
Las redes de computadores como generadoras de datos

PID_00279840

Lorenza Giupponi
Toni Adame



Universitat
Oberta
de Catalunya

Lorenza Giupponi

Ingeniera de Telecomunicaciones por la Universidad de Roma La Sapienza y doctora por el departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña. Se unió en el año 2003 al grupo de comunicaciones móviles de la UPC con una beca del programa Formación Profesorado Universitario. Durante 2006 y 2007 fue profesora ayudante en la UPC. En 2007 se unió al Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Cataluña (CTTC), donde actualmente es investigadora sénior en el departamento de Redes Móviles. Además, desde 2007 es directora de relaciones institucionales del comité de dirección del CTTC. Ha recibido premios al mejor artículo de la conferencia en tres ocasiones, entre ellas IEEE CCNC 2010, IEEE WCNC 2018. Dos de sus *transactions* han sido listados por IEEE Comsoc entre las mejores lecturas en el área de la gestión de recursos radio y de la radio cognitiva. Desde 2015 es miembro del comité ejecutivo de ns-3, responsable del área Long Term Evolution (LTE) y del área New Radio (NR). Ha liderado y participado en múltiples proyectos nacionales, europeos o financiados por empresas internacionales.

Toni Adame

Ingeniero superior de telecomunicaciones por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Ha trabajado durante varios años en el sector privado como consultor preventa en el ámbito de la integración de sistemas y tecnologías. Desde 2013 pertenece al grupo de investigación Network Technologies and Strategies (NeTS) de la Universidad Pompeu Fabra (UPF), donde ejerce como investigador sénior en proyectos europeos y nacionales que promueven el uso de tecnologías de comunicación inalámbricas (WSN, Wi-Fi, LPWAN, redes celulares y RFID) como habilitadoras del internet de las cosas (IoT). Sus áreas de investigación se focalizan en las comunicaciones de acceso múltiple, los protocolos de acceso al medio y los mecanismos de ahorro energético. Desde 2017 también es profesor asociado en la UPF, donde ha impartido clases en los diferentes grados del ámbito de la ingeniería.

El encargo y la creación de este recurso de aprendizaje UOC han sido coordinados por la profesora: Cristina Cano Bastidas

Primera edición: febrero 2021

© de esta edición, Fundació Universitat Oberta de Catalunya (FUOC)

Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona

Autoría: Lorenza Giupponi, Toni Adame

Producción: FUOC

Todos los derechos reservados

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

Índice

Introducción	5
1. Tecnologías de acceso inalámbrico	8
1.1. Redes de área personal inalámbricas	10
1.1.1. Bluetooth	11
1.1.2. IEEE 802.15.3	11
1.1.3. IEEE 802.15.4	12
1.1.4. Zigbee	12
1.1.5. Identificación por radiofrecuencia	12
1.2. Redes de área local inalámbricas	13
1.2.1. Conceptos básicos	13
1.2.2. Un poco de historia: el estándar IEEE 802.11	14
1.3. Redes de área amplia inalámbricas	16
1.3.1. Conceptos básicos	17
1.3.2. Un poco de historia: del 1G al 5G	19
1.4. Redes de área amplia de baja potencia	21
2. Redes inalámbricas de sensores	23
2.1. Categorías de sensores y aplicaciones	24
2.2. Diseño de una red de sensores	25
3. Drones	26
4. Redes celulares y terminales móviles como fuente de datos	28
Ejercicios de autoevaluación	30
Solucionario	32
Glosario	33
Bibliografía	35


Introducción

En el «**Reto 1. ¿Cuál es el papel de las redes de computadores en el ciclo de vida de los datos?**», hemos introducido las redes de computadores y las funciones que desempeñan en el ámbito de la transmisión y el procesamiento de datos. En el «**Reto 2. Las redes de computadores como generadoras de datos**», presentaremos los niveles más bajos de la pila OSI (*open system interconnection*) (la capa física, de enlace y de red) y conoceremos los rasgos característicos de estas capas en el contexto de algunas tecnologías específicas de acceso radio de uso muy común. También profundizaremos en cómo las redes de computadores pueden constituir una infraestructura para recoger datos, como es el caso, por ejemplo, de las redes de sensores, que se despliegan en entornos de interés, para monitorizarlos, y reportan información a una base de datos o a la denominada nube o *cloud*.

Normalmente pensamos en las redes como en un medio para descargar datos que se encuentran almacenados en otro lugar (como una película, un archivo de datos, etc.). Esto lo veremos más adelante en la asignatura junto con las capas más altas de la capa OSI que habilitan dichas aplicaciones. En este reto, por el contrario, veremos cómo las redes por sí mismas son las encargadas de la generación de los datos y qué necesidades de comunicación son necesarias para que esto sea posible.

El paradigma por excelencia de la generación de datos en red es el denominado internet de las cosas (*Internet of things*, IoT). El IoT se define como una red de dispositivos inteligentes, fijos o móviles, que pueden comunicarse e intercambiar datos, a través de internet, y sin necesidad de intervención humana, de manera automática. El paradigma del IoT necesita ser respaldado por redes y tecnologías de comunicaciones para lograr diferentes objetivos, entre los que enumeramos: 1) conectar dispositivos de uso cotidiano a internet y/o a bases de datos/*cloud*, 2) recoger datos y transmitirlos a nodos colectores o a bases de datos/*cloud*, 3) ejecutar acciones a través de la inteligencia embebida en los propios dispositivos. Las comunicaciones entre dispositivos inteligentes conectados se realizan mediante enlaces cableados y/o inalámbricos, a través del paradigma de comunicación conocido como «máquina a máquina» (*machine to machine*, M2M).

Las aplicaciones IoT en la vida cotidiana son múltiples e incluyen ámbitos de los que seguramente ya habréis escuchado hablar, como la energía, los edificios, las ciudades, el transporte, las casas, las fábricas o la agricultura inteligentes. Un ejemplo sencillo de las comunicaciones M2M en entorno IoT es el de las máquinas expendedoras de bebidas. Normalmente, hay alguien que se en-



El concepto de *cloud computing*, complementario y fundamental en el ciclo de vida de los sistemas IoT, por proporcionar capacidad de almacenamiento y carga computacional, se introducirá ampliamente en el «**Reto 4. ¿Cómo podemos utilizar las redes para almacenar, compartir y procesar datos?**».

carga periódicamente de monitorizar la máquina, y reponer las bebidas según se vayan acabando. Este proceso podría automatizarse y simplificarse si aumenta el nivel de ventas de las bebidas, o si la máquina se estropea o se queda sin bebidas. En cualquiera de estos casos, la máquina expendedora de bebidas se comunicaría con un controlador central a través de comunicaciones M2M. De esta manera podríamos intervenir solo cuando fuera necesario, una vez alertados por el sistema IoT. Esta información podría facilitar (optimizar) el trabajo de los reponedores de bebidas.

Otros ejemplos de comunicaciones M2M en ámbitos IoT pueden encontrarse en el sector del automóvil. Las comunicaciones M2M permiten que un vehículo pueda realizar medidas remotas, como estimar su posición mediante el GPS (*global positioning system*), medir y comunicar el nivel del agua, o de otros aspectos, detectar posibles averías, etc. La lectura remota de los contadores inteligentes de agua de los apartamentos o las alarmas de una casa constituyen otros ejemplos destacados de comunicaciones M2M en entornos IoT. En el ámbito de la salud, otra aplicación de gran importancia es la de recoger datos de pacientes a través de dispositivos distribuidos por el cuerpo, con el objetivo de monitorizar constantes vitales y biológicas de varios tipos de manera automática.

El concepto de M2M puede implementarse mediante múltiples protocolos de comunicación disponibles en la actualidad, y definidos por diferentes organismos de estandarización. En el diseño de un sistema IoT es fundamental el estudio de la tecnología de red inalámbrica más adecuada para habilitar la comunicación entre dispositivos, así como de los dispositivos a internet y al *cloud*. Según la aplicación específica, el alcance y ancho de banda necesarios, hay muchas tecnologías que pueden utilizarse en el diseño de un sistema de recogida de datos. Las recorreremos clasificándolas por alcance de la tecnología, banda que utilizan y por el organismo de estandarización que las define, en el capítulo 1.

El paradigma IoT requiere la implementación de capacidades de comunicación en los dispositivos y objetos. Esto se realiza a menudo a través de la instalación de un sensor, y un identificador, en cada dispositivo conectado. La transmisión de datos desde el sensor se puede lograr dotándolo de acceso directo a internet, o también mediante lo que se conoce como una red de sensores. En el capítulo 2 introduciremos este paradigma de comunicación que fue, de hecho, el precursor del IoT, y que ahora se encuentra integrado en él. De manera similar presentaremos, en el capítulo 3, el novedoso concepto de los drones (*unmanned aerial vehicles*, UAV), aeronaves sin tripulación a bordo. Gracias a su facilidad de despliegue y a sus bajos costes operativos, se han convertido en un componente fundamental de aplicaciones críticas como la vigilancia fronteriza, la monitorización de desastres, la monitorización del tráfico y la sensorización remota. En particular, nos centraremos en la aplicación de un dron como nodo móvil de una red de sensores o como colector de datos.

