otros muchos, para poder ofrecer distintos tipos de SOC (*systems on chip*), transceptores y componentes de conexión a su red, y facilitar la integración de su conectividad en dispositivos de todo tipo.

La densidad de la infraestructura de la red Sigfox se basa en un rango promedio de unos 30-50 km en las zonas rurales por punto de acceso (o estación base). En zonas urbanas, donde suele haber más obstáculos y la interferencia puede ser mayor, la densidad suele reducirse a estaciones base que dan cobertura a rangos de entre 3 y 10 km.

Actualmente, Sigfox colabora con multitud de empresas que hacen de operadores de la red Sigfox. En España, por ejemplo, la empresa Cellnex actúa como operador de Sigfox. La lista crece cada día, dado que Sigfox está haciendo grandes esfuerzos por extender su cobertura a gran parte de la geografía mundial. Además, para garantizar cobertura global, Sigfox también está trabajando en el despliegue de su propia flota de satélites LEO.

La tecnología Sigfox permite el envío de mensajes cortos (de 12 bytes) utilizando una tecnología de ancho de banda muy estrecho (*ultra narrow band*, UNB). La tecnología ofrece un alcance muy largo, con excelentes propiedades de penetración de paredes y el suelo. Además, el consumo de energía es muy bajo, lo que permite tiempos de vida de muchos años; hasta 15 años, llegan a afirmar los promotores de la propia tecnología.

La tecnología de Sigfox se ha diseñado con las siguientes premisas:

- 1) **Simplicidad:** no hace falta configurar la red, solicitar conexiones o intercambiar información de control.
- 2) **Autonomía:** para asegurar un consumo de energía realmente bajo y permitir tiempos de vida de dispositivos medidos en decenas de años.
- 3) **Pocos datos:** la unidad de información que se transmite es pequeña, y no es apropiada para aplicaciones en las que la cantidad de información que hay que transmitir sea muy elevada.

2.2. Descripción de la tecnología

Sigfox es una tecnología de comunicación radio bidireccional, exclusivamente dedicada y optimizada para aplicaciones del IoT. La tecnología permite transmitir y recibir mensajes por parte de un dispositivo Sigfox, y es, por tanto, un sistema *half-duplex*.

En una red Sigfox hay 4 dominios:

- 1) Dispositivos/sensores/actuadores equipados con radio Sigfox.
- 2) Estaciones base de Sigfox (infraestructura de red).
- 3) Sigfox Cloud.
- 4) Dominio de aplicación de usuario (servidores o terminales de usuario final).

Una parte fundamental de Sigfox, además del acceso radio a la red de conectividad IoT, es **Sigfox Cloud**. Este elemento permite conectar la red de dispositivos con las aplicaciones de usuario, mediante **servicios de almacenamiento** y **gestión de datos**. Estos datos pueden ser los propios de la aplicación, o también datos relacionados con las cuentas de usuario y los sistemas de facturación. Sigfox llama a este elemento BSS (*business support system*). Además, Sigfox Cloud ofrece el OSS (*operator support system*), que consiste en un conjunto de herramientas que permiten hacer la gestión de cobertura y de usuarios a los operadores Sigfox. Este elemento es fundamental, al ser el punto de unión entre:

- 1) La red radio que se comunica con los dispositivos.
- 2) Los servicios al usuario final.
- 3) Los servicios a los operadores Sigfox.

El primer paso para conectar un dispositivo a la red Sigfox es registrarlo en la red y asociarlo con un servicio Sigfox. Una vez asociado, ya se pueden enviar mensajes.

Los mensajes que se pueden transmitir en el enlace de subida son pequeños y poco frecuentes. El *payload* de Sigfox está limitado a 12 bytes de información útil por paquete transmitido (excluyendo las cabeceras de control). Estos paquetes se transmiten

a una tasa de bit por segundo de 100 bps, y la transmisión dura un total de 6 segundos, aproximadamente. Aunque 12 bytes sean pocos bits de información, en realidad, satisfacen las necesidades de un gran número de aplicaciones del IoT. La cantidad de mensajes que se pueden transmitir por día está limitada por las regulaciones del ETSI relativas al uso de la banda de frecuencias ISM, que impone tiempos máximos de *duty-cycling*, es decir, de uso del canal radio. **El número total de mensajes que se pueden transmitir por día en el enlace de subida es 140.**

La información que transmiten los dispositivos se almacena en un *cloud* privado de Sigfox. Este *cloud* propietario se puede conectar fácilmente con otros sistemas *cloud* como Amazon Web Services (AWS) o Microsoft Azure, por poner dos ejemplos. La conexión se lleva a cabo a través de lo que Sigfox denomina *bridges*, en español, puentes.

