
Sistemas de comunicación en la banda ISM

PID_00247330

Jesús Alonso-Zárte

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 3 horas



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. Introducción a las bandas libres de licencia: ISM	7
1.1. Definición de las bandas ISM	7
1.2. Asignación de frecuencias de las bandas ISM	7
1.3. Tecnologías que usan las bandas ISM	9
2. RFID	10
2.1. Introducción	10
2.2. Estándares RFID	11
2.3. Banda de frecuencias, ancho de banda, y canales	12
2.4. Ejemplos de uso	13
3. Bluetooth y Bluetooth Low Energy	16
3.1. Introducción	16
3.2. Estándares relacionados	16
3.3. Descripción de la tecnología	18
3.4. Principales especificaciones técnicas	19
3.5. Ejemplos de uso	19
4. IEEE 802.15.4	21
4.1. Introducción	21
4.2. Estándares relacionados	22
4.3. Descripción de la tecnología	23
4.4. Principales especificaciones técnicas	24
4.5. Ejemplos de uso	25
5. IEEE 802.11	26
5.1. Introducción	26
5.2. Estándares relacionados	26
5.3. Descripción de la tecnología	28
5.4. Principales especificaciones técnicas	30
5.5. Ejemplos de uso	30
Conclusiones	31
Resumen	33

Introducción

Existen unas tecnologías de comunicación por radio que permiten transmitir voz y/o datos a distancia usando bandas de frecuencia, por cuyo uso no hay que pagar ningún tipo de licencia.

En este material, introducimos el concepto de bandas libres de licencia, las bandas ISM, para uso industrial, científico y médico, y describiremos las principales tecnologías de corto y medio alcance disponibles comercialmente que usan estas bandas de frecuencia.

En concreto, presentaremos las tecnologías:

- 1) RFID.
- 2) Bluetooth y Bluetooth Low Energy (BLE).
- 3) Tecnologías basadas en el estándar IEEE 802.15.4 (Zigbee y variantes).
- 4) Tecnologías basadas en el estándar IEEE 802.11 (Wi-Fi y variantes).

Objetivos

Los objetivos de este material son:

- 1) Conocer la existencia de las bandas de frecuencia libres de licencia.
- 2) Conocer las bandas ISM.
- 3) Conocer la tecnología RFID.
- 4) Conocer la tecnología Bluetooth y Bluetooth Low Energy.
- 5) Conocer la tecnología basada en el estándar IEEE 802.15.4.
- 6) Conocer la tecnología basada en el estándar IEEE 802.11.
- 7) Adquirir un pensamiento crítico para poder comparar tecnologías diferentes y comprender sus puntos fuertes y débiles, así como su aplicabilidad en los sistemas ciberfísicos y la industria 4.0.

1. Introducción a las bandas libres de licencia: ISM

1.1. Definición de las bandas ISM

Como se detalló en el material «Radiocomunicaciones», el uso del espectro radioeléctrico para comunicaciones a distancia está regulado por los gobiernos nacionales. De este modo, los operadores de telefonía móvil, por ejemplo, deben pagar grandes cantidades de dinero para la explotación comercial de determinadas bandas de frecuencia.

Sin embargo, existen unas bandas de frecuencia, **reservadas internacionalmente**, que están libres de licencia. Estas bandas se pueden usar para objetivos no comerciales y, aunque no hay que pagar por usarlas, sí fijan unas condiciones de buen uso para garantizar la posible coexistencia de distintos sistemas. Aunque popularmente se llaman «bandas no reguladas», realmente sí están reguladas; lo que sucede es que están habilitadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas, sujetas a ciertas normas de buen uso.

Estas son las **bandas ISM**, siglas de del inglés: *industrial, scientific and medical*. Se pueden utilizar para usos industriales, científicos y experimentales, y para aplicaciones médicas.

1.2. Asignación de frecuencias de las bandas ISM

Las bandas ISM las determina la International Telecommunication Union (ITU) en los puntos 5.138 y 5.150 de las regulaciones radio (RR).

Para cada una de las bandas ISM definidas, se detallan, entre otros, los siguientes parámetros:

- 1) **Frecuencia central.**
- 2) **Frecuencia mínima.**
- 3) **Frecuencia máxima** (junto con la frecuencia mínima, se define el **ancho de banda** de cada banda de frecuencias).
- 4) **Región geográfica** de disponibilidad.
- 5) **Usos permitidos**; tipos de aplicaciones permitidas en cada banda.

6) **Máxima potencia ERP (*effective radiated power*)**: la potencia ERP es la potencia de salida del transmisor, más la ganancia de la antena, menos la atenuación y pérdidas que existen entre el transmisor y la antena. Por ejemplo, un transmisor puede tener una salida de 20 mW (13 dBm) y estar conectado a una antena direccional con ganancia de 9 dB. El cable coaxial que conecta la salida del transmisor con la antena y los conectores induce unas pérdidas de -3 dB. En este caso, el valor de la ERP es de $13dB - 3dB + 9dB = 19dBm$ (79,5 mW). Este es el valor que se usa para determinar la máxima potencia permitida en las bandas ISM.

7) **Máximo tiempo de uso (*duty cycle*)**: el *duty cycle* se define como el porcentaje del tiempo que se emite radiación electromagnética. Por ejemplo, un *duty cycle* de un 10 % implica que un sistema de comunicaciones puede estar activamente transmitiendo en el canal durante 6 minutos cada hora (60 minutos).

Estas normas se aplican por regiones; las regiones definidas por la ITU para gestionar el espectro radioeléctrico son 3:

- 1) **Región 1**: Europa, África, la antigua Unión Soviética, Mongolia, y la parte oeste de Oriente Medio, incluyendo Irak.
- 2) **Región 2**: América, Groenlandia, y las islas del este del Pacífico.
- 3) **Región 3**: Asia (toda la parte no incluida en región 1) y Oceanía.

A partir de esta separación geográfica, las bandas ISM más relevantes de uso para las comunicaciones en la industria 4.0 son:

- 1) Banda centrada en **13,56Mhz**, definida entre 13,553 MHz y 13,567 MHz, disponible en todo el mundo.
- 2) Banda centrada en **27,12 MHz**, definida entre 26,957 MHz y 27,283 MHz, disponible en todo el mundo.
- 3) Banda centrada en **433,92 MHz**, definida entre 433,05 MHz y 434,69 Mhz, disponible solo en la región 1 y bajo aceptación de gobiernos locales.
- 4) Banda centrada en **915 MHz**, definida entre 902 MHz y 928 MHz, disponible solo en la región 2, con algunas excepciones.
- 5) Banda centrada en **2,45 Ghz**, definida entre 2,4 y 2,5 Ghz, disponible en todo el mundo.
- 6) Banda centrada en **5,8 Ghz**, definida entre 5,725 GHz y 5,875 GHz, disponible en todo el mundo.
- 7) Banda centrada en **61,25 Ghz**, definida entre 61 Ghz y 61,5 Ghz, disponible en todo el mundo pero sujeta a aprobación nacional.

A estas bandas ISM se les une la **banda centrada en 868 Mhz**, que cubre el espectro desde 863 Hz hasta 870 MHz. Esta banda ha sido reservada **solo en Europa** para uso sin licencia y bajo las condiciones de usar espectro ensanchado (por salto de frecuencia, FHSS, o por secuencia directa, DSSS), o bien *duty cycles* de 0,1 %, 1 % o 10 % (dependiendo de la porción concreta que se usa del espectro), o técnicas de *listen before talk* (LBT) con técnicas de agilidad de frecuencia adaptativa (AFA). La banda de 868 MHz, junto con la de 433 MHz y la de 915 Mhz es, por ejemplo, la usada por la DASH7 Alliance para aplicaciones de RFID.

