

La especificación original, la 1.0, fue establecida en 1996 y operaba a 12 Mbps, siendo la más reciente la versión 3.1, que permite velocidades de hasta 4 Gbps. La de mayor uso en la actualidad es la 2.0, que está siendo ya sustituida por la 3.0. Se ha definido también una versión inalámbrica, denominada WUSB, para la que ya existe la versión 1.1.

USB define una topología en estrella en varios niveles (Figura 5.15(a)) en la que el nodo central es un *host* encargado de controlar el funcionamiento del sistema y al que se conectan múltiples equipos periféricos o *dispositivos USB* (*USB devices*) a través de un puerto USB que actúa como concentrador (*hub*) raíz. Se permite un apilamiento de hasta 7 niveles mediante el uso de concentradores USB. Cada host puede alojar múltiples controladores y cada controlador puede proporcionar uno o varios puertos USB, a cada uno de los cuales se pueden conectar hasta 127 dispositivos, incluidos los *hubs*.

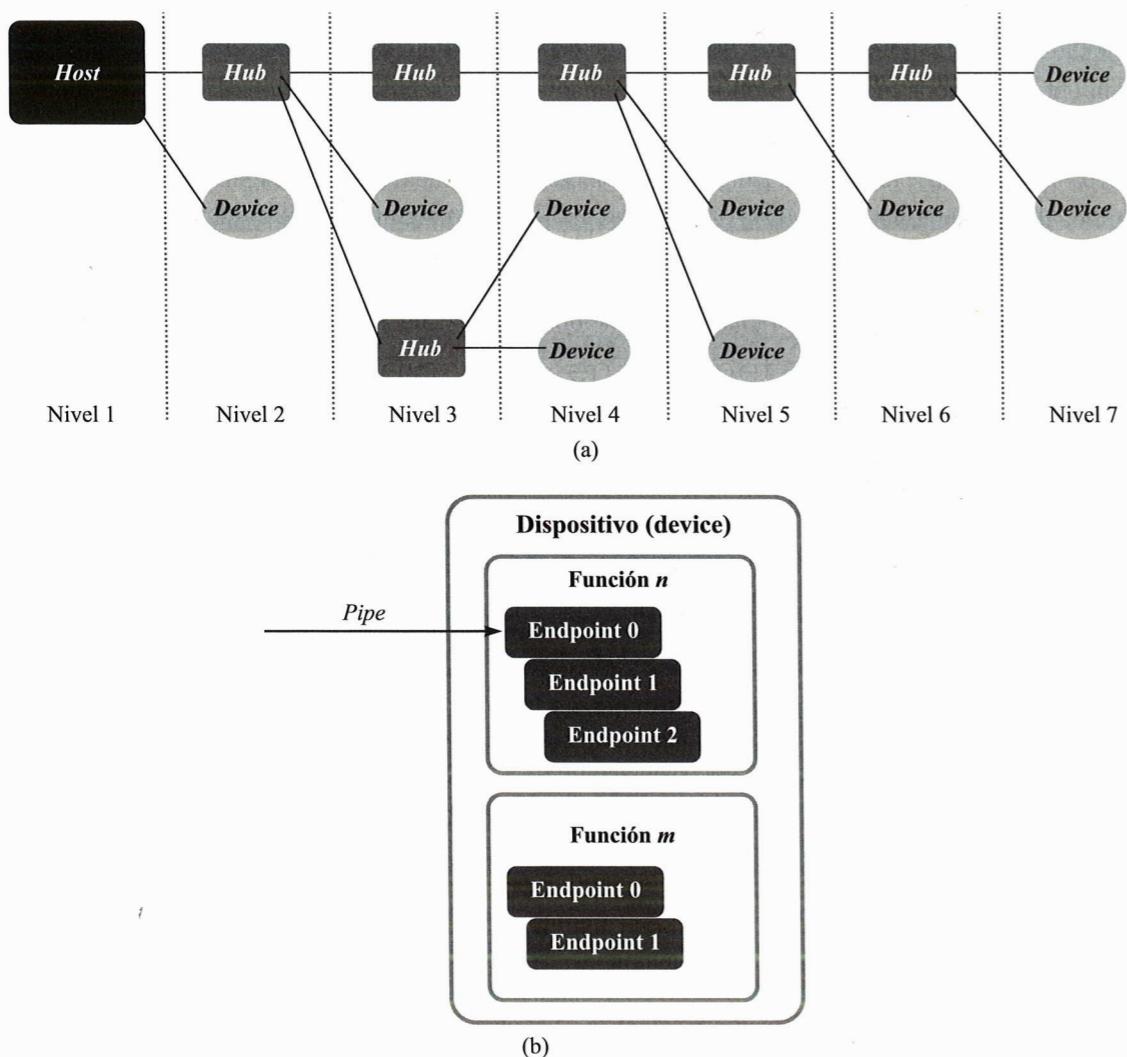


Figura 5.15. Ejemplo de topología en estrella en varios niveles de USB (a) y diagrama conceptual de un dispositivo (b).

Por otra parte, cada dispositivo USB puede constar de uno o varios dispositivos lógicos, denominados *funciones*, en cuyo caso se dice que el dispositivo es compuesto.

La comunicación en USB se basa en canales lógicos (*pipes*) establecidos entre el controlador en el *host* y entidades lógicas denominadas *endpoints*, alojadas en las funciones de un dispositivo (Figura 5.15(b)). Por tanto, para acceder a un extremo de la comunicación se necesita identificar la función y el *endpoint*.