Por otro lado, las redes inalámbricas no solo habilitan la recogida de datos en sistemas IoT, redes de sensores o drones, sino que por sí mismas pueden ser generadoras de datos de interés. Presentaremos este concepto en el capítulo 4, a través del ejemplo de las redes de comunicaciones móviles, que en su marco de funcionamiento generan medidas, información de control y de gestión que puede utilizarse para múltiples objetivos, como la optimización de su propio funcionamiento, la toma de decisiones de negocio por parte de los operadores de telefonía o para otros casos concretos, como el recuento de personas en eventos o la optimización del tráfico urbano, tal y como veremos en este reto.

Finalmente, cabe recordar que en este documento nos basamos en tecnologías inalámbricas porque son las más comunes para la recogida de datos, pero también existen redes generadoras de datos cableadas. Un ejemplo es el proceso de recogida de datos en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN), que en la actualidad genera entre 30 y 50 millones de gigabytes al año, equivalente a más de 9 millones de películas en alta definición. Estas son cantidades de datos que hoy en día aún no podemos gestionar con tecnologías inalámbricas.


1. Tecnologías de acceso inalámbrico

En este apartado nos centraremos en definir las principales características de las redes de acceso inalámbrico más utilizadas en el mercado. Actualmente, todos somos usuarios de este tipo de tecnologías (teléfonos móviles, ordenadores de sobremesa, portátiles, etc.), de modo que las redes inalámbricas ya forman parte de nuestra vida cotidiana. Estamos continuamente rodeados y conectados a diferentes tecnologías a la vez, a través de nuestros dispositivos móviles. Es común estar en el coche, escuchar música a través del 4G en el móvil, a la vez que se está conectado al sistema audio del coche a través de Bluetooth. Bajamos del coche, entramos en la oficina y, automáticamente, nuestro móvil se desconecta del 4G y se conecta a la Wi-Fi de la empresa. También la radio y la televisión son sistemas inalámbricos, completamente incorporados a nuestro día a día. Gracias a estas tecnologías podemos conectar de forma instantánea con personas que están en otro lugar, consultar información de manera inmediata o trabajar de forma remota. La función de estas redes es la de conectar distintos terminales por medio de ondas electromagnéticas, sin cableado, lo que permite una mayor comodidad de conexión y uso, y un ahorro estructural en el despliegue. Sin embargo, este tipo de redes tienen más retos en la seguridad y la calidad de servicio que las redes cableadas.

Las redes inalámbricas pueden clasificarse por la banda de frecuencia en la que operan (por ejemplo, microondas u ondas milimétricas, o bandas con licencia o sin licencia) o según el organismo de estandarización que las define, aunque lo más común es identificarlas según su área de cobertura, es decir, el alcance al que consiguen llegar dichas redes, desde su punto de acceso inalámbrico.

Las tecnologías de acceso inalámbricas envían señales a través de ondas electromagnéticas que se propagan por el espectro radioeléctrico. Cada banda de frecuencia tiene unas características de propagación diferentes. Las bandas muy bajas tienen muy amplio alcance y entonces son ideales para transmisiones de radio o de televisión. Las bandas muy altas, como las milimétricas, se propagan por el aire con dificultad, y requieren de técnicas de procesamiento digital de la señal muy avanzadas para poderse recibir. Por otro lado, hay mucha banda disponible en esta parte del espectro, lo que permite conseguir picos de velocidad muy altos. Una clasificación de los principales modelos de uso del espectro radioeléctrico es la siguiente:

- **Uso exclusivo del espectro, bajo licencia.** La asignación de licencias para ciertas bandas de frecuencias se realiza en exclusiva para los denominados operadores de telefonía móvil, a menudo a través de costosos procesos de



Para más información sobre clasificación de tipos de redes, consultad el documento *El papel de las redes de computadores en el ciclo de vida de los datos*, asociado al «**Reto 1**. ¿Cuál es el papel de las redes de computadores en el ciclo de vida de los datos?».

subasta pública. El operador se encarga de planificar la red teniendo en cuenta la minimización de la interferencia. Un ejemplo típico de tecnologías de acceso que usan este tipo de bandas de frecuencia son las redes de comunicación móvil 2G, 3G, 4G y 5G.

- **Uso común del espectro, sin licencia.** En esta modalidad múltiples usuarios comparten una banda del espectro radioeléctrico, y los mismos usuarios son los responsables de gestionar la interferencia. Estas bandas son conocidas como ISM (*industrial scientific and medical*), y operan en 2,4 GHz, 5 GHz y 60 GHz (entre otras). Estas bandas no requieren de licencia y los servicios de radiocomunicaciones que funcionan sobre ellas deben seguir unas reglas definidas por organismos reguladores, como el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (European telecommunications standards institute, ETSI), para el caso europeo. Cada región en el mundo puede tener requisitos de acceso diferentes. Por ejemplo, en regiones como Europa o Japón, se requiere que cada dispositivo, antes de transmitir, primero escuche el canal, para asegurarse de que se encuentra libre de interferencia, y acceda durante un tiempo limitado, para favorecer alternarse con el resto de transmisores activos. De este modo se evita generar interferencia a otros sistemas que estén operando en la misma banda. En otras regiones, como por ejemplo en Estados Unidos, no es necesario realizar esta escucha previa del canal, y los dispositivos pueden acceder directamente, respetando otras reglas, como una duración máxima de transmisión, o potencias de emisión máximas, etc. Recientemente se han abierto nuevas bandas sin licencia en la banda de 6 GHz, que serán utilizadas por futuras versiones y evoluciones de Wi-Fi, entre otras tecnologías.

- **Uso compartido del espectro.** En este caso, el adjudicatario de una licencia permite el acceso al espectro licenciado, bajo unas condiciones establecidas por el propio adjudicatario, como por ejemplo en la banda citizens broadband radio service (CBRS) en 3,5 GHz. Otro ejemplo son bandas tradicionalmente asignadas para otros usos. Por ejemplo, en Estados Unidos, durante la administración Obama, las bandas de frecuencia tradicionalmente asignadas para uso militar se abrieron para uso compartido y regulado (AWS-3).

- **Uso dedicado del espectro.** En estos casos, porciones de espectro se dedican a aplicaciones particulares, como es el caso del espectro dedicado para comunicaciones vehiculares en la banda de 5,9 GHz.

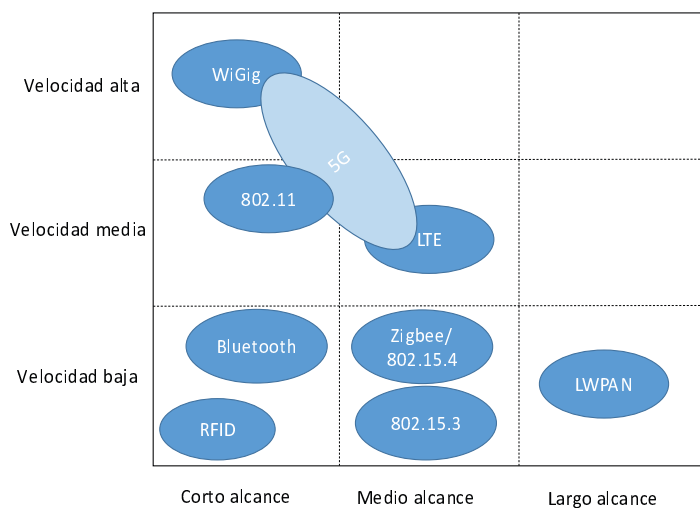
Otro aspecto que permite clasificar las redes inalámbricas es el organismo de estandarización que las define. Entre todos ellos, en este documento nos centraremos en los de mayor impacto comercial: el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), que tradicionalmente define estándares de la familia 802, como el Wi-Fi; y el 3GPP (3rd Generation Partnership Project), que se encarga de la definición de las redes celulares.

A continuación, presentaremos las principales redes inalámbricas en función de su radio de cobertura y alcance, pero siempre teniendo en mente la banda

que usan y el organismo que las define. En particular, trataremos las redes de área personal (*wireless personal area network*, WPAN), las redes de área local (*wireless local area network*, WLAN), que operan en bandas ISM, y las redes de área amplia (*wireless wide area network*, WWAN), que suelen operar con modelos de uso exclusivo del espectro, como es el caso de las redes de comunicación móvil, aunque en los últimos años hemos asistido a evoluciones de estas tecnologías para habilitarlas en el uso de banda sin licencia. Finalmente, también describiremos las redes de área amplia de bajo consumo (*low-power wide area networks*, LPWAN), un tipo especial de redes inalámbricas de larga distancia y bajo consumo energético, especialmente diseñadas para aplicaciones IoT.

La figura 1 resume las diferentes tecnologías que conoceremos, posicionándolas una respecto a otra, en función de su velocidad de transmisión y su alcance.

Figura 1. Mapa de tecnologías inalámbricas



1.1. Redes de área personal inalámbricas

La característica principal de las WPAN es la de tener un alcance muy reducido. El área de cobertura de estas tecnologías alcanza unos pocos (del orden de diez) metros alrededor de una persona, un dispositivo fijo o móvil. Este tipo de redes requieren de muy poca infraestructura, y se basan en protocolos extremadamente simples, a fin de obtener una buena eficiencia espectral, aprovechando los recursos radio.