1.3. Tecnologías que usan las bandas ISM

Las bandas de frecuencia ISM son usadas por multitud de tecnologías susceptibles de ser aplicadas en la industria 4.0, tales como:

- 1) RFID (*radio frequency identification*).
- 2) Bluetooth.
- 3) Wi-Fi.
- 4) Zigbee.
- 5) Las redes LPWA tipo Sigfox o LoRa.
- 6) Tecnologías celulares definidas por el 3GPP.

En los siguientes apartados, describiremos brevemente las tecnologías que podrían considerarse más relevantes en la visión de la industria 4.0. En cada caso, se razonarán sus posibles aplicaciones y se presentarán algunos detalles técnicos que son necesarios comprender para poder definir un criterio que nos permita seleccionar una tecnología u otra según las necesidades de cada aplicación específica.

2. RFID

2.1. Introducción

RFID son las siglas de *radio frequency identification*, en español, identificación por radiofrecuencia. Un sistema RFID se compone de al menos un lector, numerosas etiquetas (*tags*), que se pueden identificar vía radiofrecuencia, y un sistema de codificación de los objetos que hay que identificar.

La tecnología RFID se podría considerar como una evolución del código de barras. El código de barras tradicional es un sistema que permite leer códigos de 1 y 0, representados gráficamente con las barras, con un lector de rayos infrarrojos. Para que los códigos de barras funcionen, es necesario que el lector apunte directamente al código, sin obstáculos de por medio, y a muy corta distancia. Los códigos QR (*quick response*) son una extensión de los códigos de barras en 2 dimensiones. RFID es una alternativa que supera las limitaciones de la tecnología de identificación basada en rayos infrarrojos.

En el caso de RFID, no es necesario que haya visibilidad directa con el *tag* y el lector y, además, la tecnología permite la identificación aunque haya obstáculos de por medio.

En un sistema por RFID, los elementos que permiten ser identificados desde un lector se llaman *tags*. Es decir, el tradicional código de barras negras y blancas se sustituye por un circuito electrónico muy pequeño con una antena integrada, llamado *tag*. Estos *tags* se adhieren al objeto que se desea identificar.

Los *tags* pueden ser **activos** o **pasivos**:

1) **Tags pasivos**: no utilizan batería. Constan de una bobina; la mínima corriente inducida por el lector sobre la bobina da energía al *tag* para transmitir una respuesta a **corta distancia** (entre 10 cm y pocos metros, según la frecuencia, el diseño y la antena de los *tags*). Los *tags* pasivos son capaces de emitir una respuesta cuando son interrogados por un lector, haciendo uso de la propia energía de la señal recibida (señal de excitación o interrogadora) que pregunta por la identificación. Esta *no necesidad* de una fuente de energía hace que los *tags* pasivos sean muy atractivos para el uso masivo en logística y automatización. Además, los *tags* pasivos pueden ser realmente pequeños. Dado su bajo coste, estos dispositivos tienen gran uso en aplicaciones de gran consumo.

2) **Tags activos**: disponen de una fuente externa de energía. Estos sistemas tienen un alcance mayor que los pasivos y mayor fiabilidad (menos errores de identificación),

aunque también tienen un mayor tamaño y son más caros, en general. Se pueden lograr rangos de cobertura mayores que en el caso de los *tags* pasivos, y cubrir incluso centenares de metros según la configuración y el entorno. Además, en estos sistemas activos, es posible dotar a los *tags* de mayor memoria, de modo que es posible almacenar más información que los *tags* pasivos. Su coste es mayor que en el sistema pasivo, y compromete su aplicación en el gran consumo, pero es una alternativa muy interesante en aplicaciones industriales para equipos de gran valor. Cabe destacar, además, que esta opción activa se comporta mejor en entornos poco favorables para la transmisión radio, como en presencia de líquidos o metales.

También existen los llamados *tags semipasivos*, igualmente denominados *semiactivos*, que se comportan como *tags* pasivos pero asistidos por batería para alimentar el microchip de procesamiento de datos, no para la transmisión en el proceso de identificación. Estos *tags* tienen tiempos de respuesta más cortos que los *tags* pasivos, y sus lecturas son, en general, más fiables que en la alternativa pasiva.

2.2. Estándares RFID

Hay dos grandes grupos de estandarización de la tecnología RFID:

- 1) La Organización Internacional de Estándares (**ISO**), junto con la International Electrotechnical Commission (**IEC**), que definen la serie de normativa ISO/IEC 18000.
- 2) **EPCglobal**), Electronics Product Code Global Incorporated, que define la norma UHF Gen2.

Además de estas dos grandes organizaciones, existen multitud de grupos que promueven otros estándares para el uso de RFID.

Por parte de la ISO, la serie de estándares estrictamente relacionada con las RFID y las frecuencias empleadas en dichos sistemas es la serie ISO/IEC 18000. Esta serie de estándares define, entre otras cosas, el formato de los datos y la interfaz radio para la identificación.

Por otro lado, EPCglobal es un consorcio creado por la European Article Numbering (EAN) International que promueve la estandarización y el uso de la tecnología RFID. EAN International es el organismo encargado de asignar un código electrónico de identificación a cada producto en el actual sistema de código de barras. El código actual más utilizado es el EAN-13, que identifica cada producto u objeto con 13 dígitos, entre 0 y 9, formando los códigos de barras.

La principal aportación del EPCglobal al proceso de estandarización de la RFID es la creación del **código electrónico de producto** o **EPC** (*electronic product code*). El EPC asocia una serie numérica unitaria e inequívoca de 24 dígitos (entre 0 y 9) a

cada objeto para ser identificado vía RFID. Los códigos EPC permiten almacenar más información de cada objeto de lo que el código de barras permite, tales como fecha de fabricación, lugar de fabricación, fecha de vencimiento, longitud, grosor, etc.

Con la utilización del EPC, se facilita el seguimiento de los productos a lo largo de la cadena de abastecimiento (*supply chain*) o el canal de distribución. La intención de esta creación fue promover un concepto de tecnología que pretendía cambiar la actual cadena de suministro con un estándar abierto y global, que permitiera la identificación en tiempo real de cualquier producto en cualquier empresa situada alrededor del mundo.

2.3. Banda de frecuencias, ancho de banda, y canales

Los sistemas de RFID pueden trabajar en varias bandas de frecuencia:

- 1) **125 KHz**: son las que tienen menos alcance (unos pocos centímetros) y se utilizan para identificar animales o, por ejemplo, en las llaves del coche como sistema de seguridad antes de arrancar el vehículo. Se pueden usar de forma global, sin necesidad de licencia.
- 2) **13 MHz**: de alcance intermedio, se emplean, por ejemplo, como sistema antirrobo en los libros de bibliotecas o para acceder a edificios. Se pueden usar de forma global sin necesidad de licencia.
- 3) **433 MHz, 868/915 MHz y 2,4 GHz**: son los que tienen más alcance (hasta unos 30 metros) y se utilizan, por ejemplo, para hacer el seguimiento de contenedores y pagar peajes sin detener el vehículo en su paso.

Las bandas más utilizadas hoy día en aplicaciones RFID son las de HF (13,56 MHz) y las bandas de UHF (868/915 Mhz).

Algunas características del sistema RFID que opera en la banda HF son:

- Frecuencia central de 13,56 MHz disponible en todo el mundo.
- Permite trazabilidad e identificación en un ámbito de ítem.
- Distancia de lectura corta (máximo 1,5 m) y dependiente de la medida del *tag*.
- Alta fiabilidad (cerca al 100 %) y campo de cobertura uniforme.
- Existe un estándar universal único.
- Posibilidad de utilizar *tags* pequeños.
- Insensible a la orientación del *tag*.
- Trabaja en ambientes con líquidos.
- Sensible al metal, pero puede trabajar en ambientes metálicos con ciertas limitaciones.
- Resistente a las interferencias eléctricas.
- Diversidad de *tags* en tamaño, forma y capacidad.