Sigfox ofrece un servicio adicional llamado *callback*. Los *callbacks* constituyen un servicio que permite recibir notificaciones cuando un sensor equipado con Sigfox notifica un evento concreto. Por ejemplo, el servicio de Sigfox puede enviar una notificación a un servidor cuando un sensor detecta una temperatura por encima de un cierto nivel. Para esto, se usan primitivas HTTP tipo GET/POST.

Finalmente, Sigfox también ofrece comunicación bidireccional; es decir, se pueden transmitir mensajes en el *downlink* hacia un dispositivo. Cuando un dispositivo transmite un mensaje en el enlace de subida (*uplink* hacia el sistema), puede solicitar un mensaje de bajada. Para ello, espera un tiempo de 30 segundos para recibir un mensaje de bajada que puede ser de hasta 8 bytes de información útil. Estos mensajes en enlace de bajada suelen usarse para enviar parámetros de configuración a los dispositivos.

Debido a las limitaciones del ETSI en la operación en las bandas ISM de sub-GHz, **el número de mensajes en el enlace de bajada está limitado a 4 mensajes por día.**

Aunque el número de paquetes que se pueden transmitir en *uplink* y *downlink* pueden parecer una limitación, también ayuda a extender la vida útil de los dispositivos, ya que se hace un uso eficiente de la energía en las baterías.

2.3. La capa PHY

Sigfox usa una transmisión de banda ultraestrecha. La tecnología de transmisión y recepción planteada por Sigfox ha sido patentada.

Sigfox opera en la banda 868 Mhz en Europa, y 915 MHz en América, y usa un **ancho de banda de $B = 192$ KHz.**

La potencia máxima de transmisión, impuesta por las restricciones de la banda ISM, es de 14 dBm (acorde a la máxima potencia radiada permitida, según la regulación ETS 300-220).

La modulación usada en Sigfox es BPSK con una velocidad de transmisión de 100 bps.

El ancho de banda ocupado por la señal útil es, por lo tanto, de tan solo 100 Hz.

Es decir, el ancho de banda de cada señal útil es mucho menor que el ancho de banda total del sistema, que es de 192 KHz.

La novedad de la tecnología radica en que se usa un patrón de salto de frecuencias en las transmisiones. Dado que las señales son muy estrechas, se asume que sufren una respuesta frecuencial plana. A través de los múltiples saltos en frecuencia se consigue, por un lado, diversidad frecuencial para hacer la transmisión más robusta que, además, sirve como mecanismo de evasión de colisiones con otras transmisiones en curso simultáneamente. Cada paquete, eso sí, se transmite en una única frecuencia; los saltos se dan entre paquetes consecutivos.

Este tipo de salto de frecuencias implica usar osciladores con una elevada precisión, ya que para recibir la señal adecuadamente hay que sincronizar bien las frecuencias de transmisión y recepción de transmisor y receptor, respectivamente.

Se dice que un sistema es **UNB** (*ultra narrow band*) cuando la incertidumbre de la frecuencia es mayor que el propio ancho de banda de la señal transmitida.

2.4. La capa MAC

El mecanismo MAC inherente a la tecnología de capa PHY se llama RFTDMA (*random frequency and time division multiple access*). Los dispositivos transmiten dando saltos en frecuencia y, por lo tanto, evitando colisiones entre sus transmisiones. De algún modo, se trata de una variedad de ALOHA explotando diversidad frecuencial y temporal. La principal diferencia respecto a ALOHA es que la selección de la frecuencia no está limitada a un subconjunto predefinido, sino que se transmite en cualquier frecuencia dentro de la banda de trabajo.

Una de las motivaciones del uso de ALOHA es que, dado que Sigfox se ha diseñado para rangos de cobertura grandes, los diferentes tiempos de propagación entre dispositivos cerca y lejos de la estación base harían poco eficiente el uso de técnicas de escucha de canal, tipo CSMA.

Los beneficios de RFTDMA son:

- 1) No se consume energía en la escucha de canal.
- 2) No es necesario ningún tipo de sincronización temporal.
- 3) El oscilador en transmisión no debe ser complejo, ya que puede transmitir en cualquier frecuencia dentro de la banda de interés, sin importar en qué frecuencia exactamente transmite.

A pesar de todas las bondades, el hecho de usar un sistema ALOHA presenta limitaciones de escalabilidad, ya que en caso de tener muchos dispositivos, se pueden dar colisiones. Para mejorar la fiabilidad de las transmisiones, cada paquete se retransmite un número de veces; de este modo, si una réplica colisiona con otra transmisión, se puede recibir correctamente en siguientes retransmisiones.