A diferencia de otras arquitecturas más centralizadas, como por ejemplo las celulares, donde el usuario se conecta a una estación base, en una WPAN, el usuario se conecta a los dispositivos electrónicos que se encuentran a su alrededor. Las WPAN pueden utilizarse para comunicaciones M2M y así habilitar la recogida de datos. Un ejemplo de uso es la recogida de datos fisiológicos de pacientes en ámbito médico.

Las WPAN habilitan diferentes tipos de aplicaciones, con diferentes requisitos de capacidad, consumo de energía, calidad del servicio, y por eso el organismo de estandarización IEEE ha organizado diferentes grupos de trabajo que se encargan del desarrollo del estándar IEEE 802.15, centrándose en las capas física (PHY) y de acceso al medio (MAC). En particular, se han definido tres tipos de WPAN: 1) las que tienen un rango de velocidad elevado, pensadas para aplicaciones multimedia, y altos requisitos de calidad de servicio, 2) las de rango intermedio en cuanto a velocidad y requisitos de calidad de servicio, adecuadas para aplicaciones de audio o de voz y 3) las WPAN de baja velocidad de transmisión. A continuación, presentaremos las principales tecnologías asociadas a los grupos de WPAN definidos.

1.1.1. Bluetooth

La tecnología WPAN de mayor éxito comercial es sin duda el Bluetooth, o IEEE 802.15.1, y se utiliza para la conectividad inalámbrica entre dispositivos de corto alcance. Fue la primera en definirse, y representa una WPAN de rango intermedio. La definición de esta tecnología empezó hace muchos años, concretamente en 1994, cuando la empresa Ericsson empezó a investigar la viabilidad de una interfaz radio de bajo coste para comunicaciones de datos de baja capacidad, que fuera capaz de interconectar los teléfonos móviles y los accesorios de alrededor, con el objetivo de eliminar los cables entre los aparatos.

La tecnología Bluetooth incluye características hardware, software y requerimientos de interoperabilidad. En su desarrollo participaron los principales fabricantes de los sectores de las telecomunicaciones y la informática, quienes crearon en 1998 un grupo de interés especial (*special interest group*, SIG), con propósito de establecer un nuevo estándar. Entre sus características principales destaca el hecho de operar en la banda ISM de 2,4 GHz y soportar hasta ocho dispositivos de forma simultánea.

1.1.2. IEEE 802.15.3

El estándar Bluetooth no se caracteriza por ser una tecnología WPAN de alta capacidad. Para llenar el vacío de las WPAN de alto rango, se definió el estándar IEEE 802.15.3, cuyo grupo de trabajo se formó en 1999. El primer borrador de dicho estándar se publicó en 2003. Al igual que Bluetooth, IEEE 802.15.3 también trabaja en la banda ISM de 2,4 GHz, pero alcanza mayores velocidades de transmisión (entre 11 y 55 Mbps).

1.1.3. IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4, por otro lado, define las características PHY y MAC para WPAN de muy baja velocidad de transmisión. Los dispositivos que utilizan este estándar son extremadamente baratos, de fácil instalación y proporcionan transmisiones fiables y de bajo gasto energético a distancias cortas. De manera similar a las anteriores tecnologías, trabaja en la banda ISM de 2,4 GHz. No obstante, su velocidad de transmisión es mucho más limitada: entre 20 y 250 kbps, valores más bajos que en las anteriores tecnologías.

1.1.4. Zigbee

Zigbee es una tecnología definida por la Alianza Zigbee. Ha sido diseñada para soportar una conectividad más sofisticada que los anteriores sistemas WPAN, por ejemplo en términos de seguridad. Zigbee representa la versión más popular desde el punto de vista comercial de IEEE 802.15.4, especialmente pensada para implementar redes de sensores, siendo considerado el estándar *de facto*. Se despliega principalmente en bandas ISM de 2,4 GHz y sus características principales son el bajo consumo energético y el bajo coste, que permiten despliegues masivos.

La tecnología Zigbee sigue el estándar IEEE 802.15.4 respecto a las capas PHY y MAC, pero desarrolla capas superiores propietarias definidas por la Alianza Zigbee. Las mejoras propuestas por Zigbee se centran en aspectos relacionados con la seguridad, como la autenticación y la encriptación, y la capacidad de enrutamiento dinámico de paquetes de datos, que ofrece la oportunidad de operar en topologías malladas.

El principal beneficio de la topología mallada es que cada nodo (o transmisor) de la red puede comunicarse con el resto de nodos, aunque no se encuentren en su área de cobertura. Esto se implementa a través de la capacidad de reenviar y enrutar los paquetes a través de múltiples saltos y nodos intermedios. Por estas razones, la red puede extenderse a áreas más amplias, y resulta robusta frente a fallos de nodos, gracias a la capacidad de reconfigurar las rutas y la red.

1.1.5. Identificación por radiofrecuencia

Las tecnologías de identificación por radiofrecuencia (*radio frequency identification*, RFID) se ocupan de transmitir la identidad de un objeto (similar a un número de serie único) mediante ondas de radio. En este sentido, se trata de una tecnología habilitadora importante para el paradigma IoT, ya que permite la identificación de objetos.

Las etiquetas RFID (*RFID tag*, en inglés) son dispositivos similares a una pegatina, que pueden asociarse e incorporarse a un objeto. Contienen antenas que permiten la transmisión y recepción de señales. La etiqueta RFID genera una señal de radiofrecuencia que contiene los datos de identificación. Esta señal puede ser captada por un lector, que lee la información y la pasa a la aplicación específica que utiliza RFID. Las tecnologías RFID suelen ser estandarizadas por la Organización Internacional de Normalización (international organization for standardization, ISO).

1.2. Redes de área local inalámbricas


En esta sección presentamos la familia de estándares y protocolos Wi-Fi (IEEE 802.11) pertenecientes al grupo IEEE 802. Este grupo se dedica a la definición y estandarización de las WLAN. Como ya hemos explicado, todas las tecnologías de esta familia, como también es el caso del IEEE 802.15, se centran en los dos niveles más bajos de la arquitectura OSI: PHY y MAC, y no se ocupan de definir las capas más altas.

1.2.1. Conceptos básicos

Las WLAN son una tecnología extremadamente común que suele proporcionar cobertura en oficinas, edificios, apartamentos, o áreas de medio alcance, permitiendo la conexión a internet de portátiles, tabletas, teléfonos móviles, etc. Esta familia de tecnologías puede implementar comunicaciones M2M y permitir la recogida de datos. Un ejemplo de caso de uso es la monitorización de temperatura en apartamentos u oficinas, o la recogida de imágenes en sistemas de videovigilancia.

En una red Wi-Fi el sistema se organiza en celdas que se denominan *basic service set* (BSS). Un BSS está formado por nodos, fijos o móviles, llamados estaciones (*stations*, STA). Cada BSS está gestionado por un punto de acceso (*access point*, AP). El AP es el elemento esencial de la red que transmite y recibe la señal y, por lo tanto, es el que proporciona cobertura a las estaciones que forman parte de la WLAN.

La principal característica del Wi-Fi es la manera en la que accede al medio a través del mecanismo *carrier sense multiple access with collision avoidance* (CSMA/CA) para evitar interferencias y permitir que todas las estaciones puedan compartir el canal de manera automática y descentralizada, sin la necesidad de que el AP decida quién accede y cuándo. Siempre que dos estaciones quieran acceder al canal en la misma área y tiempo habrá un periodo de contienda. Por este motivo, cada vez que una estación desee transmitir, no podrá acceder al canal sin haberlo escuchado primero durante un cierto tiempo y haberse asegurado de que esté libre.



Para más información sobre el nivel MAC del IEEE 802.11 y el CSMA/CA, consultad el documento *Las capas inferiores del modelo OSI*.

1.2.2. Un poco de historia: el estándar IEEE 802.11

La primera versión del protocolo IEEE 802.11 se publicó en 1997 y desde entonces se han publicado muchas enmiendas. De hecho, el proceso de actualización todavía no ha terminado. Recientemente se ha publicado el estándar IEEE 802.11ax y, actualmente, se está trabajando en varias extensiones: la versión IEEE 802.11be para alcanzar velocidades aún más altas y la versión IEEE 802.11ay para bandas de muy alta frecuencia (que se conocen como bandas milimétricas).


Durante veinte años de trabajo, y tras varias enmiendas y mejoras, el IEEE 802.11 ha pasado de ser un protocolo de acceso radio sencillo, a un protocolo muy sofisticado, que incorpora tecnologías de comunicaciones cada vez más complejas y que permiten utilizar el espectro radioeléctrico de una forma cada vez más eficiente (ver la figura 2), incorporando características propias de las redes celulares, como los protocolos de correcciones de errores y retransmisión, o la asignación centralizada de los recursos. Los estándares IEEE 802.11 utilizan las bandas ISM de 2,4 GHz, 5 GHz y 60 GHz. Las nuevas versiones también están habilitadas para operar en la nueva banda de 6 GHz, que se ha liberado recientemente para su uso sin licencia.

En 1999 se publicó la versión **IEEE 802.11b**, que está basada en cambios menores respecto a la versión original. El estándar IEEE 802.11b opera en la banda de 2,4 GHz, alcanza una velocidad máxima de 11 Mbps y ha sido un estándar extremadamente usado durante una década.