La transmisión de datos se basa en la utilización de paquetes cuyo formato, para la versión USB 2.0, se muestra en la Figura 5.16. Los paquetes son transportados en tramas TDM de 1 ms de duración (Figura 5.16(a)), denominadas tramas USB, agrupados en *transacciones*, cuya operativa se describirá tras presentar los tipos de paquetes.

Los paquetes pueden ser de varios tipos (Figura 5.16(b)), entre los que están los de inicio de trama (SOF, «Start Of Frame»), de testigo, de datos y de control (*handshake*). Los campos incluidos en los paquetes son:

- *SYN*: presente en todos los paquetes. Se usa para sincronizar.
- *PID* («Packet IDentifier»): presente en todos los paquetes. Consta de 4 bits, que identifican el tipo de paquete, seguidos de 4 bits de comprobación consistentes en el complemento de los previos (Tabla 5.4).
- *Dirección*: solo en paquetes de testigo. Contiene la dirección de la función, que consta de 7 bits (127 funciones como máximo en un puerto).
- *Endpoint*: solo en paquetes de testigo. Contiene la dirección del *endpoint*, que consta de 4 bits (máximo de 16 *endpoints* por función y sentido de la comunicación).
- *Número de trama*: solo en los paquetes de tipo SOF. Contiene un número de 11 bits que indica el número de secuencia de la trama. Es incrementado por el host.

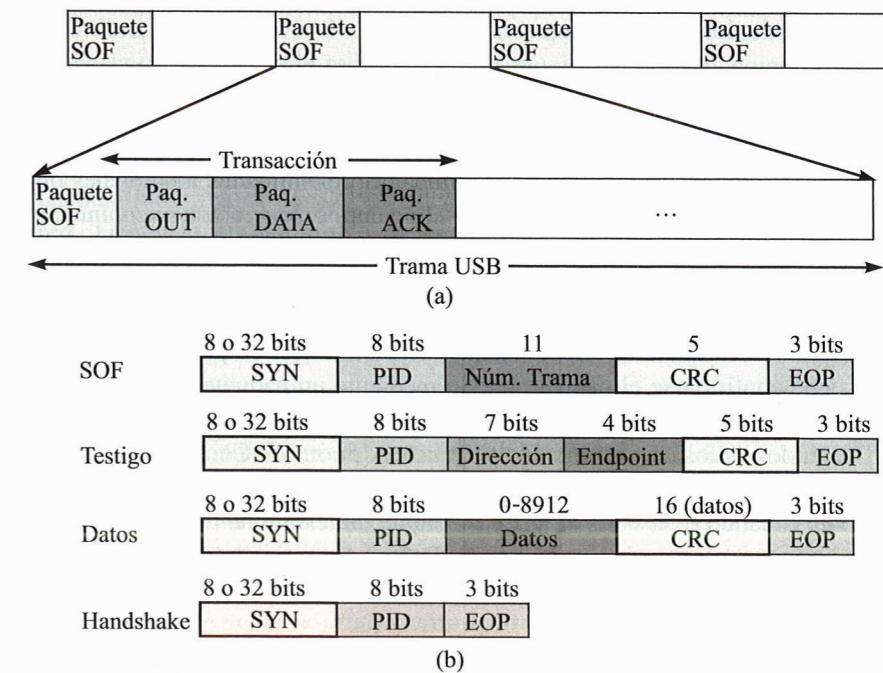


Figura 5.16. Formatos de trama USB (a) y de los paquetes usados en USB (b).

Tabla 5.4. PID para los diversos tipos de paquetes en USB 2.0.

Grupo	Valor PID	Identificador
Token	0001	OUT Token
	1001	IN Token
	0101	SOF Token
	1101	SETUP Token
Data	0011	DATA0
	1011	DATA1
	0111	DATA2
	1111	M DATA
Handshake	0010	ACK Handshake
	1010	NAK Handshake
	1110	STALL Handshake
	0110	NYET (No Response Yet)
Special	1100	Preamble
	1100	ERR
	1000	Split
	0100	Ping

- *Datos*: solo en paquetes de datos. Transporta los datos a transmitir, teniendo un tamaño entre 0 y 1.024 bytes. Debe contener un número entero de octetos.
- *CRC*: secuencia de comprobación de paquete, no incluida en paquetes de control. Se usa para proteger todos los campos, a excepción del PID. En el caso de los testigos se usan 5 bits, con polinomio generador $G(x) = x^5 + x^2 + 1$, mientras que en el caso de paquetes de datos se usan 16 bits, con $G(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$.
- *EOP*: delimitador de fin de paquete.

La comunicación entre el *host* y un *endpoint* se estructura en transacciones compuestas por una secuencia de paquetes que se inicia con un paquete de testigo. En este se indica, en el campo PID, si la transacción es de entrada (IN, desde el *endpoint* al *host*), de salida (OUT, desde el *host* al *endpoint*) o de establecimiento (SETUP), aunque existen algunas posibilidades adicionales que no describiremos. En el caso de transacciones OUT y SETUP los campos *dirección* y *endpoint* identifican al destinatario de los paquetes siguientes, mientras que en el caso de transacciones IN identifican al *endpoint* que debe insertar a continuación sus datos. El paquete de testigo es seguido por uno de datos de tipo IN/OUT según la transacción. En el primer caso, el *endpoint* de destino debe insertar un paquete IN con los datos que deseé transmitir. En el segundo caso es el *host* el que inserta un paquete OUT. Tras este paquete debe confirmarse el paquete previo mediante un paquete de control (*handshake*) por el otro extremo de la comunicación, tras lo que puede finalizar la transacción o insertarse más paquetes IN/OUT seguidos de los correspondientes paquetes de control. Como se deduce del procedimiento previo, es el *host* el que controla todo el intercambio de datos, ya que los dispositivos USB solo pueden insertar datos cuando el *host* les autorice mediante un testigo de tipo IN.