Desde el punto de vista del receptor, este debe escuchar toda la banda de trabajo para poder recibir las transmisiones que se llevan a cabo en las diferentes frecuencias elegidas por los terminales. El proceso de demodulación requiere un algoritmo implementado en SDR (*software defined radio*), que forma parte de la propiedad intelectual protegida de Sigfox. Este algoritmo debe determinar en qué frecuencias se ha transmitido y obtener los mensajes transmitidos en cada frecuencia. El proceso se basa en el uso de un bloque de FFT (*fast fourier transform*) seguido de un detector de nivel que permite «barrer» todas las frecuencias y saber en cuáles se detecta una señal transmitida. Una vez que se detecta una señal en una frecuencia concreta, se usa un demodulador BPSK tradicional.

Si el receptor tiene que transmitir información en el canal de bajada, el *downlink*, lo hace usando la misma frecuencia en la que ha recibido un mensaje en el *uplink*. De este modo, el dispositivo Sigfox se ahorra procesos de sincronización de portadora para recibir mensajes en el *downlink*.

Cada paquete transmitido en el *uplink* tiene la siguiente estructura:

- Preámbulo de 4 bytes.
- Sincronización de trama de 2 bytes.
- Identificador de dispositivo: 4 bytes.
- *Payload* de 12 bytes.
- Un código *hash* para autenticar que se trata de un paquete Sigfox (longitud variable).
- *Cyclic redundancy check* (CRC) de 2 bytes, para seguridad y detección de errores.

2.5. Rango de cobertura

El rango de cobertura de las transmisiones depende, generalmente, de la potencia de transmisión, el canal, la interferencia y el nivel de ruido.

Considerando visión en línea directa, LOS, y sin interferencias, el nivel de ruido N , expresado en dB, vendría dado por:

$$N = -174 + NF + 10 \cdot \log(B), \quad (1)$$

siendo B el ancho de banda del sistema y NF la figura de ruido del receptor. En el caso de Sigfox, $N = -154 + NF$ dBm.

Por lo tanto, en espacio libre y asumiendo que la ganancia de las antenas puede compensar el factor de ruido del receptor, la relación señal a ruido quedaría como:

$$SNR = P_r - N = T_x + 132 - 20 \log\left(\frac{r}{\lambda}\right), \quad (2)$$

donde P_r es la potencia recibida, T_x la potencia en transmisión, r el rango de cobertura, y λ la longitud de onda de la frecuencia portadora.

Considerando como ejemplo práctico un umbral de SNR de 8 dB y un margen de enlace de 4 dB, la potencia recibida mínima es de $P_r \geq -142$ dBm.

Dada la potencia de transmisión máxima permitida en la banda ISM, 14 dBm en Europa (21,7 dBm en América), el rango teórico ideal de Sigfox es de 63 km en comunicaciones terrestres. Por lo tanto, el uso de técnicas de UNB es muy apropiado para comunicaciones de largo alcance, limitadas por la visión del horizonte terrestre.

2.6. El modelo de negocio de Sigfox

Sigfox plantea un modelo de negocio tipo operador de telefonía móvil. El usuario de esta tecnología tan solo debe adquirir un dispositivo con capacidad de comunicación Sigfox y darse de alta en el servicio.

En el momento en el que se vincula un dispositivo con el servicio Sigfox, ya se tiene conectividad. Se trata de un caso de *connectivity-as-a-service* (CaaS) ofrecido por Sigfox.

Por lo tanto, el coste de adquisición consiste en el coste de adquisición de los dispositivos *Sigfox-ready*, y el coste de operación es una tarifa anual fija por dispositivo.

El usuario final no debe preocuparse por la instalación y mantenimiento de la red, a costa de perder el control total sobre los datos que se transmiten en la red.

Para cada caso particular, es necesario valorar si este modelo de negocio es el adecuado o no.

3. LoRa

3.1. Introducción

LoRa es una tecnología de redes LPWA desarrollada y patentada por la empresa francesa Cycleo, que fue adquirida por **Semtech** en el 2012.

Formalmente, el término «**LoRaWAN**» hace referencia a la especificación completa de la tecnología (protocolos de comunicación), mientras que el término «**LoRa**» hace referencia a la especificación de la capa física.

A pesar de esta terminología formal, en la práctica y fuera de entornos formales y altamente técnicos, el término **LoRa** suele usarse para referirse a la tecnología en su conjunto.

La *LoRa Alliance* es una alianza de fabricantes de módulos, productos, operadores y distintos actores del IoT, formada en marzo del 2015, cuyos objetivos son:

- 1) **Definir y estandarizar** la especificación LoRaWAN para favorecer el despliegue masivo de redes del IoT.
- 2) **Promover el uso** y la **comercialización** de dispositivos que usen LoRa para ofrecer conectividad a través de LoRa.
- 3) Ofrecer un **programa de certificación** para garantizar que los dispositivos de diferentes fabricantes podrán ser compatibles unos con otros.
- 4) Asegurar que será posible el **roaming** entre diferentes redes LoRaWAN, independientemente del operador de red.