El mismo año se publicó la versión **IEEE 802.11a**, que fue la primera versión del IEEE 802.11 en operar en la banda de 5 GHz. Sin embargo, nunca llegó a tener tanto éxito en el mercado como el IEEE 802.11b. El IEEE 802.11a aumenta la velocidad de transmisión hasta 54 Mbps. Su principal característica es la implementación de una modulación conocida como *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM).

En 2003, se publicó el **IEEE 802.11g**, una evolución del IEEE 802.11b. Este estándar se definió con el objetivo de incrementar la velocidad de transmisión en la banda 2,4 GHz a 54 Mbps, incorporando en esta banda el uso de OFDM que ya se había propuesto para la banda de 5 GHz con el 802.11a. Otro aspecto mejorado en el IEEE 802.11g es la seguridad.

La versión más popular en el mercado es el **IEEE 802.11n**. Se lanzó en el año 2009, opera tanto en la banda de 2,4 GHz como en la 5 GHz y permite una velocidad de transmisión mayor que el IEEE 802.11a y el IEEE 802.11g. Esta versión es la primera en utilizar técnicas más sofisticadas, como la técnica MIMO-OFDM (*multiple-input, multiple-output; orthogonal frequency-division multiplexing*), que hoy en día es una de las tecnologías más usadas en Wi-Fi.



Podéis encontrar más información sobre el IEEE 802.11 en el libro *Computer Networks: A Top Down Approach* y en el resto de documentación del reto 2.

OFDM

Es una técnica de modulación que consiste en enviar la información usando al mismo tiempo diferentes bandas frecuenciales, lo que la hace más robusta contra interferencias y capaz de transmitir un mayor número de bits por segundo.

MIMO

Un sistema de comunicaciones MIMO utiliza dos o más antenas en transmisión y recepción. Esto permite al sistema proporcionar uno o múltiples flujos independientes de información entre transmisor y receptor, el que puede aumentar tanto la calidad de la transmisión como el rendimiento.

La siguiente versión, **IEEE 802.11ac** propone el uso de una modulación más elevada que sus antecesores (conocida como 256-QAM) y una codificación de canal más robusta. Además, introduce tecnologías de comunicación a múltiples usuarios de forma simultánea y a través de múltiples antenas, más sofisticadas, que se conocen como MIMO multiusuario (MU-MIMO).

IEEE 802.11ax es la última revisión aprobada. El objetivo de esta versión, diseñada para alcanzar los 10 Gbps, es el aumento de la eficiencia en la transmisión radio y de la capacidad de transmisión. La principal funcionalidad que introduce es la conocida como *orthogonal frequency division multiple access* (OFDMA), que permite, como novedad respecto a las versiones anteriores, el acceso simultáneo al canal de múltiples usuarios. Adicionalmente, esta versión incluye funcionalidades de recuperación de errores, como HARQ (*hybrid automatic repeat request*). El sistema IEEE 802.11ax puede operar en las típicas bandas de 2,4 y 5 GHz, pero también podrá acceder a la nueva banda de 6 GHz, que ha sido liberada recientemente. La evolución de esta versión es el **IEEE 802.11be**, cuya definición todavía se encuentra en curso en el momento de edición de este documento.

Por otro lado, el sistema Wi-Fi no solo opera en bandas sin licencia por debajo de los 7 GHz, sino que también existen versiones para acceso sin licencia en la franja milimétrica de los 60 GHz. Por este motivo, se empezó a desarrollar el **IEEE 802.11ad**, el primer estándar para estas bandas que comúnmente se llama WiGig. La evolución de este estándar es el **IEEE 802.11ay**.

MU-MIMO

Esta tecnología permite transmisiones muy direccionales, que focalizan la señal en los usuarios receptores. Además, es capaz de permitir transmisiones simultáneas a múltiples usuarios.

OFDMA

Es un mecanismo de acceso al medio que divide la banda disponible en un conjunto de subbandas que se asignan en grupos, en función de la calidad de servicio requerida por los usuarios o sus condiciones de canal.

Las **comunicaciones milimétricas** están motivadas por la disponibilidad de una gran cantidad de espectro por encima de los 24 GHz. En particular, hubo una primera liberación de 9 GHz de espectro en Europa y 14 GHz en los Estados Unidos, en la banda alrededor de los 60 GHz. Esta cantidad de espectro es extremadamente grande y ofrece nuevas oportunidades de desarrollo tecnológico en las bandas milimétricas. Para intentar dar una idea de los órdenes de magnitud, la cantidad de espectro radioeléctrico disponible en Europa en estas bandas es diez veces mayor que todo el espectro no licenciado que existe por debajo de los 7 GHz en las bandas de 2,4 GHz, 5 GHz y 6 GHz y que hoy en día estamos utilizando en nuestras redes Wi-Fi. En los Estados Unidos estos números son aún más extraordinarios.

El uso de estas frecuencias se considera inevitable para alcanzar las velocidades del orden de las decenas de Gbps por usuario. Sin embargo, las condiciones de propagación de las señales en estas bandas son mucho más complejas que en las bandas tradicionales de Wi-Fi. Frente a estas dificultades, las tecnologías que operan en estas bandas,

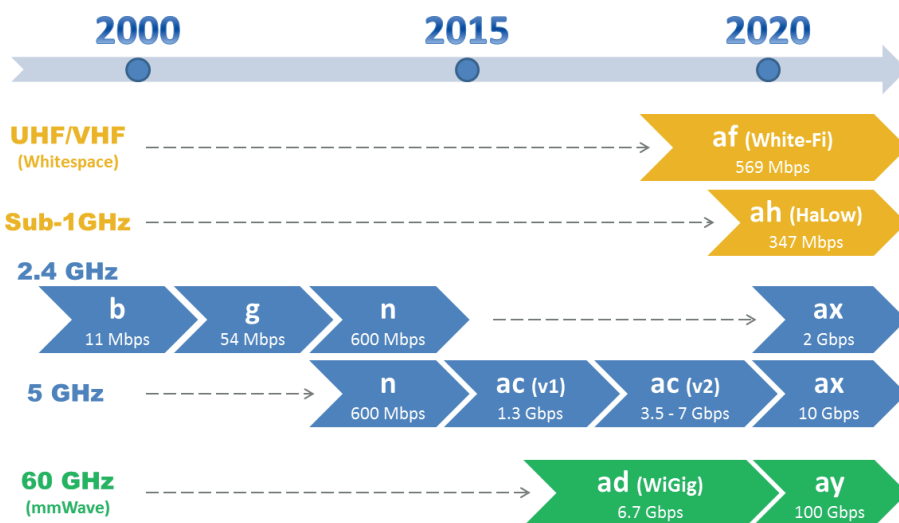
como el IEEE.11ad y el IEEE.11ay, tienen que realizar transmisiones caracterizadas por la direccionalidad. Debido a la gran dificultad tecnológica para realizar transmisiones en altas frecuencias, estas bandas no se han considerado como prioritarias para las comunicaciones inalámbricas hasta hace poco.

Para el tráfico IoT, resulta particularmente indicado el **IEEE 802.11ah** (o **Wi-Fi HaLow**), una modificación que opera en las bandas ISM sub-1 GHz de 868 MHz y 915 MHz, y que permite una mayor eficiencia energética.

Finalmente, cabe destacar el **IEEE 802.11af** (o **White-Fi**), una modificación que utiliza las bandas reservadas para el servicio de televisión que no están completamente utilizadas, entre las frecuencias de 54 y 790 MHz. Al utilizar unas frecuencias mucho más bajas que el Wi-Fi tradicional, el radio de cobertura es muy amplio (≈ 1000 m).

La figura 2 resume la evolución del estándar IEEE 802.11 en el tiempo.

Figura 2. Diagrama temporal de la evolución del estándar IEEE 802.11



1.3. Redes de área amplia inalámbricas

Las redes de área amplia inalámbricas (WWAN) proporcionan servicios de telecomunicaciones sobre zonas geográficas extensas y mantienen la continuidad del servicio mientras el usuario se desplaza geográficamente. El ejemplo más común de este tipo de redes son los sistemas de comunicaciones móviles celulares. Este tipo de redes también pueden habilitar comunicaciones M2M para la recogida de datos. Algunos ejemplos de aplicación podrían ser la monitorización de aspectos relacionados con vehículos, mercancías, animales, la posición de estos, etc.

En esta sección introducimos conceptos básicos relacionados con las redes celulares y presentamos su evolución a través de las diferentes generaciones de telefonía móvil.