Un procedimiento de control relevante en USB es el denominado *enumeración*, que es el que permite la inserción «en caliente» de dispositivos. Este consiste en la identificación y asignación de una dirección única (función/*endpoint*) a cada dispositivo que se conecte al medio, tras detectarse a nivel físico su incorporación. Durante el proceso de enumeración se identifica el tipo de dispositivo a nivel de modelo y marca, permitiéndose de esta forma la activación o instalación de los *drivers* correspondientes tras la notificación oportuna al *host*.

5.3.3. ZigBee

ZigBee es una tecnología de red inalámbrica categorizada dentro de las redes PAN inalámbricas (WPAN). Fue desarrollada para comunicaciones seguras a baja velocidad y con muy reducido consumo entre dos o más dispositivos. Su entorno de aplicación primario es el despliegue de redes de sensores/actuadores inalámbricos. Se basa en el estándar IEEE 802.15.4, del que toma las capas física y MAC y al que añade una capa de red, seguridad y un entorno de aplicación. La primera versión se definió en 2004 por la Alianza ZigBee (<http://www.zigbee.org>), responsable de la estandarización y certificación de este estándar. A esta versión se le denomina ZigBee 2004. En 2006 se presentó una revisión menor, quedando obsoleta con la versión 2007, que no es compatible con las versiones previas a nivel de red, aunque es posible la conectividad entre equipos de ambos estándares en algunos casos. En 2012 se ha presentado una nueva revisión, ZigBee 2012, que es la actualmente vigente.

Entre las características más relevantes de ZigBee podemos mencionar:

- Opera en la banda ISM de 2,4 GHz, de acuerdo a IEEE 802.15.4 y permite la operación, a nivel regional, en la banda de 915 MHz (América) y 868 MHz (Europa), pudiendo alcanzar tasas de transferencia de 250 kbps a distancias de hasta 100 m en un único salto.
- Incorpora mecanismos para ahorro de energía para todos los tipos de dispositivos.
- Usa topología en estrella, en árbol y mallada (redes *mesh*). Permite comunicación multisalto (*multihop*).
- Incorpora mecanismos para la gestión y generación de claves de seguridad robustas.
- Permite varias opciones de transmisión, incluyendo operación en modo de difusión.
- Utiliza mecanismos de descubrimiento y emparejamiento.
- Permite direccionar un elevado número de dispositivos.

Se definen tres tipos de dispositivos según su función en la red:

- Coordinadores (ZC, «ZigBee Coordinator»): debe haber uno por red. Es el encargado de gestionar la operación de la red, incluyendo funciones globales como la gestión del encaminamiento o la incorporación de nuevos dispositivos.
- Routers (ZR, «ZigBee Router»): tienen la capacidad para actuar como encaminadores en la red, reenviando los datos hacia otros ZR o a los dispositivos finales que dependen de él.
- Dispositivos finales (ZED, «ZigBee End Devices»): son los dispositivos terminales de la red. Tienen la funcionalidad necesaria para comunicarse con el nodo del que dependen, denominado nodo padre, que puede ser un ZR o un ZC. Estos dispositivos pueden permanecer inactivos la mayor parte del tiempo, comunicándose periódicamente con su nodo padre para, en su caso, activar el reenvío de los datos que se hubiesen almacenado con destino hacia él.

Para formar parte de la red, los ZR y ZED deben enlazarse (*binding*) a un ZR o ZC, que será su nodo padre, le asignará una dirección de red y establecerá el perfil asociado al dispositivo.

De forma similar al caso de Bluetooth, en ZigBee se definen perfiles de aplicación, que describen las capacidades y funcionalidades de los dispositivos utilizados para una aplicación específica. La interpretación de los mensajes intercambiados entre dos dispositivos depende de los perfiles activos en esos dispositivos. Actualmente se consideran 11 perfiles diferentes, entre los que se encuentran, por mencionar algunos, HA, «Home Automation», orientado al control domótico; SE, «Smart Energy», para la gestión energética en el hogar; o RC «Remote Control», para control remoto avanzado.

La arquitectura de protocolos de ZigBee se muestra en la Figura 5.17(a), y consta de las siguientes capas y funciones:

- *Capa física*: realiza la transmisión de datos vía radio, acorde a lo especificado en IEEE802.15.4. Opera en la banda ISM, aunque también puede hacerlo, según el país, a 915 o 868 MHz. Define una estructura de 16 canales no solapados (Figura 5.17(b)).
- *Capa MAC*: controla el acceso al medio siguiendo lo establecido en 802.15.4. Utiliza CSMA/CA y DFWMAC, aunque con un formato de trama diferente al utilizado en 802.11.
- *Capa de red*: gestiona el direccionamiento y encaminamiento. En el ZC, es la capa encargada de inicializar la red, asignar las direcciones y añadir y eliminar dispositivos de la red. También gestiona la seguridad e implementa el descubrimiento de rutas usando el protocolo AODV («Ad-hoc On-demand Distance Vector»).