La especificación de LoRaWAN está diseñada para redes de «cosas», alimentadas con baterías, y que requieren conectividad local, regional, nacional y global. La tecnología LoRaWAN satisface los requisitos de un gran número de aplicaciones del IoT, tales como comunicación bidireccional, movilidad, gran rango de cobertura, ultrabajo consumo de energía e incluso servicios de localización basados en la comunicación radio, sin necesidad de tecnologías como GPS, que suelen estar asociadas a grandes consumos de energía.

Más información

Se puede consultar la información de la LoRa Alliance en este enlace:
<https://www.lora-alliance.org/>

Según la LoRa Alliance, las claves del éxito de LoRAWAN son y serán:

- 1) Una tecnología abierta, sin protecciones y disponible para todos.
- 2) Un ecosistema dinámico y abierto, ofrecido por la alianza.
- 3) Un sistemático proceso de certificación y validación de productos.

Echando la vista atrás, y evaluando las tecnologías que han tenido mayor éxito comercial, es cierto que se trata de ingredientes para la fórmula del éxito. De todos modos, son seguramente condiciones necesarias, pero no suficientes para garantizar el despliegue masivo de la tecnología LoRa.

Ciertamente, el hecho de que Sigfox sea una tecnología propietaria dominada por la propia empresa francesa en modo «monopolio» genera una cierta desconfianza a la hora de apostar por soluciones a largo plazo. En este sentido, la alternativa propuesta por LoRa es menos arriesgada estratégicamente hablando; si un operador no ofrece una buena calidad de servicio, es posible cambiar a otro operador sin necesidad de sustituir todos los dispositivos e infraestructura de red. Esto no sucede con Sigfox.

3.2. Descripción de la tecnología

La tecnología LoRa se basa en el despliegue de redes dedicadas para el IoT. Para tener conectividad LoRa, es necesario desplegar una infraestructura dedicada y, luego, conectar dispositivos. Sería equivalente al modelo del Wi-Fi corporativo o doméstico. Compramos un direccionador, lo conectamos a internet a través de un proveedor de servicios de internet y, posteriormente, el uso y la gestión de la red Wi-Fi son gratuitos y de gestión propietaria. El mismo modelo aplica a la tecnología LoRa.

De todos modos, al igual que sucede con Wi-Fi, existen operadores de LoRa que ofrecen esta conectividad como servicio, emulando el modelo de operación de Sigfox.

La tecnología LoRa ofrece mayores velocidades de transmisión de datos que Sigfox. Esta velocidad de transmisión es un parámetro configurable que depende del rango de cobertura y la longitud de los mensajes que hay que transmitir. Las velocidades de transmisión disponibles en LoRa oscilan entre los 0,3 kbps y los 50 kbps. Como en el caso de Sigfox, aunque las comunicaciones bidireccionales son posibles, se trata de una tecnología pensada, fundamentalmente, para satisfacer el enlace de subida.

La arquitectura típica de una red LoRa es en forma de estrella de estrellas (del término en inglés *star-of-stars*), y está compuesta por los siguientes elementos:

- 1) **Pasarelas:** que hacen de puente «transparente» entre los dispositivos y el servidor central de la red.

- 2) **Dispositivos finales (*end-devices*)**: equipados con sensores o actuadores, y que se comunican con el servidor central a través de pasarelas usando la modulación LoRa o modulación FSK.
- 3) **Servidor central**: instalado en el *back-end* y que ofrece, entre otros, los servicios de *adaptive data rate* (ADR) para ajustar las velocidades de transmisión y nivel de potencia de los dispositivos, con el objetivo de maximizar el tiempo de vida de la red.

Las pasarelas se conectan con el servidor vía conexiones IP tradicionales, mientras que los dispositivos se conectan a las pasarelas a través de la interfaz radio de LoRa, que describimos más adelante.

Aunque la comunicación suele ser bidireccional, la tecnología LoRa también acepta comunicaciones *multicast* y comunicaciones *broadcast* para hacer difusión de datos optimizando el uso del canal radio.

Como veremos más adelante, la tecnología se basa en técnicas de espectro ensanchado (no en tecnologías de banda estrecha, como era el caso de Sigfox), lo que permite la coexistencia de diferentes usuarios de manera simultánea.

Una de las características distintivas de LoRa es su protección en un ámbito de datos. La especificación de tecnología incluye tres niveles diferentes de seguridad, que permiten ofrecer distintos niveles de protección de los datos según las necesidades de cada aplicación en particular.

3.3. La capa PHY: LoRa Modulation

Los dispositivos LoRaWAN transmiten en cualquiera de los canales disponibles, saltando de canal en canal para cada transmisión diferente. Esto otorga diversidad en frecuencia similar a la ofrecida por Sigfox con su patrón de salto de frecuencias.

La duración de la transmisión, así como los periodos de *duty-cycling*, respetan las limitaciones impuestas por la banda ISM en cada región geográfica.