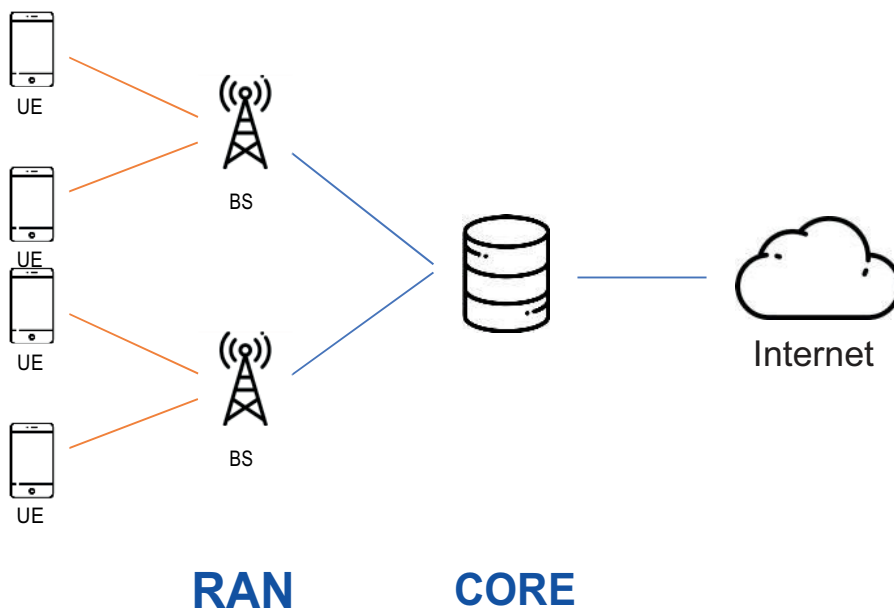
1.3.1. Conceptos básicos

Las redes celulares están formadas por células o celdas, cada una de ellas con su propio transmisor/receptor, que recibe el nombre de estación base (*base station*, BS) y que constituye el punto de contacto entre el usuario y la red. Las comunicaciones dentro de una celda suelen ser punto a multipunto entre la estación base y sus usuarios (*user equipment*, UE). El número, la ubicación y la configuración de estas estaciones base son definidos por el operador de telefonía móvil, durante la fase de planificación de la red. En particular, la red se diseña para proporcionar el servicio deseado en las zonas objetivo, con la calidad deseada en las comunicaciones y la capacidad suficiente para el número de clientes contratados.

En los libros y en la teoría, las redes celulares se modelan como celdas con área hexagonal, porque la forma hexagonal permite cubrir de manera óptima las áreas objetivo. En realidad, la dimensión y la forma de una celda pueden ser muy variadas y dependen de muchos factores, como el diseño de la red, el tipo de terreno, los obstáculos alrededor de la base, el entorno de despliegue, etc. En áreas urbanas las celdas tendrán dimensiones pequeñas y áreas irregulares, porque la presencia de muchos edificios obstaculiza la propagación de las ondas electromagnéticas; además, las áreas urbanas son áreas de alta demanda de tráfico. Por otro lado, áreas más rurales tendrán celdas más grandes y regulares debido a la ausencia de obstáculos, y la menor densidad de usuarios. Otro aspecto que afecta significativamente a la planificación de estas redes es la frecuencia de operación. Las bajas frecuencias tienen mejores características de propagación, pueden atravesar obstáculos y garantizan áreas de cobertura muy amplias. Por ejemplo, las señales de televisión usan bandas muy bajas en el espectro para garantizar propagaciones de amplio alcance. En cambio, las altas frecuencias tienen peores características de propagación y favorecen despliegues con celdas más pequeñas. Estas frecuencias son más útiles para entornos urbanos o interiores.

La **arquitectura de sistema** es el conjunto de nodos e interfaces que hacen posible la comunicación entre una estación base y un terminal móvil. Dicha arquitectura se divide en dos partes: la **red de acceso** (*radio access network*, RAN) y el **núcleo de red** (*core network*). La siguiente figura describe una arquitectura de red típica.

Figura 3. Arquitectura de un sistema celular



Fuente: Icons made by Freepik <www.flaticon.com>


En la RAN, cada estación base necesita acceder al medio o canal radio para comunicarse con sus usuarios, de manera que su señal se tiene que procesar para ser recibida sin confusión por los diferentes usuarios. Con este fin se usan mecanismos de **acceso al medio** generalmente coordinados por la BS, que estipula quién transmite o recibe a cada instante y en qué banda frecuencial o periodo de tiempo.

En resumen, la diferencia fundamental entre las redes celulares y el Wi-Fi es que en las redes celulares la BS es el cerebro de la operación, decide qué usuarios acceden en cada momento y los recursos que consumirán, mientras que en una red Wi-Fi los mecanismos de acceso son descentralizados, como ya hemos explicado, y requieren que el nodo transmisor escuche el canal antes de acceder para asegurarse de que esté libre.

Los mecanismos de acceso implementados por la BS garantizan ausencia de colisiones dentro de una misma celda y, por tanto, pueden ser más eficientes que los mecanismos de acceso que se basan en contienda, como el Wi-Fi. Ejemplos de mecanismos de acceso determinados por la BS son los *time division multiple access* (TDMA), *frequency division multiple access* (FDMA), *code division multiple access* (CDMA) o OFDMA.

Otra característica fundamental de las redes celulares es la alta movilidad. Cuando un usuario en movimiento sale del área de cobertura de su celda para entrar en la de otra, realiza una operación que se denomina *handover*, que garantiza el traspaso de la comunicación entre diferentes celdas de forma transparente al usuario.

La responsabilidad de la especificación de las redes celulares es de la Unión Internacional de Comunicaciones (international telecommunications union, ITU), un organismo de las Naciones Unidas. En particular, el proyecto 3GPP (3rd Generation Partnership Project) se encarga de especificar todos los aspectos comunes de la tecnología que la industria debe tener en cuenta para facilitar la interoperabilidad a escala global de dispositivos y equipos de red. El 3GPP está constituido por organismos normativos de diferentes regiones. Uno de ellos es el ETSI, en Europa, una organización que se encarga de adaptar los documentos elaborados por el 3GPP a las normas europeas y de definir normas regionales.



Para profundizar más sobre los conceptos básicos de redes celulares, consultad el capítulo 6 del libro *Computer Networking: a top down approach*.

1.3.2. Un poco de historia: del 1G al 5G

El sector de las comunicaciones móviles celulares ha sido extremadamente dinámico en las tres últimas décadas, incentivado por las exigencias de los mercados, la demanda de los usuarios y las estrategias comerciales de los operadores de red y los fabricantes de dispositivos. La evolución experimentada ha sido increíble y sin precedentes tecnológicos similares. La Asociación GSM o GSMA cuenta con más de 9,3 mil millones de conexiones celulares en el mundo; es decir, hoy en día hay más conexiones celulares activas que personas en el mundo.

Las tecnologías de redes móviles han evolucionado a lo largo de estos años a través de cinco generaciones:

- **Sistemas de primera generación (1G).** Los sistemas de primera generación ofrecían, en los años ochenta, servicios de telefonía a través de tecnología analógica. Dentro de estos sistemas destacan el *advanced mobile phone service* (AMPS), el *total access communication system* (TACS) y el *nordic mobile telephony* (NMT). En esta época aún no predominaba una tecnología global o un único organismo de estandarización.
- **Sistemas de segunda generación (2G).** Aparecieron a principios de los años noventa, caracterizándose por emplear por primera vez tecnologías de transmisión digital en la interfaz radio. La tecnología 2G predominante que se impuso como estándar mundial *de facto* fue el *global system for mobile communications* (GSM). Esta tecnología tenía inicialmente un espectro asignado en la banda 890-915 MHz para el enlace de subida (del UE a la BS) y

935-960 MHz para el enlace de bajada (de la BS al UE). La banda disponible se aumentó en 1998 (1710-1785 MHz y 1805-1880 MHz). A pesar de su éxito, los sistemas 2G no tenían capacidad para ofrecer servicios de datos, que eran completamente ausentes. Para introducirlos, se definieron varias extensiones, como el *general packet radio service* (**GPRS**) o *enhanced data rates for GSM evolution* (**EDGE**). Todos los sistemas 2G usan una tecnología de acceso mixta TDMA/FDMA.

- **Sistemas de tercera generación (3G).** Con el objetivo de facilitar el servicio de tráfico multimedia, se diseñó un salto tecnológico importante basado en una interfaz radio de mayor capacidad, ofrecido por un acceso basado en *wideband code division multiple access* (WCDMA). El estándar propuesto en Europa por el 3GPP fue el *universal mobile telecommunications system* (**UMTS**). Contrariamente a las previsiones, o más bien a las esperanzas del mercado, los servicios de datos tardaron en consolidarse entre los usuarios. El 3G no fue el éxito que, en cambio, sí fue el GSM. El cambio determinante para arrancar, de una vez por todas, estos servicios fue el lanzamiento de los primeros *smartphones* y del primer iPhone en 2007. Solo entonces a la oferta de datos se le empezó a asociar una demanda efectiva por parte de los usuarios. La generalización de las tarifas planas promovidas por los operadores de telefonía fue determinante e hizo el resto para que el acceso a internet móvil se popularizase cada vez más. Para incrementar la capacidad y mantener cubiertas las necesidades de los usuarios, el 3GPP generó variantes del estándar UMTS que incluían mejoras orientadas al aumento de la capacidad de transmisión, como el *high speed packet access* (**HSPA**) y el *high speed packet access evolution* (**HSPA+**), que se publicaron a partir de 2008.

- **Sistemas de cuarta generación (4G).** El 3GPP inició en 2004 los estudios para evolucionar la red 3G a 4G a través de la nueva tecnología *long term evolution* (**LTE**), que se encargaría de satisfacer las necesidades tecnológicas mundiales en la década 2010-2020. Este estándar fue el segundo enorme éxito comercial de la historia de las comunicaciones móviles. El 3GPP marcó unos elevados requisitos de transmisión. En concreto, se fijaron 100 Mbps en el enlace descendente (de la BS al UE) y 50 Mbps en el ascendente (del UE a la BS), en un ancho de banda de hasta 20 MHz. Estos requisitos fueron sucesivamente ampliados a 100 Mbps en movimiento y 1 Gbps en reposo, a través de las variantes LTE-Advanced (**LTE-A**) y **LTEPro**. Para alcanzar dichos objetivos, LTE usa la modulación OFDM, y el mecanismo de acceso para múltiples usuarios OFDMA.