- Mayor tamaño de las antenas lectoras que las que operan en UHF.

A su vez, algunas de las características del sistema RFID que opera en la banda UHF son:

- Frecuencia central de 868 MHz en Europa y 915 MHz en Estados Unidos.
- Permite la identificación de palés y cajas.
- Distancia de lectura más larga que en el caso HF (3 m - 5 m).
- Bajo precio de los *tags*.
- Dimensiones reducidas de la antena lectora.
- Diversidad de *tags* en forma.
- Sensible a líquidos, personas y metales.
- Diferentes estándares de frecuencia (Estados Unidos - Europa - Asia).

2.4. Ejemplos de uso

Gracias a las buenas cualidades de la tecnología RFID para la identificación de objetos a través de los *tags*, la potencialidad de esta tecnología es muy grande, sobre todo en la industria 4.0 para hacer seguimiento de objetos en almacenes, por ejemplo, y para aplicaciones relacionadas con la **logística**.

Otro claro ejemplo, muy visual, es el del pago en caja de los supermercados. Hoy día, cuando pasamos por caja, la persona que está en la caja debe leer **uno por uno** los códigos de barras de los artículos que adquirimos. Esto hace el proceso **muy ineficiente y lento**. Cuando la tecnología RFID lo permita a un coste muy bajo, dejará de ser necesario retirar los objetos del carro, ya que el sistema de lectura basado en RFID podría leer todas las etiquetas al mismo tiempo sin necesidad de manipulación individual.

Se detallan a continuación algunos ejemplos concretos, aunque la variedad de aplicaciones es realmente grande y no es intención de este material presentar una lista exhaustiva de casos de uso:

1) **Etiquetado de libros en bibliotecas, biblioteca Bücherhallen de Hamburgo.**

Con el sistema basado en RFID, la biblioteca central y las diecisiete restantes de la ciudad de Hamburgo se benefician de un mejor servicio al cliente, al mismo tiempo que los trabajadores disponen de más tiempo para dedicar ayuda y apoyo a los clientes. Antes de implantar las soluciones de RFID, los trabajadores se encargaban de gestionar manualmente cada uno de los ítems de la biblioteca. Esto provocaba que valiosos recursos de personal estuviesen centrados en los procesos de préstamo de material o gestión del inventario, mientras que el servicio de atención al usuario que se proporcionaba era bastante pobre en lo que respecta a consultas de ubicación y otras recomendaciones. El sistema está formado por puertas de seguridad, estaciones de préstamo y devoluciones y un sistema de clasificación automático. También se

ha desarrollado todo el software necesario para integrar el sistema con la aplicación existente de gestión de la biblioteca. En enero del 2007, se habían adherido cerca de 300.000 etiquetas RFID a los libros, CD y otros artículos de la biblioteca Bücherhallen.

2) **Identificación de piezas de ropa, Marks&Spencer.** Los *tags* RFID se encuentran ubicados en unas etiquetas pegadas a las piezas de ropa. Estas etiquetas no van incrustadas a la ropa, sino que se pueden sacar. Los trabajadores de Marks&Spencer van equipados con lectores móviles RFID que permiten llevar a cabo inventario de stock en los diferentes departamentos de las tiendas. Los *tags* RFID tienen un tamaño de 12,7 cm de largo y son pegados a la ropa antes de salir de la fábrica, aunque son ilegibles hasta que llegan a la tienda. Los trabajadores utilizan lectores móviles con un rango de lectura de unos 70 cm que captura e identifica un número único para cada *tag*. La base de datos asocia este identificador con las características de talla, color y producto.

3) **Identificación de delincuentes en libertad condicional, Ministerio de Justicia de Taipéi.** Para identificar en todo momento a los delincuentes sexuales, el Ministerio de Justicia de Taipéi implantó una solución RFID consistente en colocar una pulsera RFID a las 7 personas con mayor probabilidad de reincidencia. El mecanismo impide que ellos mismos se puedan quitar la pulsera. La pulsera RFID avisa a la policía si los individuos abandonan su domicilio después de las 8 de la noche. Este horario responde a un toque de queda establecido por el Ministerio de Justicia de Taipéi a los ex presidiarios, que empieza a las 8 de la noche y se alarga hasta las 7 de la mañana. En esta franja horaria es cuando se cometen más actos violentos. En el caso de que alguna de las personas identificadas abandone el domicilio después de las 8 de la noche, un ordenador del Ministerio registrará el número de identificación de la pulsera RFID y enviará una señal a la policía para que localice a la persona.

4) **Identificación de personas en congresos,** como la solución de Softcongres. Para encontrar una solución que permitiese la identificación de las personas que asisten a un acto, congreso o acontecimiento en general, sin necesidad de molestarlas pidiéndoles la acreditación, se requería una manera de leer esta acreditación de un formato similar al de una tarjeta de crédito y que el usuario llevaría colgada. Con el uso de la tecnología RFID, se satisfacen todos estos requisitos. Cada persona lleva una identificación RFID con un formato similar a una tarjeta. Las instalaciones se preparan con antenas de paso RFID. Estas antenas deben ser móviles, ya que no estarán instaladas permanentemente en una misma ubicación. Las antenas están conectadas a través de un sistema Wi-Fi a una base de datos central donde se incluyen las fichas de las personas inscritas. Estas antenas identifican la tarjeta sin contacto ni visión, para permitir una identificación amable sin tener que pedir ninguna acreditación. El sistema permite, al mismo tiempo, registrar todos los movimientos, aparte de poder dar la bienvenida, o cualquier otra estadística, a través de una pantalla.

5) **Señalización accesible por RFID,** como el caso de Signaletics. El objetivo es facilitar a personas con discapacidad la identificación de la señalización en el entorno del edificio y de sus accesos, mediante el uso de señales electrónicas de tecnología RFID. A diferencia de las aplicaciones más habituales y generalizadas de la RFID, como son la identificación de objetos y de personas, en este proyecto se identifica con RFID una

señal y una posición en un edificio o entorno. De este modo, *tags* RFID especialmente diseñados son adosados al lado o cerca de la actual señalización del edificio, especialmente en las señales de indicación de evacuación de emergencia. El usuario lleva una PDA con lector RFID de largo alcance que, al acercarse a estas señales, las representa en imagen y voz para ser identificadas con su propio idioma. Además, también se identifica el punto en el que se encuentra la persona en el edificio. Los beneficios son una mayor independencia y privacidad para los usuarios, que no necesitan ya del guiado por parte de asistentes, ni les hace falta preguntar continuamente la ubicación de oficinas, lavabos y otros destinos habituales.

Actualmente hay cierto debate en cuanto a la **seguridad de los sistemas RFID**, ya que las etiquetas pueden invadir la intimidad de las personas. Por ejemplo, si compramos una camisa con una de estas etiquetas, la etiqueta delatará nuestra presencia en todos los lugares que dispongan de lectores de RFID. En este sentido, ya hay etiquetas que se pueden desactivar de manera permanente (como las EPC Gen2).

3. Bluetooth y Bluetooth Low Energy

3.1. Introducción

Bluetooth se define como una especificación industrial para redes inalámbricas de área personal (WPAN). En concreto, Bluetooth define una interfaz de radio que trabaja en la banda de 2,4 GHz y que se diseñó para ofrecer conectividad en distancias cortas y, sobre todo, para servicios multimedia tales como la transmisión *wireless* de imágenes, audio, y voz, entre dispositivos cercanos.