Al margen de la técnica de patrón de saltos, la modulación LoRa usa técnicas de espectro ensanchado basado en la modulación CSS (*chirp spread spectrum*). El uso de esta técnica para el IoT fue inicialmente desarrollado y patentado por la empresa francesa Cycleo, que fue adquirida por la empresa americana Semtech en el 2012. La tecnología LoRa combina la técnica CSS con modulaciones en frecuencia FSK.

La tecnología CSS se ha usado durante muchos años en el ámbito de la tecnología RADAR. Aunque su uso para comunicaciones se propuso en el año 1962, en la práctica no ha recibido mucha atención hasta la llegada de LoRa.

En contraposición con la tecnología UNB de Sigfox, como hemos visto antes, la transmisión CSS ocupa un gran ancho de banda, mucho mayor del estrictamente necesario para las tasas de bits por segundo que se utilizan. Se podría considerar como una subcategoría de la técnica *DSSS* (*direct sequence spread spectrum*), que aprovecha la diversidad de frecuencia controlada para recuperar señales muy débiles, incluso por debajo del nivel de ruido.

Por lo tanto, comparado con las transmisiones de banda estrecha, la técnica *DSSS* permite recibir señales con muy bajo nivel de potencia, lo que permite largos rangos de cobertura, a costa de ofrecer tasas de transmisión de datos bajas. Por lo tanto, sus especificaciones son adecuadas para un gran número de aplicaciones del IoT y, por lo tanto, de la industria 4.0.

Generalmente, usando *DSSS*, la señal de interés se «ensancha» con una secuencia pseudoaleatoria. Cada símbolo se divide en F *chirps* de más corta duración, siendo F el factor de ensanchamiento (*spreading factor*). Generalmente, el valor de F se elige dentro de un *set* predefinido, y no puede ser cualquier valor fuera de ese *set*. Dado que el receptor conoce este *set* de posibles secuencias, en recepción puede aplicar un banco de correladores que permita identificar la secuencia con la que se transmitió el mensaje por parte del emisor.

En el caso de CSS, el ensanchamiento de la señal no se hace con una secuencia aleatoria discreta. En este caso, el efecto de ensanchamiento de la señal se logra a través de una variación continua de la frecuencia portadora. En el caso de CSS, aunque los *chirps* no se corresponden con una secuencia temporal discreta física, se sigue utilizando el nombre de *chirp* para mantener la analogía con DSS.

En LoRa, el factor de ensanchamiento (SF) se define como:

$$2^{SF} = \frac{B}{R_S} = B \cdot T, \quad (3)$$

donde B es el ancho de banda de la señal ensanchada, R_S es la tasa de transmisión de símbolos, y $T = 1/R_S$ es la duración del *chirp*. El *chirp* es el elemento básico de la modulación CSS.

En el caso de LoRa, que usa *chirps* lineales, la frecuencia instantánea de la señal varía según:

$$f(t) = f_c + \mu \frac{B}{T} \cdot t, \quad (4)$$

donde f_c es la frecuencia central, y μ es un valor que alterna entre $-1,1$ según el valor del *chirp* (*up-chirp* o *down-chirp*).

Por lo tanto, B corresponde a la ocupación espectral de la señal que también se corresponde con la máxima y mínima variación de la frecuencia portadora de la señal.

Usando esta técnica, la frecuencia varía de forma lineal con el tiempo, mientras que la fase lo hace de forma cuadrática con el tiempo.

En el receptor, se usan dos propiedades:

- 1) La multiplicación de dos *up-chirps* (o dos *down-chirps*) genera un *up-chirp* (o *down-chirp*, respectivamente).
- 2) La multiplicación de dos *chirps* de sentidos opuestos genera un pico estrecho al doble de la frecuencia portadora.

Usando estas propiedades en la demodulación en el receptor, la modulación CSS permite transmitir un bit por *chirp*.

En el caso particular de las redes LoRa, la aplicación de CSS es algo más compleja y evolucionada de lo que se ha explicado hasta ahora, pero se fundamenta en estos principios.

De entrada, **el SF puede ser 12 o 7**, y permite enviar 12 o 7 bits por *chirp*. Para ello, durante un periodo de *chirp*, se define para cada uno de los 2^{SF} símbolos una trayectoria específica de la frecuencia portadora. Con este fin, la frecuencia varía a partir del símbolo que se va a modular. Por lo tanto, cada *chirp* codificado se obtiene a través de un desplazamiento cíclico del *chirp* de referencia. Esto introduce saltos bruscos en la frecuencia portadora.

Los **anchos de banda** contemplados en LoRa son:

- En la banda de 900 MHz, usa 125, 250 y 500 kHz.
- En las bandas de 480 MHz y 160 MHz, usa 7.8, 10.4, 15.6, 20.8, 31.2, 41.7, y 62.5 kHz.