- **Sistemas de quinta generación (5G).** En 2018, el 3GPP publicó el nuevo estándar de tecnología de acceso para 5G, *new radio* (NR). Esta nueva tecnología aún utiliza OFDM y OFDMA y, a diferencia de LTE (que está pensado para operar solo en bandas de frecuencia por debajo de los 6 GHz), opera en anchos de banda mucho más amplios, desde frecuencias muy bajas (0,4 GHz) hasta los 100 GHz. Hasta 2019 se han autorizado en las bandas milimétricas los rangos de frecuencia 1, FR1 (450-7125 MHz) y 2, FR2 (24250-52600 MHz). Durante la Release 17, el 3GPP ha planificado el estudio de su uso MIMO

TDMA

El acceso múltiple por división de tiempo es una técnica de acceso para que múltiples usuarios puedan compartir el canal sin interferir entre ellos, donde el tiempo se organiza en espacios temporales de tamaño uniforme (*slots*) que se asignan a los diferentes usuarios de manera ortogonal.

FDMA


El acceso múltiple por división de frecuencia es una técnica de acceso para que múltiples usuarios puedan compartir el canal sin interferir entre ellos, donde la banda de frecuencia se organiza en subbandas de dimensión uniforme que se asignan a los diferentes usuarios de manera ortogonal.

WCDMA


El acceso múltiple por división de código es una técnica de acceso de múltiples usuarios al canal, donde todos los usuarios transmiten a la vez, sin separación temporal, ni frecuencial. Estas transmisiones se separan a través de la aplicación de códigos.

hasta los 71 GHz. Las características más novedosas del sistema 5G son: la incorporación de comunicaciones milimétricas, la introducción del concepto de MIMO masivo, donde muchas más antenas se concentran en el transmisor y en el receptor para aumentar la direccionalidad de la transmisión, la eficiencia espectral y la capacidad del sistema, y la gestión software de la red mediante *software defined networking* (SDN) y *network function virtualization* (NFV).

Las comunicaciones móviles han representado en las últimas décadas una de las mayores revoluciones tecnológicas, que han impactado profundamente en nuestra vida y la sociedad, siendo el GSM (2G) y el LTE (4G) sin duda las dos tecnologías más exitosas.



Tanto el OFDM como el OFDMA se han introducido en el apartado anterior, ya que también la tecnología Wi-Fi adoptó estos esquemas de modulación.



En el documento *Almacenar, compartir y procesar datos a través de las redes de computadores* del Reto 4 se introducen los conceptos SDN y NFV.

1.4. Redes de área amplia de baja potencia

Las redes de área amplia de baja potencia (*low-power wide area networks*, LPWAN) son una tecnología de comunicación prometedora orientada al IoT y, por tanto, de especial interés para la recogida de datos. Las LPWAN son redes de área amplia inalámbricas diseñadas para lograr grandes rangos de cobertura, extender la vida útil de la batería de los dispositivos finales y reducir el coste operativo de las redes celulares tradicionales.

Se caracterizan por explotar la banda ISM de frecuencia sin licencia, por debajo de 1 GHz, y por transmitir de forma esporádica pequeños paquetes a baja velocidad de datos, lo que, combinado con esquemas de codificación más robustos, permite que el receptor pueda llegar a decodificar señales con potencias recibidas más bajas que en otras tecnologías inalámbricas.

En general, cualquier LPWAN se caracteriza por las siguientes cinco propiedades:

- **Bajo consumo:** normalmente los dispositivos LPWAN funcionan con baterías cuya vida útil se extiende durante meses e incluso años, por lo que los protocolos de comunicación están específicamente diseñados para ahorrar el máximo de energía tanto en el acceso al medio inalámbrico como en la transmisión de paquetes.
- **Gran alcance:** las LPWAN pueden alcanzar rangos de cobertura de 1 a 15 km en áreas urbanas, debido al uso de hardware de alta sensibilidad; es decir, son capaces de recibir señales de muy baja potencia.
- **Baja velocidad:** el gran alcance comentado en el punto anterior se consigue mediante esquemas de codificación muy robustos que afectan a la velocidad de los enlaces, por lo que raramente llegan a las decenas de kbps.
- **Bajo coste:** los dispositivos LPWAN constan típicamente de un pequeño microprocesador con memoria, un transceptor inalámbrico y algunas interfaces de entrada/salida, con lo que se reduce ampliamente su coste.

- **Escalabilidad:** las redes LPWAN están diseñadas para alojar centenares e incluso miles de dispositivos que deben compartir el medio inalámbrico, por lo que sus protocolos de comunicación están específicamente diseñados para soportar este grado de escalabilidad.

Tal y como se muestra a continuación, las principales tecnologías LPWAN pueden clasificarse en tres grandes categorías:

- **Sistemas propietarios:** SIGFOX, Ingenu y Telensa.
- **Sistemas bajo una alianza:** LoRa, Weightless, DASH7 y Wi-SUN.
- **Estándares:** IEEE 802.11ah (también conocido como Wi-Fi HaLow), ETSI *low throughput networks* (ETSI-LTN) y Wireless M-BUS (EN 13757-4).

El 3GPP también publicó sus propios estándares de tecnología LPWAN en el ámbito celular, el *narrow band IoT* (NB-IoT) y el eMTC (*evolved Machine Type Communications*). El principal objetivo de estas tecnologías es conectar un gran número de dispositivos, según el paradigma IoT, a través del uso de bandas licenciadas. Ambas tecnologías usan la infraestructura de la tecnología LTE y entonces representan una extensión del propio estándar LTE. En particular, el NB-IoT soporta anchos de banda muy estrechos, de 200 kHz, lo que permite alcanzar un pico máximo de 250 kbps, y tiene como objetivo trabajar con dispositivos extremadamente sencillos. Por otro lado, el eMTC opera en anchos de banda de 1,4 MHz, lo que permite alcanzar picos de 1 Mbps y está destinado a dispositivos más complejos. El NB-IoT tiene como caso de uso típico los sensores, mientras que los casos de uso del eMTC son los vehículos conectados o la tecnología textil (*wearable devices*). Con respecto al 5G, también se definen extensiones del NR enfocadas a casos de uso IoT. Se trata de la tecnología denominada *Reduced Capability NR* o *NR Light*.

2. Redes inalámbricas de sensores

Hasta ahora hemos visto diferentes tecnologías inalámbricas habilitadoras del IoT como paradigma de generación de datos por excelencia. Veremos ahora diferentes paradigmas tecnológicos que se integran dentro del IoT y que también pueden utilizar los diferentes tipos de tecnologías que hemos visto en el capítulo anterior. Empezamos por las redes inalámbricas de sensores, que fueron las precursoras del IoT y que en la actualidad se encuentran integradas en el mismo, aunque las implementaciones actuales son mucho más reducidas de lo que la tecnología permite.

Una **red inalámbrica de sensores** (*wireless sensor network*, WSN) es una red compuesta por un alto número de dispositivos de baja potencia que monitorean el entorno y envían sus lecturas a uno o más nodos colectores (también conocidos como *sinks*), que se encargan de la agregación de los datos. Los dispositivos que constituyen la red de sensores se llaman nodos sensores y tienen las siguientes características:

- Son pequeños.
- Tienen memoria, capacidad de procesamiento y energía limitadas.
- Se componen de una unidad de detección, una unidad de procesamiento de datos y una unidad de comunicación.
- Tienen un radio de cobertura y una velocidad de datos limitados.
- Las redes de sensores son muy sensibles a daños, lo que hace que la topología de la red sea extremadamente variable.

Las redes de sensores se caracterizan por ser capaces de soportar despliegues muy densos (de centenares e incluso miles de nodos), donde cada nodo se encuentra en el área de cobertura de otros nodos. De este modo es posible retransmitir la información recibida de otros nodos hasta llegar al denominado nodo colector. La posición de cada nodo puede ser aleatoria y no necesita ser predeterminada (de hecho, los nodos pueden llegar a ser móviles). Esto permite despliegues aleatorios en áreas de desastres o territorios inaccesibles y significa que estos nodos deben tener cierto nivel de inteligencia para autoorganizarse de manera cooperativa.

Teniendo en cuenta esta alta densidad de nodos, así como las aplicaciones para las que se idearon, el reto principal de una red de sensores es garantizar el suministro de energía a sus nodos, ya que en general se alimentan de baterías

limitadas. Por eso, mientras los principales retos operativos de las redes tradicionales se asocian a la calidad de servicio, las redes de sensores se centran en ahorrar energía y están caracterizadas por implementar mecanismos que permiten alargar la vida media de la red a costa de reducir su rendimiento.