Hoy día, prácticamente todos los dispositivos electrónicos comerciales vienen equipados con conectividad Bluetooth para facilitar el intercambio de datos entre dispositivos muy cercanos; altavoces portables, sistemas de manos libres para coches o para peatones, auriculares, periféricos de ordenador (teclados, ratones, impresoras, etc.), tabletas y teléfonos inteligentes.

La arquitectura del estándar Bluetooth es muy simple y se basa en el concepto de **picorred** (piconet), formada por:

- 1) Un dispositivo *maestro* (*master*).
- 2) Un número de dispositivos *esclavos* (*slaves*).

Los esclavos pueden ofrecer servicios, pero dependen del maestro para su sincronización. En una picorred, un maestro puede tener **hasta siete esclavos activos** y un número de dispositivos en estado aparcado (*parked*). Cada picorred solo puede tener un maestro y, a la vez, un maestro de una picorred puede ser esclavo de otro, formando así una **scatternet**. Por ejemplo, un teléfono móvil podría ser maestro para un auricular y, a su vez, esclavo para un PC portátil. En cada picorred, los papeles de maestro/esclavo pueden cambiar dinámicamente.

3.2. Estándares relacionados

El grupo con especial interés (SIG) en Bluetooth es una asociación privada sin ánimo de lucro con sede en Bellevue, Washington, que promueve el desarrollo y la comercialización de la tecnología Bluetooth. El Bluetooth SIG, por sí mismo, no fabrica ni vende dispositivos Bluetooth.

Cualquier compañía que incorpora la tecnología inalámbrica Bluetooth en productos, utilizando la tecnología para ofrecer bienes y servicios, debe convertirse en un miembro de **Bluetooth SIG**.

En un ámbito técnico, la especificación de Bluetooth se define con el estándar **IEEE 802.15.1**. Su primera versión es la del año 2002, y se corresponde con la nomenclatura de Bluetooth v1.1. Posteriormente, en el año 2005, se ratificó la versión 1.2 que además de ser compatible con USB 1.1., mejoraba la velocidad de conexión y aspectos técnicos de la gestión del enlace para el intercambio de datos. Esta versión ofrece conexiones de 1 Mbps teóricos, aunque en la práctica el valor más aproximado sería de 0,7 Mbps.

Posteriormente, se han ido publicando nuevas versiones del estándar que permiten mejorar los tiempos de conexión y la tasa efectiva de transmisión de datos, y se han llegado a alcanzar velocidades de hasta 32 Mbps en la versión 4.0 del 2010, estableciendo cooperación con redes Wi-Fi. Además, se ha ido mejorando progresivamente la seguridad de las comunicaciones y el consumo de energía de los dispositivos, entre otros aspectos. En cualquier caso, la velocidad de transmisión de los módulos Bluetooth se ha mantenido en un máximo de 3 Mbps teóricos (2,1 Mbps en la práctica).

Cabe destacar, dentro de la versión 4.0, la especificación BLE (Bluetooth Low Energy), que a costa de reducir las tasas de transmisión de datos, logra consumos de energía muy bajos. Esta especificación ha dado pie al uso de *beacons* como herramienta de localización en interiores y de intercambio de información contextual; un ejemplo de aplicación se encuentra en dispositivos como tabletas, que muestran una información u otra en función de la proximidad a un *beacon* en particular.

En diciembre del 2016 se publicó la versión 5 de Bluetooth, que ofrece:

- 1) Mayor robustez y fiabilidad.
- 2) Mayor velocidad de datos.
- 3) Seguridad mejorada.
- 4) Mayor alcance, hasta 4 veces mayor que la versión 4.2 con bajo consumo de energía, BLE, sin necesidad de aumentar la potencia transmitida.
- 5) Mayor capacidad de transmisión de datos por mensaje (hasta 8 veces más capacidad de transmisión por paquete).

La versión Bluetooth 5.0 está orientada al internet de las cosas (IoT), y permite un modo de comunicación sin necesidad de establecer una conexión en modo continuo.

Hoy día, las versiones más habituales son Bluetooth Basic Rate y Enhanced Data Rate (BR/EDR), adoptado desde la versión 2.0 de Bluetooth, y el BLE, adoptado en las versiones 4.0, 4.1, 4.2, y 5.0. Mientras que Bluetooth BR/EDR está pensado para establecer conexiones continuas a corta distancia (por ejemplo, *streaming* de audio), la

versión BLE está pensada para conexiones a ráfagas cortas de datos, ideal para aplicaciones como el IoT. Se espera que la versión 5 tenga también una gran penetración en el mercado relacionado con el IoT.

Además de la propia especificación de la interfaz radio a través de la serie de estándares IEEE 802.15.1, existen otros estándares relacionados con Bluetooth, como el 802.15.2, que quiere facilitar la coexistencia con las redes locales sin hilos (trabajan a la misma frecuencia, como veremos en el material «Comunicaciones LPWA»).

3.3. Descripción de la tecnología

Bluetooth trabaja en la banda ISM de 2,4 GHz, y define con 79 canales de 1 MHz de ancho de banda cada uno.

Bluetooth utiliza *frequency hopping entre los canales*. Esto quiere decir que las comunicaciones cambian constantemente de portadora. Así, si una comunicación ocupa una ranura de la frecuencia F , la siguiente ranura de esta comunicación irá en otra frecuencia. Cada ranura frecuencial se utiliza durante un periodo de **625 μ s**, dando lugar a un cambio de portadora a una velocidad de **1.600 saltos por segundo** ($1/625 \mu$ s). El maestro dice a los elementos de la picorred en qué secuencias de frecuencias se transmite y se recibe. Gracias a este modo de operación, varias picorredeas pueden coexistir en proximidad. En los casos en los que haya colisión, se solicita una retransmisión de la información perdida.

Para facilitar las comunicaciones, el estándar obliga a que el maestro siempre transmita en las ranuras pares. El esclavo lee lo que le dice el maestro porque en la cabecera de los paquetes se incluye la dirección del dispositivo destino.

Un dispositivo puede tener diferentes necesidades de transmisión. Así, una comunicación entre un teléfono móvil y un auricular equipados con Bluetooth puede requerir una ranura bidireccional; pero una comunicación entre una cámara fotográfica y un ordenador equipados con Bluetooth puede requerir dos o tres ranuras en un solo sentido. Por ello, se definen dos tipos de enlace:

- 1) **Síncrono (SCO)**: enlace simétrico pensado especialmente para voz, reserva ranuras a intervalos fijos, de modo que garantiza una velocidad de transmisión de 64 kbps/ranura.
- 2) **Asíncrono (ACL)**: enlace asimétrico para datos o simétrico; en este caso, el nodo *master* asigna ranuras a los esclavos. Por ejemplo, asignando un enlace ACL 5+1, se logran 721 kbps de tasa de transferencia.

Al establecer una red, el dispositivo maestro lleva a cabo dos funciones fundamentales en una picorred: la investigación de dispositivos y la conexión en estos:

- 1) *Master inquire*: el maestro busca dispositivos. Entre otros, estos le dicen su dirección (48 bits), el tipo de dispositivo (impresora, auriculares, etc.) y la fase de su reloj.
- 2) *Master paging*: el maestro inicia una conexión con el dispositivo que le interesa.

Un dispositivo puede ofrecer diferentes servicios a los demás dispositivos de la pircorred. Además de hacer la búsqueda de los dispositivos, también debe hacerse la búsqueda de los servicios que ofrecen estos dispositivos (SDP, *service discovery protocol*). Esta última búsqueda es bastante lenta, cosa que hace que el estándar Bluetooth esté pensado para entornos estáticos.