En LoRa, la tasa de *chirp* se mantiene constante, así que la duración de los *chirps* varía en función del SF. Un SF implica un *chirp* de mayor duración. Por lo tanto, la velocidad de transmisión de bits se calcula como:

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}}. \quad (5)$$

Por lo tanto, varía desde una **velocidad mínima de 22 bits/segundo** (con $B = 7,8$ kHz y $SF = 12$) hasta una velocidad máxima de **24 kilobits/segundo** (con $B = 500$ kHz y $SF = 7$).

Este rango de libertad permite ajustar los parámetros de transmisión según las condiciones del canal radio. En concreto, los dispositivos muy lejanos del receptor transmitirán con un valor de SF muy alto, mientras que los más cercanos podrán transmitir con SF bajo.

Si el modo de AMC (*adaptive modulation and coding*) está activo, un terminal LoRa puede ajustar:

- 1) *Spreading factor* (SF).
- 2) El ancho de banda ocupado.
- 3) La potencia de transmisión.

Esto permite definir el consumo de energía de los terminales, así como el rendimiento global de la red de comunicación.

3.4. La capa MAC: LoRa MAC

La especificación de LoRaWAN define tres tipos de dispositivos en función de cómo se gestiona el enlace de bajada de los datos (de la pasarela a los dispositivos).

La clase A es la mínima obligatoria que todo dispositivo certificado LoRaWAN debe cumplir. Las otras dos clases son opcionales, y deben ser compatibles con dispositivos de clase A.

Las clases se definen según:

- 1) **Clase A (comunicación bidireccional)**: la comunicación se inicia siempre por el dispositivo, usando el protocolo **ALOHA** en el enlace de subida. Una transmisión en el enlace de subida va seguida de dos ventanas cortas de recepción en el enlace de bajada. Esta es la clase de dispositivo adecuada para aplicaciones limitadas en consumo de energía por parte de los dispositivos y en los que el canal de *downlink* solo va a estar disponible inmediatamente después del enlace de subida.
- 2) **Clase B (Comunicación bidireccional con recursos programados)**: además de la funcionalidad de la clase A, que se mantiene igual, en este caso, la pasarela transmite periódicamente unos *beacons* de control que permiten sincronizar temporalmente los dispositivos. La pasarela asigna *slots* de enlace de subida y enlace de bajada para los dispositivos, de modo que añade cierto grado de determinismo a la componente aleatoria de la clase A.

3) **Clase C (comunicación bidireccional con canal de bajada continuo)**: estos tipos de dispositivos están siempre escuchando el canal de enlace de bajada, excepto cuando están transmitiendo. Tienen poca latencia, pero un consumo de energía más elevado.

En la comunicación de clase A y la clase B, son los dispositivos los que inician la comunicación en el enlace de subida. En este caso, cuando se quiere transmitir, los dispositivos eligen pseudoaleatoriamente un canal de comunicación disponible y ejecutan un *listen before talk* (LBT) para determinar si el canal está libre. Si es así, se inicia una transmisión usando los valores predeterminados de SF (factor de ensanchamiento) y de B (ancho de banda). Sin embargo, si el dispositivo necesita comprobar el estado de la conexión, se transmite un trama corta, de 17 bytes, usando primero SF = 8, luego SF = 10, y luego SF = 12. La pasarela notifica la calidad del enlace para determinar los mejores parámetros de transmisión.

Además, para mejorar la fiabilidad de las comunicaciones, se ejecuta un sistema de retransmisiones.

Los paquetes que se transmiten por la interfaz radio tienen la siguiente estructura:

- Un preámbulo de 12 *chirps*.
- Una cabecera opcional de 4 a 8 bytes.
- Un *payload* de información útil de hasta 255 bytes.
- Un CRC de 2 bytes calculado según el *payload*.

3.5. Rango de cobertura

Como en el caso de Sigfox y las comunicaciones UNB, primero evaluamos el nivel de ruido. Para una señal CSS ocupando un ancho de banda B, el nivel de ruido es:

$$N = 174 + NF + 10 \cdot \log_{10}(B), \quad (6)$$

con $125 \text{ kHz} \leq B \leq 500 \text{ kHz}$ en la banda de 900 MHz.

Por lo tanto, en espacio libre, el *link budget* es:

$$SNR = T_x + 132 - 20\log(r/\lambda) + 2,5 \cdot SF. \quad (7)$$

El rango teórico de cobertura aproximado de LoRa es de unos centenares de kilómetros; en la práctica, el rango de cobertura suele ser de unos 22 km como máximo. **En cualquier caso, este tipo de modulación ofrece rangos de cobertura superiores al alcanzado con las técnicas UNB.**

Además de las pérdidas de propagación, la señal LoRa se ve afectada por dos tipos de interferencia:

- 1) Señales no-LoRa.
- 2) Señales Lo-Ra.