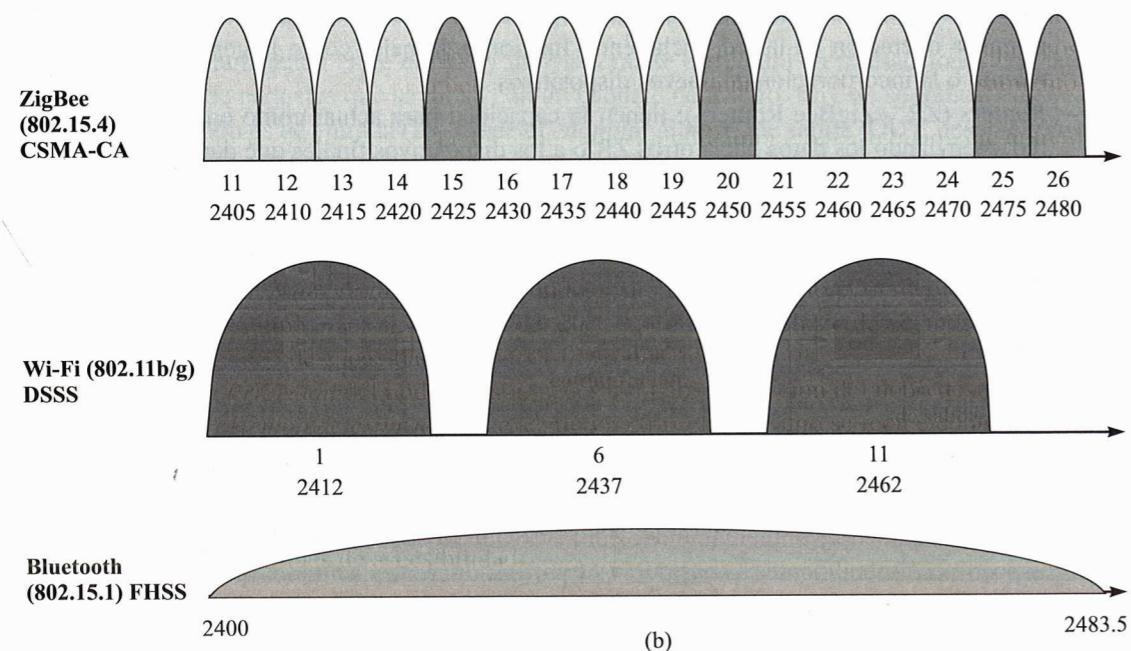
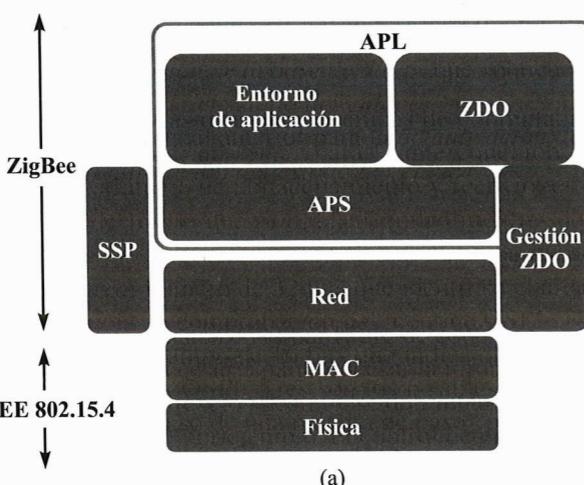


Figura 5.17. Arquitectura de ZigBee (a) y comparación de canales ZigBee con Bluetooth y 802.11 (b).

- *Capa de provisión de servicios de seguridad (SSP, «Security Service Provider»)*: proporciona servicios de cifrado a las capas que lo necesitan.
- *Subcapa de soporte de aplicación (APS, «Application Support Sublayer»)*: es la responsable de proporcionar servicio de transferencia de datos a la capa de aplicación y a los perfiles de dispositivo. Gestiona las asociaciones de dispositivos.
- *Plano de gestión ZDO*: facilita la comunicación entre la capa APS y la de red con los ZDO.
- *Objeto de dispositivo ZigBee (ZDO, «ZigBee Device Object»)*: define el papel de un dispositivo en la red (coordinador, router o dispositivo final), inicia y/o responde a las peticiones de asociación y descubrimiento, además establece relaciones seguras entre los dispositivos de red. También proporciona los comandos de gestión definidos en los perfiles del dispositivo.
- *Entorno de aplicación*: proporciona acceso a las aplicaciones de usuario.
- *Capa de aplicación*: es la capa superior de ZigBee e incluye las subcapas de entorno de aplicación, ZDO y APS.

5.4. Redes de acceso

Para finalizar el capítulo estudiaremos diversas tecnologías que pueden ser utilizadas para la conexión de las redes LAN a otras redes y, en particular, a Internet. Estas se enmarcan dentro de las denominadas tecnologías de acceso, que podemos definir como aquellas que proporcionan la conexión de un proveedor de servicio con los usuarios finales.

Dado que los operadores pueden desplegar redes troncales de alta capacidad con un coste relativamente reducido hasta el nodo que proporciona el acceso a los usuarios, el problema a resolver para proporcionar un acceso de alta velocidad a los usuarios se circunscribe al último salto o enlace (Figura 1.3), en el que el despliegue de nuevo cableado puede resultar excesivamente costoso y difícil de amortizar. Este es el problema denominado de «la última milla» y es el que pretenden resolver las diferentes tecnologías de acceso.