3.4. Principales especificaciones técnicas

Existen varias versiones de las especificaciones de Bluetooth, y cada una ofrece las siguientes velocidades de transmisión de datos:

Tabla 1. Velocidad de transmisión de datos en Bluetooth

Versión	Velocidad transmisión
Versión 1.2	1 Mbps
Versión 2	3 Mbps
Versión 3	3 Mbps standalone + 24 Mbps (vía enlace Wi-Fi)
Versión 4.0	3 Mbps standalone + 32 Mbps (vía enlace Wi-Fi)
BLE	0,27Mbps

La potencia de transmisión máxima y el alcance dependen de la clase de dispositivo Bluetooth y su máxima potencia de transmisión, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2. Clases de dispositivos Bluetooth

Clase	Potencia máxima (mW)	Potencia máxima (dB)	Alcance aproximado
1	100 mW	20 dBm	100 metros
2	2,5 mW	4 dBm	5-10 metros
3	1 mW	0 dBm	1 metro
BLE	10 mW	10 dBm	50 metros

3.5. Ejemplos de uso

Como se ha mencionado antes, la gran mayoría de los dispositivos electrónicos con capacidad de comunicación tienen una interfaz Bluetooth; de este modo, es posible interconectar dispositivos como:

- Ordenadores portátiles.
- Periféricos de ordenador (ratones, teclados, etc.).
- Teléfonos inteligentes.
- Sistemas de manos libres entre teléfonos y otros dispositivos.

- Tablet as.
- Todo tipo de *wearables*, como auriculares, gafas inteligentes o relojes inteligentes, entre otros muchos.

En entornos industriales, la conectividad Bluetooth tiene, al menos, dos dominios claramente diferenciados:

- 1) **Conexión máquina a máquina:** este sería el caso de establecer comunicación entre máquinas para llevar a cabo algún tipo de interacción autónoma sin ninguna clase de interacción humana.
- 2) **Interfaz máquina-a-persona:** este sería el caso de establecer comunicación entre una máquina y una persona a través de *gadgets* de uso personal; *wearables* o teléfono inteligente, por ejemplo. Un claro ejemplo sería el intercambio de información sobre el tiempo de uso de una máquina y una tableta que lleva un operario en la mano para hacer lectura de los tiempos de uso de diferentes máquinas a lo largo de una línea de montaje.

Además, es relevante destacar el uso de los *beacons* (facilitados por la tecnología BLE), que permiten desarrollar soluciones de posicionamiento en interiores (*indoor positioning*), así como distribución de información según contexto; por ejemplo, transmitir unas instrucciones de un dispositivo en particular al acercarnos a él, y mostrarlas en un dispositivo con pantalla como un teléfono o una tableta, por ejemplo.

4. IEEE 802.15.4

4.1. Introducción

El grupo de trabajo 802.15 del IEEE está especializado en redes sin cables de área personal de baja tasa de transmisión, del inglés, LR-WPAN (*low rate - wireless personal area networks*).

En particular, el estándar IEEE 802.15.4 define las especificaciones de la capa PHY (física) y MAC (control de acceso al medio) para redes caracterizadas por:

- 1) Baja velocidad de transmisión de datos.
- 2) Baja potencia de transmisión para lograr larga vida de los dispositivos.
- 3) Corto o medio alcance.
- 4) Baja complejidad.

De algún modo, este tipo de tecnologías se diseñó para aplicaciones de **sensores** y **actuadores** en entornos industriales y para aplicaciones profesionales. La primera versión de esta tecnología data del año 2003, mientras que la última versión de este estándar es del año 2006.

A pesar de la corta distancia de los enlaces radio, la tecnología está pensada para establecer redes multisalto, en las cuales los dispositivos pueden actuar de «enrutadores» y establecer grandes rutas entre un origen y un destino mediante múltiples saltos. La complejidad de este tipo de redes ha dado lugar a multitud de trabajos teóricos y tesis doctorales sobre las estrategias óptimas para definir la topología de las redes, las técnicas de enrutado y la fijación de la potencia de transmisión. Desafortunadamente, a efectos prácticos, esta complejidad ha provocado que la aplicación comercial y profesional de este tipo de redes esté seriamente comprometida. Dicho de una manera poco precisa: las redes basadas en el 802.15.4 son difíciles de diseñar, desplegar y mantener, y además son caras.

A pesar de todo, el IEEE 802.15.4 ha tenido una gran visibilidad gracias al empuje de alianzas como **Zigbee**, **WirelessHART**, o **Thread**, entre otras muchas, que han promovido su desarrollo y comercialización, así como la interoperabilidad entre diferentes fabricantes de equipos y dispositivos. Estas alianzas, además de fomentar el uso de la tecnología, definen las capas superiores no definidas por el estándar IEEE 802.15.4.

Es importante no confundir los conceptos de IEEE 802.15.4 con Zigbee: Zigbee es una alianza empresarial para fomentar la compatibilidad entre diferentes dispositivos implementando la tecnología IEEE 802.15.4.

Dadas las limitaciones de la tecnología, el 6 de febrero del 2012 se aprobó un *amendment* etiquetado como 802.15.4e, que definía mejoras de la tecnología para uso en **aplicaciones industriales**. En esencia, se añadieron nuevas funcionalidades en un ámbito de capa MAC para dotar a estas redes de **mejor rendimiento y mayor robustez frente a interferencias**. En los siguientes apartados, definiremos con más detalle las soluciones adoptadas.

Otra de las limitaciones más relevantes de esta tecnología es el no diseño para trabajar en redes de internet (IP). Debido a esta carencia, la IETF (Internet Engineering Task Force) trabajó en la definición de la tecnología **6LoWPAN**, que permite usar IP en este tipo de redes de baja complejidad. La tecnología 6LoWPAN propone mecanismos de compresión de cabeceras para poder usar IPv6 en redes de sensores de baja complejidad, como las basadas en el IEEE 802.15.4.

4.2. Estándares relacionados

Aunque este tipo de afirmaciones siempre son discutibles, podríamos decir que los estándares más relevantes para la visión de la industria 4.0 son el estándar **IEEE 802.15.4** y el *amendment* del estándar **IEEE 802.15.4e**, diseñado específicamente para uso en **aplicaciones industriales**.

Existen otras versiones del estándar para usos específicos, es el caso del IEEE 802.15.4g para redes de distribución de energía inteligentes (*smart grids*), o el IEEE 802.15.4f para sistemas de RFID, que quedan fuera el objetivo de este material.

Existe una cierta discusión sobre si la tecnología Wi-Fi, basada en los estándares IEEE 802.11, son competencia de esta tecnología para sensores basada en el IEEE 802.15.4. Lo cierto es que los estándares de Wi-Fi no se pensaron originalmente para conectar sensores, sino para ofrecer altas tasas de transmisión de datos. Sin embargo, como veremos más adelante, Wi-Fi se ha convertido, efectivamente, en una seria amenaza técnica para el estándar IEEE 802.15.4 y los productos basados en Zigbee, dadas sus buenas prestaciones en términos de consumo de energía de los sensores y rendimiento de las redes de comunicaciones en términos de *throughput* y retardo.

Cabe mencionar, como se ha comentado antes, que el estándar IEEE 802.15.4 suele estar estrechamente relacionado con el protocolo 6LoWPAN para permitir la conectividad compatible con IPv6 de los sensores conectados a través del IEEE 802.15.4.

4.3. Descripción de la tecnología

La tecnología IEEE 802.15.4 define la capa PHY y la capa MAC de las redes de sensores basadas en este estándar.

La tecnología IEEE 802.15.4 está pensada para, al menos, dos tipos de redes:

- 1) **Estrella:** con un coordinador y un número de dispositivos en su alcance radio.
- 2) **Malla:** con un concentrador/coordinador, y un número de dispositivos que no tienen por qué estar en el rango de cobertura del concentrador, también llamado *sink*, y que pueden establecer enlaces *multi-hop* (de saltos múltiples) para alcanzar el *sink*.