El segundo caso se da si dos o más dispositivos transmiten usando el mismo SF, en la misma frecuencia, y al mismo tiempo. En este caso, si no se da el efecto captura (una de las dos señales se recibe con mucho más nivel de señal que la otra y, por lo tanto, se puede decodificar), ninguna de las dos señales se puede decodificar.

3.6. El modelo de negocio de LoRa

Así como Sigfox plantea un modelo de negocio con una tecnología cerrada y un modelo de «operador de comunicaciones tradicional», el caso de LoRa es diferente.

La especificación de LoRa es un documento abierto y se conocen todos los detalles de la tecnología. De este modo, diferentes fabricantes ofrecen tanto dispositivos LoRa como pasarelas LoRa.

Para cada aplicación, es necesario desplegar una red de comunicaciones dedicada que permita establecer enlaces entre los dispositivos y la infraestructura de red.

En este caso, el coste de adquisición consiste en el coste de adquisición de los dispositivos y de los equipos de red. El uso de la tecnología es gratuito, pero es necesario cubrir los costes de mantenimiento y operación de la red.

Además, el control sobre la red y sus datos es total por parte de quien despliega la red.

Claramente, el modelo de LoRa es diferente del modelo de Sigfox, y la decisión de una tecnología u otra, además de por criterios técnicos, debe conducirse también a partir de criterios estratégicos fundamentados en los modelos de negocio que plantean una y otra.

4. Otras alternativas

Además de Sigfox y LoRa que, hoy día, son las tecnologías dominantes en el mercado, existen otras tecnologías emergentes que vale la pena comentar. Entre ellas, destacamos dos:

- 1) *Weightless*
- 2) RPMA

En los siguientes apartados, detallamos un poco más estas tecnologías.

4.1. Weighthless

Weightless SIG es una organización que promueve estándares de comunicación para el IoT. Estos estándares se basan en la tecnología desarrollada por la empresa británica Neul, adquirida por Huawei en el 2014.

Hay tres variantes de los estándares:

- 1) Weighthless-N.
- 2) Weighthless-P.
- 3) Weighthless-W.

Aunque cada uno de ellos tiene como objetivo mercados diferentes, todos apuntan a aplicaciones de bajo coste, con rangos de cobertura grandes, y bajos consumos de energía por el lado de los dispositivos IoT.

Weighthless-N se basa en una tecnología de banda estrecha, usando BPSK diferencial (DBPSK) y usada, fundamentalmente, en la tecnología Nwave. Las tasas de transmisión van de 30 a 100 Kbps, y también se transmite en las bandas subGhz de 868 MHz. El rango de cobertura es de unos 5 km en entornos urbanos. Esta tecnología usa *frequency hopping* para combatir las interferencias y los efectos del *fast fading* del canal radio. Este estándar está diseñado para comunicaciones unidireccionales en el enlace de subida, a muy bajo coste.

Weighthless-P mejora la versión anterior, ya que ofrece enlaces bidireccionales. Esto permite mejorar la fiabilidad de la comunicación, pues introduce el intercambio de paquetes de ACK entre transmisor y receptor, por ejemplo. El acceso múltiple se hace

combinando FDMA con TDMA en canales estrechos de 12,5 kHz. Por lo tanto, las estaciones base se sincronizan con los dispositivos para asignar *slots* de transmisión. En este caso, el rango de cobertura es inferior al anterior, y es de unos 2,5 km en entornos urbanos.

Weighthless-W se basa en el uso de comunicaciones en los espacios en blanco (*white spaces*). La idea se origina en la voluntad de usar los espacios libres que existen entre los canales de televisión y los canales que no se usan a todas horas; los llamados espacios en blanco del espectro radioeléctrico. La modulación varía entre 16-QAM y DBPSK, y transmite en la banda entre 470 y 790 MHz. Además, la tecnología define técnicas de espectro ensanchado, con factores de ensanchado dinámicos de hasta 1024, lo que permite adaptar la transmisión a las condiciones del entorno. En este caso, la transmisión en el enlace de bajada tiene 20 dB más de margen que la transmisión en el enlace de subida, además de que el canal de bajada tiene 64 veces más ancho de banda que el enlace de subida. La separación entre enlace de subida y de bajada se hace mediante duplexación temporal. El rango de cobertura *indoor* es de aproximadamente 5 km, mientras que el *outdoor* puede llegar hasta 10 km.

4.2. RPMA

RPMA significa, en inglés, *random phase multiple access*. Es una tecnología desarrollada por la empresa On-Ramp Wireless. Se trata de una empresa norteamericana fundada en el 2008 para ofrecer conectividad en los mercados del petróleo y el gas. En el 2015, cambió de nombre para llegar a más mercados del IoT; hoy día, se conoce como **Ingenu**.