Se pueden agrupar las tecnologías existentes en cuatro tipos en función del tipo de medio físico sobre el que operan:

- *Par trenzado*: utilizan hilo de cobre. Su mayor limitación es el reducido ancho de banda que proporciona y la baja SNR. Entre las tecnologías en este grupo podemos mencionar las que usan el bucle de abonado de la red telefónica, como el uso de módems telefónicos, el acceso mediante RDSI (Red Digital de Servicios Integrados) y las tecnologías xDSL («Digital Subscriber Line»), que serán analizadas con más detalle en el Apartado 5.4.1. Una alternativa basada también en cables de cobre es BPL («Broadband over Power Lines»), que usa los cables de suministro eléctrico como soporte (PLC, «Power Line Communications»). Las aproximaciones basadas en módems y RDSI proporcionan velocidades insuficientes para las necesidades actuales, por lo que están en desuso. Por otra parte, la tecnología BPL no logra un despliegue comercial adecuado, quedando su uso prácticamente restringido a la red eléctrica privada del usuario.
- *Inalámbrico*: utilizan un canal radio. Podemos encontrar varias alternativas, como el acceso satelital, la tecnología LMDS («Local Multipoint Distribution System»), la telefonía celular, con diversas generaciones como 2G, 3G y 4G, y WiMAX («World wide Interoperability for Microwave Access»). Estas últimas serán descritas en el Apartado 5.4.3. No analizaremos LMDS por ser WiMAX, en cierto modo, una evolución de la primera y estar sustituyéndola paulatinamente.

- *Coaxial y fibra*: combina cable coaxial y fibra óptica, siendo la más conocida la tecnología HFC, sucesora de las redes CATV, más popularmente conocidas como cable-módem en su aplicación como red de acceso y que únicamente utilizaba cables coaxiales. Analizaremos el sistema HFC, que es una aproximación del tipo FTTC («Fiber To The Cabinet»), en el Apartado 5.4.2.
- *Todo fibra*: utiliza únicamente fibra óptica. Es la aproximación conocida como FTTH («Fiber To The Home»). En este grupo podemos encontrar el acceso mediante SONET o SDH, junto con las redes ópticas pasivas (PON, «Passive Optical Networks»). Estas tecnologías no han tenido apenas penetración para los usuarios residenciales, a pesar de las grandes expectativas que despertaban hace poco tiempo las redes PON, por lo que no describiremos ninguna de ellas en el contexto de redes de acceso.

En la Figura 5.18 se muestra un diagrama simplificado de la estructura típica de la red utilizada por un operador para proporcionar acceso a los abonados. El elemento más relevante es el punto de presencia del proveedor (PoP, Point of Presence), que es el elemento al que se debe conectar el abonado mediante alguna de las tecnologías al efecto. Los PoP se encuentran conectados mediante enlaces de alta velocidad a la red interna del proveedor, que constituye la red de distribución. A su vez, la red de distribución se conecta al núcleo de la red del operador, a través de la que, en su caso, se accederá a Internet.

Las tecnologías de acceso deben encapsular y transportar los datos de nivel de red sobre el enlace entre el abonado y el PoP, lo que implica en la mayoría de los casos que deben ser capaces de transportar paquetes IP.

5.4.1. Tecnologías ADSL

Las tecnologías xDSL fueron diseñadas para operar con datos sobre líneas telefónicas convencionales y así no tener que desplegar nuevo cableado. Entre las diferentes alternativas que se desarrollaron, la *línea de abonado digital asimétrica* (ADSL, «Asymmetric Digital Subscriber Line») es claramente la más utilizada, teniendo una gran cuota de mercado en la actualidad. La denominación de asimétrica se debe a que, por diseño, la velocidad ascendente (*uplink*, desde el abonado hacia la red) es inferior a la descendente (*downlink*, desde la red hacia el abonado). La motivación de esta división desigual reside en que la práctica totalidad de las aplicaciones se caracterizan por un elevado flujo hacia el usuario, es decir, este es un sumidero de información.

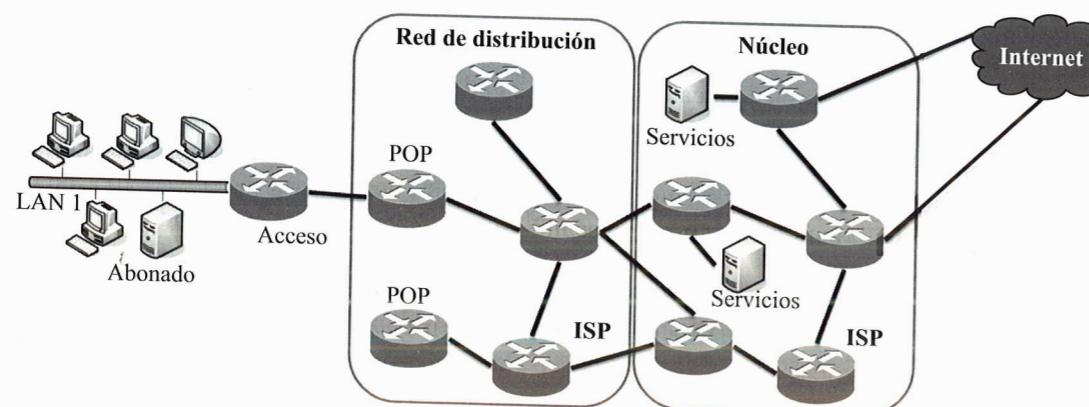


Figura 5.18. Estructura de las redes de acceso.