Los terminales de una red basada en IEEE 802.15.4 pueden ser de dos tipos:

- 1) *Full-function device* (FFD): que puede trabajar en modo coordinador o en modo normal. Además, puede actuar como enrutador de tráfico, haciendo de nodo intermedio en rutas de múltiples saltos.
- 2) *Reduced-function device* (RFD): que tan solo pueden trabajar en modo normal, sin llevar a cabo funciones de coordinación.

En un ámbito de **capa física**, la tecnología se diseñó para operar en la banda de frecuencias ISM a 868/915 Mhz, o la banda 2,4 GhZ, donde tiene que coexistir con otras tecnologías como Bluetooth o Wi-Fi, entre otras.

La banda de frecuencia ocupada se separa en subcanales de la siguiente manera:

- 1) **Banda de 868 MHz:** un único canal disponible; canal 0, centrado en 868,2MHz.
- 2) **Banda de 915 Mhz:** originalmente con 10 canales disponibles; del canal 1 al canal 10, con una separación entre portadoras de 2 Mhz y ocupando en total la banda desde 902 Mhz hasta 928 MHz. En el 2006, se extendió el número de canales a 13.
- 3) **Banda de 2,4GHz:** 16 canales disponibles; del canal 10 al canal 26, con una separación entre portadoras de 5 Mhz y ocupando en total la banda desde 2,4 Ghz hasta 2,4835 GHz.

Independientemente de la banda de trabajo, la capa física se basa en técnicas de ensanchamiento espectral por secuencia directa, es decir, DSSS (*direct sequence spread spectrum*). Se define también un modo de ensanchamiento basado en técnicas de paralelización, PSSS, en lugar de DSSS.

En la versión 802.15.4e, el estándar define la posibilidad de hacer salto de frecuencias (*frequency hopping*) para ofrecer mayor robustez frente a interferencias para aplica-

ciones industriales. Esta tecnología se conoce con el nombre de TSCH (*time slotted channel hopping*).

En un ámbito de **capa MAC**, el estándar define cuatro tipos de mensajes para intercambiar:

- 1) *Data frames*: para el intercambio de información útil.
- 2) *Beacon frame*: para funciones de control y sincronismo.
- 3) *ACK frame*: para la confirmación de la correcta recepción de mensajes. Este tipo de confirmación explícita es una funcionalidad opcional.
- 4) *MAC command frame*: para las propias funcionalidades de control del acceso múltiple al medio. Un ejemplo serían los *beacons* que transmite un coordinador de manera temporal para definir el acceso al medio, tal y como se explica a continuación.

Dado que el canal radio es compartido entre todos los usuarios, se aplica una técnica de acceso múltiple por contienda llamada **CSMA/CA** (*carrier sensing multiple access*). En particular, existen dos subversiones de esta técnica:

- 1) **CSMA ranurado**: existe la figura de un coordinador que transmite *beacons* de manera periódica. El tiempo entre *beacons* define una estructura de supertrama que suele estar subdividida en 16 *slots* temporales; cada *slot* se usa para una transmisión punto a punto. Es posible definir de manera alterna en el tiempo periodos de acceso según contienda y periodos de acceso garantizado, asignando *slots* de la supertrama a un flujo de comunicación en particular, a través de los denominados *GTS* (*guaranteed time slots*), que se notifican en el *beacon* transmitido de manera periódica.
- 2) **CSMA no ranurado**: el acceso al medio es completamente distribuido y no existe la figura de un coordinador. El acceso, en este caso, se basa en tiempos de espera aleatorios y técnicas de escucha del canal antes de transmitir. Este tipo de acceso se asemeja mucho a la técnica de acceso usada en redes Wi-Fi basadas en el estándar IEEE 802.11, como veremos más adelante.

La elección de un tipo u otro de acceso al medio dependerá estrechamente de las necesidades particulares de la aplicación que corre encima de las capas PHY y MAC de la red de sensores.

4.4. Principales especificaciones técnicas

Las principales especificaciones de esta tecnología se pueden definir de la siguiente manera:

- Bandas de frecuencia: 868/915 MHz y 2,4 Ghz.

- Canales: 11 canales en sub-Ghz y 16 canales en 2,4 GHz.
- Ancho de banda por canal: 600 KHz en 868 MHz, 2 MHz en 915 Mhz y 5 MHz en 2,4 Ghz.
- Máxima potencia de transmisión: 1 mW.
- Máximo alcance aproximado: entre 10 y 30 metros.
- Modulaciones: QPSK en 2,4 Ghz y BPSK en bandas sub-GhZ.
- Velocidad de transmisión: entre 100 y 250 kbps.
- Tamaño máximo del *payload*: 127 bytes.
- Tamaño cabecera por paquete: 1 byte.

4.5. Ejemplos de uso

El estándar 802.15.4 se usa en distintas aplicaciones, tales como:

- Casas inteligentes.
- Control remoto de dispositivos.
- Relacionadas con la salud electrónica para la monitorización de sensores.
- Relacionadas con la monitorización del consumo de energía eléctrica.
- Aplicaciones industriales en entornos muy bien controlados.

Gran cantidad de los sistemas operativos usados en dispositivos de sensores, tales como TinyOS, RIOT, o Contiki, entre muchos otros, tienen librerías disponibles para poder trabajar fácilmente con módulos de radio basados en el IEEE 802.15.4. Por este motivo, además de usos profesionales, también se trata de una tecnología muy usada con fines académicos y didácticos.

5. IEEE 802.11

5.1. Introducción

El IEEE creó el grupo de trabajo 802.11 para definir unas especificaciones de capa física (PHY) y capa MAC para establecer comunicaciones de alta velocidad en redes sin cables de área local. El primer estándar se publicó en 1997. Desde entonces, y hasta hoy, la actividad de este grupo ha sido incesante; se han publicado numerosas nuevas versiones del estándar original para añadir nuevas y mejores funcionalidades, aumentar las tasas de transmisión de datos, y adaptarse a las necesidades de nuevas y emergentes aplicaciones. Un ejemplo representativo de esta capacidad de adaptación es el IEEE 802.11ah, dedicado a redes de sensores de baja tasa de transmisión, largo alcance, y bajo consumo de energía.

Esta tecnología ha tenido un éxito rotundo en todo tipo de entornos; encontramos puntos de acceso Wi-Fi en casas privadas, entornos profesionales, entornos industriales, espacios públicos, e incluso en parques, jardines y playas de las ciudades.

Dada su gran aceptación social y razonable buen funcionamiento, es una tecnología que está aquí para quedarse y, como no podía ser de otro modo, va a tener un papel fundamental en la visión de la industria 4.0.

Describir en detalle esta tecnología en pocas páginas es un reto difícilmente abordable. Por este motivo, el objetivo de este material no es presentar en detalle la tecnología y todas sus variantes, sino plantear, en términos generales, los principios de funcionamiento y las especificaciones más relevantes. El lector interesado puede acceder a través de la página web del grupo del IEEE 802.11.

5.2. Estándares relacionados

La lista de estándares es muy larga; podríamos destacar los siguientes estándares y la principal, aunque de ningún modo única, novedad respecto al estándar inmediatamente anterior en esta lista:

- **802.11 legacy:** versión original del estándar (año 1997) para la banda de 2,4 Ghz y con velocidades de transmisión de 1 y 2 Mbps. Este estándar define el acceso al medio basado en CSMA, que será la base de la capa MAC en todas las versiones siguientes del estándar. En esta versión, se definen los medios de acceso distribuido (**DCF** en inglés, *distributed coordination function*) y coordinado (**PCF** en inglés, *point coordination function*).