La tecnología RPMA se basa en DSSS y las transmisiones se hacen en la banda de 2,4 Ghz. Los datos primero se codifican con una tasa de 1/2, y luego se entrelazan. El resultado se modula con una modulación DBPSK y después se multiplica por una secuencia Gold para su ensanchamiento espectral.

El ensanchamiento espectral se hace con factores de ensanchamiento de 2_k , siendo $2 \leq k \leq 13$. Es decir, cada vez que se dobla el SF, se obtiene una ganancia de 3 dB. Esto permite adaptar la configuración a las condiciones de propagación.

Las transmisiones en el enlace de subida y las transmisiones *broadcast* en el enlace de bajada se hacen con un único código Gold.

En las transmisiones *unicast* en el enlace de bajada, el código Gold se construye usando el ID del dispositivo de destino; esto permite que ningún otro dispositivo pueda recibir la información transmitida.

Tanto *uplink* como *downlink* se implementan usando *half-duplex*, alternando periodos de *up* y *downlink* de 2 segundos. Esto permite adaptar dinámicamente el factor de

ensanchamiento a las condiciones de propagación, dependiendo del nivel de señal recibida.

Dado que la estación base no suele tener grandes limitaciones de energía, es habitual que las transmisiones en el *downlink* usen valores de espectro ensanchamiento menores que en el enlace de subida.

A partir de la técnica MAC usada para gestionar múltiples dispositivos simultáneos, Ingenu indica que se pueden servir hasta 1.000 dispositivos simultáneos en cada *slot* de transmisión usando la técnica *DSSS*.

Resumen

Las redes LPWA han emergido en los últimos años como consecuencia de que no hubiese, antes de las mismas, una tecnología de comunicaciones que fuera eficiente para transmitir:

- 1) Pocos datos y muy infrecuentes.
- 2) A muy larga distancia.
- 3) A bajo coste.
- 4) Con un bajo consumo de energía.

Ni las redes celulares tradicionales definidas por el 3GPP (explicadas en detalle en el próximo módulo), ni las tecnologías estándar que operan en bandas ISM (Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee, etc., descritas en el material «Sistemas de comunicación en la banda ISM») ofrecen este tipo de conectividad.

La respuesta ha venido por parte de pequeñas empresas privadas que han promovido una tecnología sencilla, capaz de ofrecer las soluciones deseadas. Los dos ejemplos más relevantes hoy día son la tecnología Sigfox, de la misma empresa Sigfox, y la tecnología LoRaWAN, promovida por la LoRa Alliance.

En muy poco tiempo, han creado (y siguen fortaleciendo) un ecosistema internacional que ha provocado que el 3GPP haya definido un nuevo estándar en tiempo récord: el *narrow band IoT* (NB-IoT), que describimos en el módulo siguiente. NB-IoT surge como la respuesta de los principales operadores ante la «amenaza» que suponen las emergentes redes LPWA que operan en espectro ISM usando tecnologías propietarias.

Una de las claves de las redes LPWA es trabajar en bandas subGHz, de modo que se logran largos rangos de cobertura y buena penetración en edificios y subsuelos. Esto permite, por ejemplo, tener conectividad en medidores de consumo instalados en sótanos de edificios o, por ejemplo, la instalación de sensores de aparcamiento bajo el propio asfalto. La cantidad de aplicaciones puede ser realmente grande y disruptiva.

Hemos visto que existen dos alternativas muy diferenciadas respecto al uso del espectro radioeléctrico:

- 1) Tecnologías de **banda estrecha**, que permiten evitar interferencias. Este es el caso de la tecnología de Sigfox.
- 2) Tecnologías de **espectro ensanchado**, que permiten ajustar la velocidad de transmisión según el factor de ensanchamiento. Este es el caso de la tecnología LoRaWAN.

En cualquier caso, todas las tecnologías disponibles ofrecen comunicación bidireccional, lo cual es fundamental para poder capturar datos a través de sensores, pero también enviar comandos de actuación o confirmación de recepción de paquetes, de modo que la comunicación se hace muy fiable.

La tabla 1 resume las especificaciones de las principales tecnologías LPWA disponibles hoy día para la industria 4.0.

Tabla 1. *Comparison of main LPWA Technologies*

| | SIFGOX | LoRa | Weighthless N | Weighthless P | Weighthless W | Ingenu |
|-----------------------|---------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------|
| ISM Band | 868/915 MHz | 868/915 MHz | SubGHz | SubGHz | 470-970 MHz (NO ISM) | 2,4 GHz |
| Capa física | UNB | CSS | NB | NB | DSSS | RPMA |
| Ancho de banda | 192 kHz | 125-500 kHz | Dato No disponible | 12,5 kHz | 6-8 MHz | 1 MHz |
| Tasa datos | 0,1 kbps | 0,37-27 kbps | 30-100 kbps | 0,2-100 kbps | 1-1000 kbps | 0,06-30 kbps |