El mayor problema para el desarrollo de comunicaciones a alta velocidad sobre el cable telefónico reside en su reducido ancho de banda. Sin embargo, aunque el cable telefónico tiene un ancho de banda de unos 4 kHz, es posible transmitir señales digitales a mayores frecuencias, siempre que la atenuación y el ruido permitan una detección adecuada. Esto es, si la distancia no es excesiva, se podrán utilizar frecuencias mayores para transportar la información. Por otra parte, el ruido en la línea no se distribuye homogéneamente en todo el rango de frecuencias, pudiendo aparecer interferencias en bandas concretas que dificulten o impidan la comunicación. Para afrontar estos problemas se desarrolló la técnica conocida como multitone discreto, DMT («Discrete MultiTone»), en la que se combina cancelación de eco, FDM y técnicas avanzadas de codificación de línea.

La técnica DMT, muy similar a OFDM, se basa en la división del espectro en canales disjuntos de ancho de banda reducido (Figura 5.19). En cada uno de los canales se transmite, mediante la utilización de una portadora a la frecuencia adecuada, una señal digital codificada a una velocidad de transmisión dependiente de la SNR medida en el canal.

Para posibilitar el uso simultáneo con el servicio telefónico (POTS, «Plain Old Telephone Service») se establece una división adicional del espectro en tres bandas separadas (Figura 5.20(a)). La primera de ellas se utiliza para POTS y llega hasta los 25 kHz para permitir el servicio de fax, que opera a 19.200 bps. Una segunda banda, inicialmente en el rango 25-130 kHz, se asigna para el canal ascendente, mientras que la banda desde 138 kHz hasta 1,1 MHz se asigna para el canal descendente. Dentro de las dos bandas asignadas a datos se aplica la técnica DMT, utilizando canales de 4 kHz de

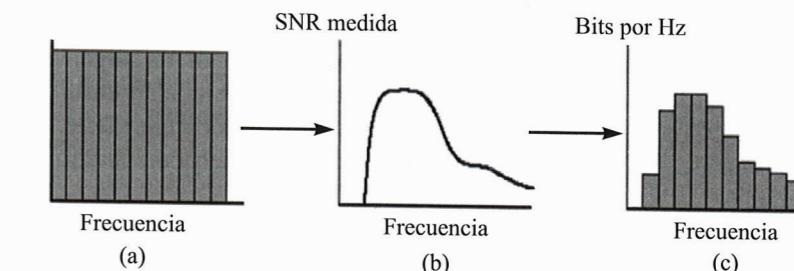


Figura 5.19. División del espectro en canales (a), medición de la calidad de la línea (b) y asignación de velocidades de transmisión (c) en DMT.

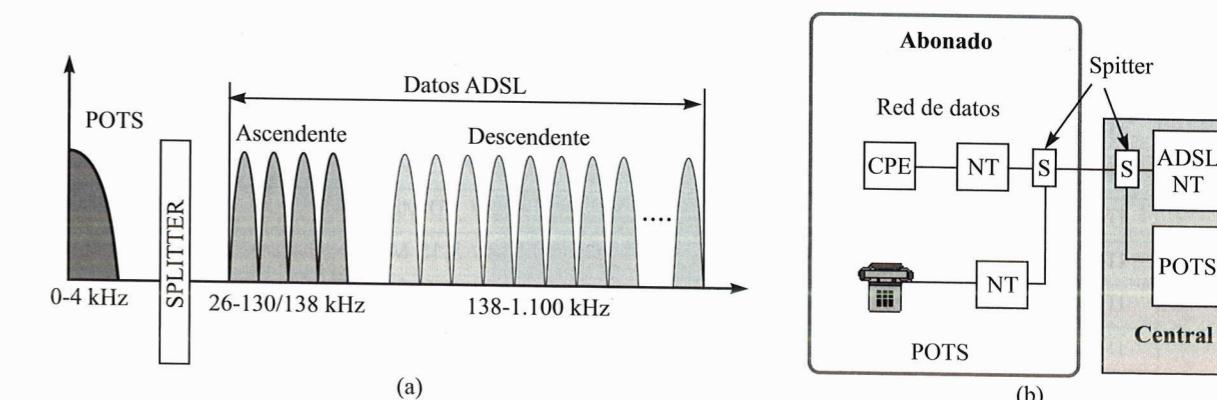


Figura 5.20. Separación de canales POTS, ascendente y descendente en ADSL (a) y separación de redes resultante (b).

ancho de banda. Se establecen así 268 subcanales (24 de los cuales corresponden al enlace ascendente) de 4 kHz, de modo que, tras la evaluación de la relación señal-ruido en base a un test inicial realizado entre el módem emisor y el módem receptor, se asigna un esquema QAM con un número de bits distinto para cada subcanal. El tamaño de la constelación QAM será mayor cuanto mejor sea la calidad detectada para el mismo, esto es, cuanto mayor sea la SNR.

Esta división permite proporcionar al usuario final ambos servicios (telefonía y red de datos doméstica) de forma independiente sin más que utilizar en una combinación de filtro paso alta y paso baja denominado «*splitter POTS*» (Figura 5.20(b)). Sin embargo, la instalación del *splitter* requiere un proceso de ajuste en función de la línea, lo que ha provocado que, si bien ADSL permite velocidades muy elevadas (hasta 8,448 Mbps, según la longitud de los cables, para el canal descendente y 640 kbps para el ascendente), los proveedores de servicio suelen recurrir a la implementación de una variante menos costosa (Tabla 5.5). Es la conocida como G.Lite o DSL-Lite, con la cual se reducen las velocidades máximas de transmisión a 1,544 Mbps para el enlace descendente y a 512 kbps para el ascendente y se sustituye el uso del *splitter* por los denominados microfiltros (filtros paso bajo) en cada una de las conexiones telefónicas.