2.1. Categorías de sensores y aplicaciones

Aunque todos los tipos de sensores presenten características similares, especialmente en términos de coste económico o simplicidad del despliegue, hay tantos tipos de sensores como aplicaciones posibles. Las redes de sensores pueden ser heterogéneas, pueden estar caracterizadas por múltiples tipos de sensores (sísmicos, magnéticos, térmicos, de infrarrojos, acústicos, radar) y pueden controlar una gran variedad de condiciones ambientales (temperatura, humedad, movimiento vehicular, iluminación, presión, ruido, presencia o ausencia de ciertos tipos de objetos e incluso características de ciertos objetos, como velocidad, dimensión, dirección, etc.).

Los sensores se pueden usar para operaciones de monitorización continua en el tiempo, detección e identificación de eventos o control local de los nodos llamados actuadores, que se encargan de ejecutar ciertas decisiones/acciones. Las aplicaciones de esta tecnología son, por tanto, prácticamente infinitas. En este documento las clasificamos en los siguientes grupos:

- **Aplicaciones militares.** Las redes de sensores pueden ser una parte integral de diferentes operaciones llevadas a cabo en el ámbito militar: mando, control, comunicaciones, informática, inteligencia, vigilancia o reconocimiento. El rápido despliegue, la capacidad de autoorganización y la tolerancia a fallos son características que pueden hacer de las redes de sensores una tecnología muy prometedora para ámbitos militares. Algunas de las principales aplicaciones consisten en la monitorización de fuerzas amigas, de equipos y municiones; la vigilancia del campo de batalla; reconocimiento de fuerzas enemigas; detección de ataques nucleares, biológicos y químicos, etc.
- **Aplicaciones ambientales.** El amplio rango de aplicaciones incluye el seguimiento de los movimientos de las aves, los insectos, etc.; la monitorización ambiental de condiciones que afecten a los cultivos o a la irrigación; la agricultura de precisión; la monitorización del mar, del suelo y de contextos atmosféricos; la detección de incendios forestales; la investigación meteorológica o geofísica; la detección de inundaciones; el mapeo de biocomplejidad del entorno, el estudio de la contaminación, etc.
- **Aplicaciones de salud.** En este ámbito se incluye la monitorización de pacientes, el diagnóstico, la administración de medicamentos en hospitales, la monitorización de datos fisiológicos.
- **Domótica.** A medida que la tecnología avanza, los nodos sensores inteligentes y los actuadores pueden ser incluidos en diferentes electrodomésticos.

cos, tales como aspiradoras, hornos microondas, refrigeradores, etc. Los nodos dentro de los dispositivos domésticos pueden interactuar entre sí y con la red externa a través de internet, y pueden permitir a los usuarios finales una fácil gestión de dichos dispositivos de forma local y remota.

- **Aplicaciones industriales.** Entre las aplicaciones industriales destaca la monitorización del uso de los materiales, la gestión de inventarios, la monitorización de la calidad de los productos, la construcción de espacios de trabajo eficientes, el control de las condiciones ambientales en los edificios, el control y guiado de robots, los museos interactivos, el control de procesos en fábricas inteligentes o la monitorización de zonas de desastres, etc.

2.2. Diseño de una red de sensores

El diseño de una red de sensores está influenciado por múltiples aspectos:

- **Tolerancia a fallos.** Frecuentemente, una red de sensores puede verse afectada por fallos de algunos de sus nodos. Algunos nodos pueden quedar bloqueados debido a la falta de batería, haber sufrido daños o estar sujetos a algún tipo de interferencia ambiental. En estos casos, el fallo de un nodo físico no debería afectar al funcionamiento de toda la red. Se define como tolerancia a los fallos la capacidad de una red de mantener operativas sus funcionalidades, independientemente de la existencia de fallos en ciertos nodos.
- **Escalabilidad.** El número de sensores desplegados en un área de observación puede ser muy alto. Las redes y el software que los gestionen tienen que ser capaces de operar de manera escalable con todos estos nodos.
- **Costes de producción.** Los costes de cada nodo tienen que ser bajos para justificar una inversión razonable en el despliegue de una red de sensores.
- **Gestión de la topología.** Cuanto mayor es el número de sensores que forman la red, más complicada es la gestión de su topología. En consecuencia, para ser capaces de desplegar una red muy extensa, se necesitan ciertos mecanismos de simplificación para mantener los costes de instalación bajo control. Por ejemplo, es recomendable evitar despliegues de los nodos de forma exacta e intentar mantenerlos lo más aleatorios posibles, garantizando una cierta densidad en la zona de interés. Además, el despliegue tiene que hacerse con el objetivo de promover la autoorganización y la tolerancia a los fallos. En definitiva, la topología siempre es susceptible de verse modificada después del despliegue como consecuencia de fallos, disponibilidad energética, modificación de tareas, etc.

3. Drones

Otro paradigma de comunicaciones integrado en el IoT es el de los drones. Este es un paradigma de actualidad y que aún está por mostrarnos todo su potencial en cuanto a aplicaciones posibles en nuestro día a día. Recordad que para implementar este tipo de soluciones es necesario utilizar tecnologías inalámbricas como las que vimos en el capítulo 1. Las redes compuestas por drones es un paradigma de comunicación, que debe ser habilitado por tecnologías específicas según los requisitos de funcionamiento.

Un dron o UAV (*unmanned aerial vehicle*) es una aeronave sin humano a bordo. Esta tecnología es útil para aplicaciones que no requieren intervención humana o que son, generalmente, peligrosas para los humanos, como es el caso de la monitorización de zonas de guerra o desastres naturales. Además, también han demostrado ser una solución eficiente para proporcionar servicios de banda ancha y conectividad en entornos de emergencia.

Los drones pueden estar controlados remotamente por un humano en una estación de control terrestre o pueden volar de manera autónoma mediante programas de vuelo preprogramados o sistemas de control automático más complejos.

Generalmente, los drones se clasifican según las siguientes características:

- **Máxima carga útil:** la carga útil de un dron varía de decenas de gramos a centenares de kilogramos. Cuanto más grande es el peso soportado, más equipamiento y accesorios puede transportar un dron. Un ejemplo de carga de un dron es una videocámara o un sensor de vigilancia. Cuando los drones se integran a las redes celulares, actúan como nodos retransmisores o estaciones base. En estos casos, también pueden llevar una estación base para proporcionar servicios celulares.
- **Alcance, rango:** el rango se refiere a la distancia desde la que el dron puede ser controlado remotamente. Este parámetro varía desde decenas de metros, para drones pequeños, hasta centenares de kilómetros para drones muy grandes.
- **Altura:** se refiere a la máxima altura que un dron puede alcanzar, independientemente de la regulación en la cual opera. Existen plataformas de baja altura (*low-altitude platform*) y plataformas de gran altura (*high-altitude platform*).

- **Velocidad y tiempo de vuelo:** los drones pequeños pueden volar a unos 15 km/h, mientras que los drones más grandes pueden alcanzar velocidades del orden de los 100 km/h. El tiempo de vuelo, por otro lado, se refiere al máximo tiempo que un dron puede estar volando sin necesidad de recargar combustible. Los drones pequeños y comerciales pueden volar de forma ininterrumpida durante 30 minutos, mientras que los drones más grandes pueden alcanzar las 5 horas.
- **Fuente de alimentación:** la fuente de alimentación de un dron determina su resistencia. Los drones comerciales pequeños normalmente usan baterías recargables. Por otro lado, un dron muy grande normalmente se alimenta con combustible. De forma alternativa, la energía solar es una fuente de energía prometedora.

Además de las conocidas operaciones militares, esta tecnología tiene muchas aplicaciones civiles. Actualmente, los drones se utilizan para aplicaciones como la monitorización de las condiciones de tráfico en la ciudad, la sensorización remota, la provisión de cobertura celular en áreas de desastres o emergencias, la seguridad y vigilancia, la agricultura de precisión o la inspección de infraestructuras civiles, etc. Una aplicación de interés para la recogida de datos es la sensorización remota, en la que los drones se pueden utilizar para recopilar datos de sensores de tierra y entregarlos a las estaciones base.

El dron también puede operar como nodo sensor móvil. Las redes de sensores estáticas presentan ciertos límites, mientras que la introducción de un nodo móvil puede revelarse útil para sensorizar más cerca del área objetivo y proporcionar mayor granularidad. Por otro lado, un nodo colector (*sink*) móvil permite recoger datos de los sensores en el campo cada vez que este pase cerca de ellos. Esto es especialmente interesante para reducir el gasto energético de los nodos con transmisiones de alta potencia y para resolver hipotéticos problemas de cobertura de algunos nodos debido a algún fallo en la red.

4. Redes celulares y terminales móviles como fuente de datos

Hemos visto hasta ahora diferentes paradigmas de comunicación integrados en el IoT y diferentes tecnologías inalámbricas habilitadoras de estos. La idea principal del IoT es la de desplegar una red que sea capaz de recopilar datos del entorno y, en algunos casos, actuar sobre él basándose en el procesamiento de esos datos. Es decir, la red actúa como generadora de datos en vez de como un medio para descargarse los datos que están almacenados en algún lugar (como veremos más adelante en esta asignatura). Pero las redes inalámbricas pueden también ser por sí solas fuentes generadoras de datos, un ejemplo muy claro es el de las redes de telefonía móvil, que al estar gestionadas por un operador, permiten la recolección de estos datos, así como su explotación.