- **802.11a:** aprobado en 1999, adapta la operación del estándar para la banda de 5 GHz usando OFDM con 52 subportadoras y con tasas de transmisión de hasta 54 Mbps. Esta versión del estándar, al trabajar en 5 Ghz, no puede comunicarse con 802.11 Legacy o 802.11b.
- **802.11b:** ratificado en 1999, ofrece mayores velocidades de transmisión que la versión Legacy, y llega a 5,5 Mbps y 11 Mbps en un ámbito de capa física. Debido al *overhead*, la capa MAC y el uso con protocolos de capas superiores como TCP o UDP, la tasa efectiva para datos útiles se reduce a 5,9 Mbps (con TCP) y 7,1 Mbps (con UDP).
- **802.11e:** ratificado en el 2001, aporta apoyo de calidad de servicio y es compatible tanto con 802.11b como con 802.11a. Esta versión introduce mejoras en un ámbito MAC, así como el concepto del EDCA (*enhanced distributed channel access*) y las categorías de tráfico y de acceso (con diferentes prioridades). También se introduce el modo de acceso híbrido (HCCA), que combina la funcionalidad del acceso distribuido (DCF) con el acceso coordinado (PCF).
- **802.11g:** ratificado en el 2003, supone una evolución del 802.11b para ofrecer mayores velocidades de transmisión en 2,4 GHz tanto con DSSS como con OFDM. De algún modo, se podría decir que se trata de la adaptación del 802.11a para la banda de 2,4 Ghz. Se alcanzan velocidades de transmisión de hasta 54 Mbps en un nivel de capa PHY. Los dispositivos 802.11g son compatibles con los 802.11b, aunque la presencia de terminales 802.11b tiene una gran afectación sobre el rendimiento global de la red, debido a la baja velocidad de transmisión de 802.11 respecto a los g, y a que los dispositivos 802.11b no entienden los protocolos definidos por g tanto en un ámbito de PHY como MAC.
- **802.11n:** iniciada su definición en el 2004 y ratificado en el 2009, introduce por primera vez el uso de múltiples antenas (técnicas MIMO de diversidad). La velocidad de transmisión puede llegar a los 600 Mbps (con flujos por cada antena de hasta 150 Mbps), y supera en más que un factor 10 la velocidad de transmisión de redes 802.11g y a. Este estándar hace uso simultáneo de la banda 2,4 Ghz y la banda de 5 GHz y, además, es compatible con versiones anteriores del estándar.
- **802.11ac:** ratificado en enero del 2014, ofrece mayor velocidad de transmisión que las versiones anteriores y recibe el seudónimo de **Wi-Fi Gigabit**. Ofrece velocidades de transmisión de hasta 866 Mbps por antena, usa canales de 160 MHz (superiores a las versiones anteriores), y puede multiplexar 8 flujos espaciales simultáneos y llegar a velocidades de 6,97 Gbps.

Otros estándares, como el 802.11p para comunicaciones entre vehículos y operando en la banda cercana a los 6 Ghz, se han especializado en aplicaciones determinadas. En concreto, este estándar es la base de la norma DSRC (*dedicated short range communications*) para comunicaciones entre vehículos.

Otro caso que hay que resaltar es el 802.11ah para aplicación en redes de sensores de largo alcance, baja tasa de transmisión y bajo consumo energético. Este estándar está diseñado para trabajar en bandas de frecuencia sub-Ghz.

Por último, destacamos la especificación **802.11ad**, diseñada para la banda de 60 GHz, que ofrece velocidades de transmisión muy elevadas, cercanas a los 5 Gbps, pero a muy corta distancia, y el estándar **802.11ax** para tasas de transmisión muy elevadas que permitan alcanzar los valores teóricos de 802.11ac. Aunque con 802.11ac sería técnicamente posible llegar a casi 7 Gbps, en la práctica, no se pueden alcanzar velocidades tan altas de transmisión. La versión 802.11ax, llamada HEV (*high-efficiency wireless*), tiene el objetivo de garantizar un rendimiento promedio de al menos 4 veces mayor que 802.11ac (en la práctica) en entornos con alta densidad de usuarios tales como estaciones de tren, aeropuertos y estadios deportivos.

5.3. Descripción de la tecnología

Dada la gran variedad de estándares diferentes, resulta complicado resumir la tecnología Wi-Fi de manera sucinta. Por lo tanto, tan solo se resaltarán en este módulo algunas de las técnicas principales usadas por los estándares 802.11xx tanto en un ámbito PHY como MAC, así como algunos apuntes relativos al uso de las bandas frecuenciales.

En lo que respecta a las **bandas frecuenciales**, los estándares 802.11xx operan, principalmente, en la banda de 2,4 Ghz o en la banda de 5 GHz. Estas bandas de frecuencias se organizan por canales. Esta organización de canales varía ligeramente entre Europa (y la mayoría de los países) y Estados Unidos.

Por ejemplo, en el caso de Europa y la mayoría de los países, la ordenación de la banda de 2,4 Ghz es la siguiente:

- El estándar 802.11b, en la banda de 2,4 Ghz, usa DSSS, y define 14 canales de 22 Mhz cada uno; estos canales se solapan los unos con los otros. Tan solo hay 3 canales no solapados: los canales 1, 6 y 11, en las frecuencias centrales de 2,412 GHz, 2,436 Ghz y 2,462 Ghz.
- Los estándares 802.11g y n usan OFDM, y se definen 11 canales de 20 Mhz. De nuevo, solo los canales 1, 6 y 11 no están solapados.
- El estándar 802.11n, además, también define canales de 40 Mhz. En este caso, tan solo hay dos canales no solapados; el canal 3 y el canal 11.

En un nivel de capa física, destacan:

- DSSS en las primeras versiones del estándar. El uso de espectro ensanchado permite combatir las interferencias entre distintos sistemas que operan en la banda ISM de 2,4 Ghz.

- OFDM en las versiones más actuales del estándar.

Además, las versiones más actuales del estándar incorporan técnicas de diversidad basadas en múltiples antenas (MIMO), y destaca el uso de estas múltiples antenas para un único usuario (*single user MIMO*) o para multiplexar simultáneamente a varios usuarios en el espacio (*multi-user MIMO*).

A medida que los estándares han evolucionado hacia velocidades de transmisión más elevadas, se han ido añadiendo modulaciones de órdenes muy elevados; en el caso de 802.11ad, por ejemplo, se incluye la modulación 1024-QAM, que permite ofrecer tasas de transmisión realmente elevadas; por supuesto, modulaciones de dicho orden implican probabilidades de error muy elevadas y gran sensibilidad a la distorsión del canal radio.

En un ámbito MAC, los estándares de 802.11 se basan en mejoras progresivas de la *distributed coordination function* (DCF) definida en la primera versión del estándar. Aquel primer estándar también definía la función PCF que, a pesar de ofrecer mejor rendimiento que la DCF en determinados escenarios de uso, no ha tenido una gran aceptación comercial. De hecho, la gran mayoría de los dispositivos Wi-Fi tan solo implementan el modo DCF. Este modo se basa en la técnica de acceso al canal llamada CSMA (del inglés *carrier sensing multiple access*), con técnicas de *collision avoidance*.

La idea fundamental de la capa MAC de los estándares 802.11 consiste en que los dispositivos, antes de intentar acceder al canal, lo escuchan. Si el canal está libre, transmiten. Si el canal está ocupado, esperan un tiempo aleatorio antes de volver a intentar transmitir. Este tiempo se llama *backoff*. La estrategia para definir el tiempo aleatorio de escucha ha dado lugar a multitud de contribuciones e innovaciones técnicas que permiten, de un modo u otro, lograr mejores o peores rendimientos.

Además de este mecanismo básico, se introducen mecanismos para reducir las colisiones, tales como el intercambio de paquetes de RTS y CTS (*request to send y clear to send*) entre fuente y destino de una transmisión. Además de reducir el efecto de las colisiones, este intercambio permite hacer medidas del canal y ajustar parámetros de transmisión, tales como la potencia o las técnicas que hay que usar de codificación y modulación.