La versión de ADSL comentada hasta ahora prescinde de la cancelación de eco. En el caso de utilizar DMT con cancelación de eco es posible utilizar todo el espectro asignado al servicio de datos en ambos sentidos, no siendo necesario separar los canales ascendentes y descendentes, aunque al coste de una mayor complejidad en los módems a utilizar.

La evolución de ADSL ha dado lugar a variantes (Tabla 5.5) que utilizan más ancho de banda y/o esquemas de codificación más eficientes para conseguir mayores velocidades, normalmente reduciendo la distancia máxima a la que se puede proporcionar el servicio. Así surgen las versiones ADSL2, ADSL2+ y sucesivas. La tecnología que proporciona mayor velocidad en la actualidad es VDSL («Very high bit-rate DSL»), que llega a los 52 Mbps en el enlace descendente y 16 Mbps en el ascendente (o 26 Mbps en ascendente y descendente en la versión simétrica), para lo que usa 4 bandas de frecuencia diferentes.

Tabla 5.5. Versiones de ADSL.

Nombre	Nombre común	Velocidad uplink/downlink	Año
ANSI T1.413-1998 Issue 2	ADSL	8 / 1 Mbps	1998
ITU G.992.1	ADSL (G.DMT)	12 / 1,3 Mbps	1999-2007
ITU G.992.1 Anexo A	ADSL sobre POTS	12 / 1,3 Mbps	2001
ITU G.992.1 Anexo B	ADSL sobre RDSI	12 / 1,8 Mbps	2005
ITU G.992.2	ADSL Lite (G.Lite)	1,5 / 0,5 Mbps	1999-2007
ITU G.992.3	ADSL2	12 / 1,0 Mbps	2002-2007
ITU G.992.3 Anexo J	ADSL2	13 / 3,15 Mbps	
ITU G.992.3 Anexo L	RE-ADSL2	5 / 0,8 Mbps	
ITU G.992.4	splitterless ADSL2	1,5 / 0,5 Mbps	2002-2007
ITU G.992.5	ADSL2+	24 / 1,0 Mbps	2003-2005
ITU G.992.5 Anexo M	ADSL2+M	24/ 3,5 Mbps	2008
ITU G.993.1	VDSL	52/16 Mbps (26/26 Mbps)	2009

Para proporcionar el acceso a varios usuarios, el proveedor utiliza multiplexores de acceso de línea digital de abonado (DSLAM, «Digital Subscriber Line Access Multiplexer»), básicamente consistentes en un equipo con múltiples módems, cada uno de ellos dando servicio a un abonado. Los DSLAM, que son los POP de la red ADSL, tienen acceso a la red de transporte del proveedor, por lo general basada en ATM hasta hace bien poco, aunque en la actualidad MPLS y Gigabit Ethernet son las tecnologías dominantes.

La arquitectura de protocolos de ADSL se muestra en la Figura 5.21 para el caso en el que se utilice para proporcionar acceso a Internet a una red LAN 802.3. Como se puede observar, los paquetes IP se encapsulan sobre PPP («Point-to-Point Protocol»), protocolo de nivel de enlace que, como LLC, está derivado de HDLC. Para el envío de las tramas PPP se pueden usar dos variantes en función de la red subyacente: Ethernet o ATM. En el primer caso se utiliza el protocolo PPPoE («PPP over Ethernet») para encapsular el paquete PPP en tramas Ethernet. En el segundo caso se utiliza PPPoA («PPP over ATM») y AAL5 («ATM Adaptation Layer 5») para su encapsulado en celdas ATM.

5.4.2. Redes de cable

Una aproximación alternativa al uso del cable telefónico sin necesidad de desplegar nuevo cableado se basa en la utilización de las redes de televisión por cable (CATV, «Cable TV»), de tradicional alta implantación en EE.UU. Son las denominadas redes de cable.

Los primeros estándares de este tipo de redes empleaban únicamente la red coaxial en árbol (Figura 5.22(a)), en base a la utilización de uno o varios de los canales asignados a la transmisión de televisión para el envío y recepción de datos. Así, en la cabecera o punto raíz se combinan los canales de datos y los programas de vídeo, pago por visión («pay-per-view»), audio, etc., que recibirán los distintos usuarios. La señal combinada se transmite como canal descendente (*downlink*) sobre la red de distribución. Por su parte, los datos procedentes de los distintos usuarios en el canal ascendente (*uplink*) son filtrados y procesados adecuadamente a través del sistema terminador de cable-módem o CMTS («Cable-Modem Termination System»). Este dispositivo (generalmente situado físicamente en la cabecera) hace las veces de interfaz o conmutador entre el sistema CATV e Internet.

Estas redes han evolucionado con la introducción de una red de distribución de fibra óptica, denominándose por tanto HFC. La red resultante (Figura 5.22(b)) incluye un anillo primario de fibra óptica en el que se sitúa la cabecera. Este anillo distribuye la señal hacia anillos secundarios, también de fibra óptica, en los que se despliegan los nodos ópticos terminales (NOT), que realizan la conversión optoelectrónica de las señales y constituyen el punto raíz de una red de distribución por cable con topología en árbol. Por tanto, HFC es una aproximación del tipo FTTC.