Las redes de telefonía móvil, en el marco de su funcionamiento diario, generan una enorme cantidad de datos en forma de medidas, información de control o de gestión. Los datos extraídos de las redes de telefonía móvil representan una gran cantidad de información y constituyen un gran capital para los operadores de telefonía. Podemos clasificar de este modo los diferentes tipos de información que podrían obtenerse a través de una red móvil:

- Información de control asociada a los usuarios a corto plazo, relativa al funcionamiento regular de la red: establecimiento de llamadas y sesiones, información de control de los recursos radio, seguridad, información de movilidad, información de control intercambiada entre nodos con objetivos de gestión de recursos radio, gestión de la movilidad, estadísticas de fallos en los radioenlaces, gestión de interferencia, etc.
- Información de gestión de la red, asociada a su funcionamiento a largo plazo. Algunos ejemplos podrían ser las estadísticas agregadas mantenidas en las redes LTE en cuanto a las prestaciones de red, el número de usuarios activos, el porcentaje de *handovers* exitosos, etc.
- Información de autenticación, autorización y contabilidad (*authentication, authorization and accounting*, AAA), como por ejemplo los archivos de datos de cobro (*charging data records*, CDR).
- Información sobre relaciones con los clientes, como reclamaciones sobre la calidad de servicio, histórico de usuarios y cambios de gestor, etc.

Los casos de uso en los que estos datos representan un valor añadido se pueden clasificar en tres grandes categorías:

- **Optimización de la propia red celular:** los datos extraídos y analizados de una red constituyen una importante fuente de información para descubrir fallos, ajustar parámetros de configuración y optimizar la red.
- **Mejora de la inteligencia empresarial:** la inteligencia empresarial del operador de telefonía se vería reforzada a través del análisis de los datos generados desde la propia red. Por ejemplo, en cuanto a la atención al cliente, en vez de resolver problemas de manera reactiva, cuando los clientes presentan una queja o señalan un fallo, el operador de la red podría tener una actitud más proactiva si la red, a través del análisis de datos, pudiera identificar fallos y problemas, anticipándose a la queja del cliente. El análisis de datos podría relacionar el nivel de prestaciones de la red con la probabilidad de que los usuarios opten por cambiar de proveedor, así como ayudar en la definición de acciones proactivas; por ejemplo, ofrecer beneficios adicionales a aquellos usuarios que presenten una alta probabilidad de abandonar el servicio.
- **Datos abiertos (*open data*):** el operador de telefonía móvil podría extraer y exportar sus datos para ofrecerlos a instituciones, empresas o a la propia Administración. De este modo, los datos podrían usarse como información útil para implementar visiones como la de las ciudades inteligentes, o para optimizar el sistema de transporte público, para planificación urbana, demografía, etc. Por ejemplo, una alta carga de la red en una zona específica podría indicar que es necesario un refuerzo del transporte público en esa área concreta de la ciudad. Como es obvio, esta familia de casos de uso requiere una oportuna regulación que tenga en cuenta criterios de seguridad y privacidad.

Los usuarios de la red de telefonía móvil también pueden actuar como sensores y reportar información a bases de datos a través de aplicaciones instaladas en nuestros *smartphones*. Por ejemplo, actualmente, las bases de datos como **OpenCellID** reciben información sobre la cobertura celular global y la penetración de servicios y tecnologías a través de información reportada por los usuarios. De forma similar, la aplicación **Cobertura móvil** de la Generalitat de Cataluña pretende crear un mapa de la red de telefonía en Cataluña con la colaboración de los usuarios de dispositivos móviles para identificar los puntos que necesitan mejorar su cobertura en el territorio.

Finalmente, otras bases de datos abiertas con información generada desde redes de telefonía móvil son: **Opensignal**, que ofrece información detallada por operador sobre la velocidad, la latencia y la disponibilidad alcanzables en una determinada zona; **Antenasgsm**, que ofrece información sobre mapas y posiciones de las estaciones base, incluyendo información sobre la banda utilizada y el operador; **Google geolocations api**, que contiene información tanto de redes celulares como de redes Wi-Fi y proporciona información de localización de las estaciones base.

Ejercicios de autoevaluación

1. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es cierta?
 - a) Las redes de computadores no generan datos.
 - b) Hay redes de computadores que generan datos y otras que habilitan el acceso a datos.
 - c) Las redes móviles no pueden habilitar el acceso a datos.
 - d) Las tecnologías de acceso radio no tienen impacto en la recogida de los datos.
2. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es cierta?
 - a) Todas las bandas del espectro radioeléctrico tienen las mismas características de propagación.
 - b) Todas las bandas del espectro radioeléctrico ofrecen los mismos derechos de acceso.
 - c) Las bandas de frecuencia más bajas tienen características de propagación más favorables que las bandas de frecuencia más altas.
 - d) Las tecnologías de acceso radio acceden sin licencia al espectro radioeléctrico.
3. ¿Qué distingue las WPAN, WLAN y WWAN?
 - a) Su alcance.
 - b) El *throughput* que pueden proporcionar.
 - c) Las características del gasto energético.
 - d) El número de usuarios a los que pueden servir.
4. ¿Qué ha hecho que el estándar IEEE 802.11 mejorara la calidad de servicio que puede garantizar en las modificaciones más recientes?
 - a) La introducción de mejoras en cuanto a la seguridad.
 - b) La evolución hacia tecnologías de comunicaciones que ofrecen mayor eficiencia en las transmisiones inalámbricas.
 - c) Un control de potencia que garantiza control de la interferencia.
 - d) La reducción del tamaño de las celdas.
5. ¿Qué es el *handover*?
 - a) El proceso de traspaso de un usuario de una celda a otra, cuando está en movimiento.
 - b) El traspaso de unos usuarios de una banda de frecuencia a otra.
 - c) La distribución de usuarios sobre recursos radio.
 - d) La capacidad de la red de tolerar fallos.
6. ¿Cuántas generaciones de telefonía móvil se conocen hasta la fecha?
 - a) 3
 - b) 4
 - c) 5
 - d) 6
7. ¿Una de las principales novedades introducidas por el sistema celular 5G es?:
 - a) OFDM
 - b) OFDMA
 - c) La posibilidad de acceder en bandas milimétricas
 - d) HARQ
8. ¿Las redes de sensores son la principal tecnología habilitadora para?:
 - a) IoT
 - b) M2M
 - c) RFID
 - d) Drones
9. Para una aplicación de seguimiento de camiones en tiempo real, ¿qué tecnología de acceso inalámbrico sería más adecuada?
 - a) Celular
 - b) RFID
 - c) Zigbee
 - d) Wi-Fi

10. Para una aplicación de monitorización de temperatura en edificios, ¿qué tecnología de acceso inalámbrico sería más adecuada?

- a) Celular
- b) RFID
- c) Bluetooth
- d) Wi-Fi

Solucionario

1. b
2. c
3. a
4. b
5. a
6. c
7. c
8. a
9. a
10. d

Glosario

3GPP 3rd generation partnership project

AMPS advanced mobile phone service

AP acces point

BS base station

BSS basic service set

CBRS citizens broadband radio service

CDMA code division multiple access

CSMA/CA carrier sense multiple access with collision avoidance

EDGE enhanced data rates for GSM evolution

EMTC evolved machine type communications

ETSI European telecommunications standards institute

FCC federal communications commission

FDMA frequency division multiple access

GPRS general packet radio service

GPS global positioning system

GSM global system for mobile communications

HARQ hybrid automatic repeat request

IMT international mobile telecommunication

IoT Internet of things

ISM industrial scientific and medical

ISO international organization for standardization

ITU international telecommunications union

LR-WPAN low rate wireless personal networks

LTE long term evolution

M2M machine to machine

MAC medium access control

MIMO multiple input multiple output

NB-IoT narrow band IoT

NFV network function virtualization

NMT nordic mobile telephony

NR new radio

OFDM orthogonal frequency division multiplexing

OFDMA orthogonal frequency division multiple access

OSI open system interconnection

PHY physical layer

RAN radio access network

RFID radio frequency identification

RNC radio network controller

SC-FDMA single carrier FDMA

SDN software defined networking

SIG special interest group

STA station

TACS total access communication system

TDMA time division multiple access

UAV unmanned aerial vehicles

UMTS universal mobile telecommunications system

UE user equipment

WCDMA wideband code division multiple access

WLAN wireless local area network

WPAN wireless personal area network

WWAN wireless wide area network

Bibliografía

Agustí, R.; Bernardo, F.; Casadevall, F.; Ferrus, R.; Pérez-Romero, J.; Sallent, O. *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Fundación Vodafone España.

Antenasgsm <<https://antenasgsm.com>>

Atzori, L.; Iera, A.; Morabito, G. (2010). *The Internet of Things: A Survey*, *Computer Networks*. Elsevier.

Cobertura móvil <<http://politiquesdigitals.gencat.cat/ca/tic/cercadors-de-cobertura-00001/cobertura-mobil/>>

Cobertura móvil <<https://www.opensignal.com/>>

IEEE Computer Society (2006). *IEEE standard for information technology, Part 15.4*. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LRWPANs).

opencellid <<https://www.opencellid.org/>>

Shakhatreh, H.; Sawalmeh, A.; Dou, Z. (2018). *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges*. IEEE Access.

Zigbee Alliance (2007). *The ZigBee Specification version 1.0*.