En las versiones más actuales de los estándares 802.11, y dado que se usan técnicas MIMO en un nivel de capa física, se han incorporado nuevas estrategias en un nivel MAC, tales como agregación de paquetes de diferentes flujos de datos, que permiten alcanzar velocidades de transmisión realmente elevadas.

5.4. Principales especificaciones técnicas

Como se ha descrito anteriormente, las especificaciones varían de un estándar a otro. Al margen de los detalles de cada estándar, lo relevante es que los estándares basados en IEEE 802.11 trabajan en las bandas de 2,4 Ghz y 5 Ghz y ofrecen tasas de transmisión de datos que oscilan entre las pocas decenas de Mbps hasta pocos Gbps. Para lograr estas velocidades de transmisión tan elevadas, se aplican técnicas avanzadas en un nivel PHY y MAC, y se trata de estándares en continua evolución.

En la práctica, el rango de cobertura de las tecnologías Wi-Fi que operan en las bandas de 2,4 Ghz y de 5 Ghz suele estar en el orden de los muy pocos centenares de metros, y ofrece ciertas garantías de buen funcionamiento por debajo de los 100 metros.

En términos de consumo de energía, la tecnología está mejorando a través de la definición de mecanismos de ahorro de energía en modo activo y pasivo, lo que convierte a los estándares 802.11 en competentes candidatos para aplicaciones profesionales en la visión de la industria 4.0.

5.5. Ejemplos de uso

Los casos de uso de la tecnología Wi-Fi son incontables. El hecho de que exista conectividad Wi-Fi «en todas partes» hace que su uso esté realmente extendido en ámbitos personales, domésticos, profesionales, institucionales y públicos.

Las tecnologías Wi-Fi, a pesar de tener mucho éxito, también presentan algunas limitaciones, tales como:

- 1) Densificación de la banda ISM: dado el gran número de redes operando simultáneamente, la interferencia entre sistemas puede llegar a resultar inoperativa.
- 2) Seguridad: el hecho de tratarse de una tecnología tan disponible y tan bien conocida la hace muy vulnerable a posibles ataques de seguridad.
- 3) Gran escalabilidad: aunque los nuevos estándares permiten comunicar a un número muy elevado de dispositivos, el hecho de que el acceso al canal se siga basando en técnicas tipo CSMA hace que la red pueda caer en congestión cuando el número de dispositivos es realmente alto.
- 4) Consumo de energía: aunque se ha mejorado mucho y se promueven versiones de Wi-Fi de bajo consumo, el consumo de los dispositivos Wi-Fi para entornos industriales en los que se necesiten periodos de operación muy grandes puede comprometer su uso profesional.

A pesar de estos puntos débiles, no cabe la menor duda de que los estándares IEEE 802.11XX seguirán siendo protagonistas en la conectividad del mundo que nos espera y, por supuesto, de la industria 4.0.

Conclusiones

En este material, hemos revisado algunas de las tecnologías de corto y medio alcance que son susceptibles de jugar un papel importante en la industria 4.0. Por supuesto, no son todas las que existen.

Hemos visto cómo las tecnologías RFID juegan un papel en el campo de la identificación de objetos y la logística.

Hemos visto cómo Bluetooth, y su versión de bajo consumo, BLE, juegan un papel importante en la interacción a corta distancia entre máquinas, y entre máquinas y personas. Aunque hoy día su uso en un ámbito personal está muy extendido, su utilización en entornos profesionales todavía tiene mucho camino por recorrer.

Hemos visto cómo las tecnologías basadas en IEEE 802.15.4 tienen una presencia relativa en un ámbito profesional. Son tecnologías de bajo consumo con prestaciones limitadas y un gran coste de instalación y mantenimiento.

Hemos visto cómo las tecnologías basadas en el IEEE 802.11 han evolucionado durante los últimos años, y ofrecen cada vez más y mejores prestaciones. Este tipo de tecnologías de comunicación jugarán un papel muy relevante en numerosas aplicaciones de la industria 4.0.

Estas tecnologías jugarán un papel muy importante en la visión de la industria 4.0, aunque siempre con las limitaciones que ofrece un sistema que trabaja en bandas sin licencia y la consiguiente falta de garantías de funcionamiento. Para aplicaciones «críticas», será complicado poder valorar el uso de este tipo de tecnologías. Sin embargo, para determinadas aplicaciones, constituyen soluciones muy adecuadas.

La elección de una u otra tecnología dependerá de las condiciones de contorno y las necesidades, entre las cuales habrá que valorar, por lo menos:

- 1) Rango de cobertura necesario.
- 2) Tasa de transmisión de datos (velocidad).
- 3) Nivel de garantía de rendimiento (calidad de servicio).
- 4) Retardos de transmisión tolerados.
- 5) Coste de adquisición de la red.
- 6) Coste de mantenimiento de la red.
- 7) Coste de uso de la red.
- 8) Coste de los dispositivos.
- 9) Consumo de energía de los dispositivos y de la red.

10) Dificultad de instalación y gestión de la red; en algunos casos, no es sencillo tener acceso a lugares donde instalar la infraestructura necesaria y poder disponer de fuentes de energía.

Además de estas tecnologías estandarizadas, en los últimos años han emergido nuevas **tecnologías propietarias** que también trabajan en las bandas ISM y se centran en un tipo muy concreto de aplicaciones: aquellas en las que se necesita una tasa de transmisión muy baja, a largo alcance, con consumos de energía muy bajos, y con un coste por uso muy bajo.

Estas son las tecnologías LPWA (*low power wide area networks*) que prometen tener un papel fundamental en ciertas aplicaciones de la industria 4.0, y que se describen en el material «Comunicaciones LPWA».

Resumen

En este material, se ha presentado la existencia de las bandas ISM, bandas de frecuencia libres de licencia; es decir, no hay que pagar por usarlas.

Además, hemos descrito las siguientes tecnologías:

- 1) **RFID**, para la identificación de objetos por radiofrecuencia, y de gran aplicación en logística. Esta tecnología ha permitido que evolucionen los tradicionales códigos de barras, para ofrecer mayor flexibilidad y, además, mayor cantidad de información asociada a cada objeto «monitorizado».
- 2) **Bluetooth y Bluetooth Low Energy (BLE)**, para transmisiones de corto alcance, pensado para información multimedia en redes de área personal. Su objetivo es eliminar los cables entre dispositivos muy cercanos. Además, la versión BLE permite llevar a cabo posicionamiento *indoor*, y ofrece una funcionalidad de alto interés en el contexto de la industria 4.0.
- 3) **Tecnologías basadas en el estándar IEEE 802.15.4** (Zigbee y variantes), diseñadas para redes de corto y medio alcance y con uso de baja potencia de transmisión. A través de redes de múltiples saltos, se pueden cubrir áreas grandes, aunque a costa de hacer la gestión de la red más compleja. Existe una variante del estándar original, la 802.15.4e, que ha sido diseñada específicamente para aplicaciones industriales y que tiene gran aplicación en el contexto de la industria 4.0.
- 4) **Tecnologías basadas en el estándar IEEE 802.11** (Wi-Fi y variantes), diseñadas para redes de área local; la gran disponibilidad de puntos de acceso ya desplegados para ofrecer conectividad a las personas hace que esta tecnología presente muchos puntos fuertes de cara a su aplicación en el contexto de la industria 4.0.

También, hemos descrito los puntos fuertes y débiles de estas tecnologías, con el objetivo de construir un argumentario crítico que permita valorar, para cada aplicación, qué solución (o soluciones) son las más adecuadas para cada aplicación en la industria 4.0.