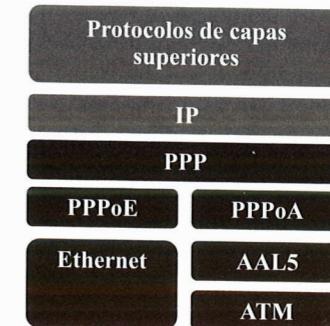


Figura 5.21. Arquitectura de protocolos en ADSL.

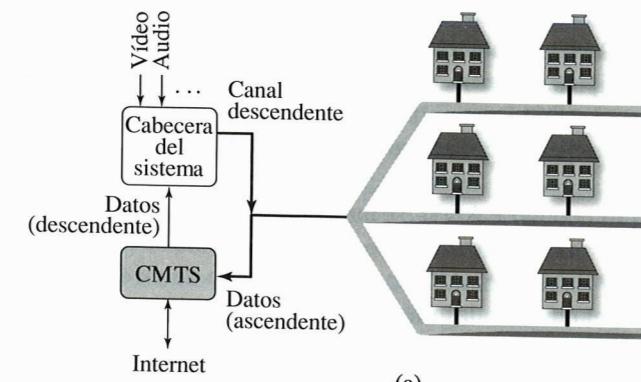


Figura 5.22. Estructura de las redes CATV (a) y HFC (b).

El acceso de los usuarios se realiza utilizando un divisor (Figura 5.23(a)) que separa los canales de televisión, de datos y, en algunos casos, de voz, puesto que es posible proporcionar también servicio de telefonía. En la red de TV, el denominado *Set-Top-Box* (STB) posibilita un servicio de televisión interactivo. En la red de datos se usa un módem de cable o cable-módem para modular y demodular las señales de datos sobre la infraestructura de red por cable, proporcionando servicios de las capas física y de enlace. Es habitual que tanto el divisor como el STB y el módem de cable sean un único dispositivo físico que, por extensión, se denomina STB.

El cable-módem multiplexa el servicio de datos con el de TV usando algunos de los canales asignados a la distribución de TV para el envío y recepción de los datos. Se utilizan, por tanto, varios canales de 6-8 MHz de ancho de banda (6 MHz en EEUU y 8 MHz en Europa) para proporcionar los enlaces *uplink* y *downlink*. Los rangos de frecuencia asignados dependen, como es lógico, del estándar considerado, siendo diferentes en Europa y EE.UU.

Los elementos de un cable módem son (Figura 5.23(b)):

- Sintonizador de radiofrecuencia, el cual, conectado al cable, permite la selección del rango de frecuencias asignados al enlace descendente.
- Demodulador, que demodula la señal recibida y realiza funciones de conversión analógico a digital, decodificación, corrección de errores y sincronización. Proporciona a su salida un flujo continuo de bits.
- Modulador, el cual lleva a cabo, entre otras, funciones de conversión de frecuencia, modulación y conversión digital a analógico para enviar los bits a su entrada sobre el canal.

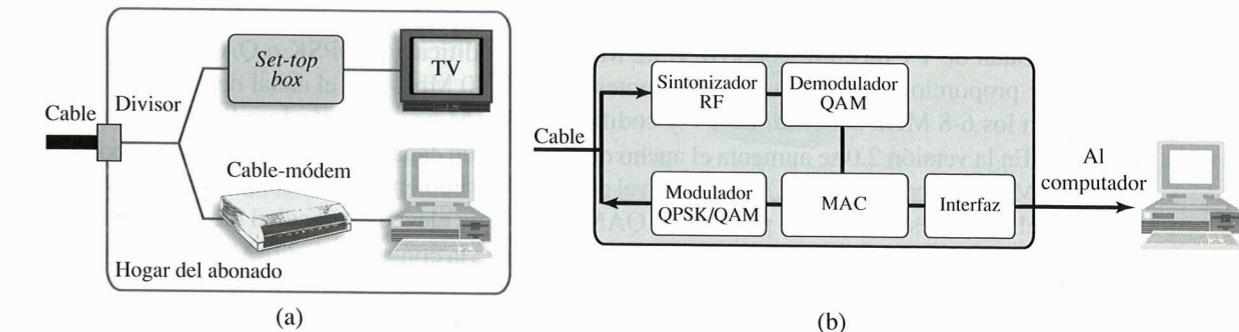


Figura 5.23. Equipos de abonado en HFC (a) y componentes de un dispositivo cable-módem (b).

- Subsistema MAC, que realiza funciones de acceso al medio. Para ello se llevan a cabo funciones de compensación de pérdidas en el cable, detección de colisiones, reserva de ancho de banda, etc. Los detalles concretos de este módulo dependen del estándar específico considerado, aunque la mayoría utilizan el formato de trama Ethernet (especificado en IEEE 802.1D).
- Interfaz, elemento que, como es conocido, permite la interconexión del cable-módem con el equipo computador.

Varios han sido los estándares cable-módem aparecidos en el mercado, pudiendo destacarse los tres siguientes: (a) DOCSIS («Data Over Cable Service Interface Specification»), utilizado principalmente en EEUU, del que se ha desarrollado una versión europea denominada EuroDOCSIS (b) DAVIC/DVB o DVB-RCC, promovido en Europa, y (c) IEEE 802.14. De los tres, el de mayor penetración es DOCSIS, del que se han publicado las versiones 1.0, 1.1, 2.0, 3.0 y 3.1.

La arquitectura de protocolos de DOCSIS se muestra en la Figura 5.24. Las capas definidas son:

- *Capa física*: usa bandas diferentes para los canales ascendentes y descendentes, así como anchos de banda y esquemas de codificación diferentes que también dependen de la versión del estándar.

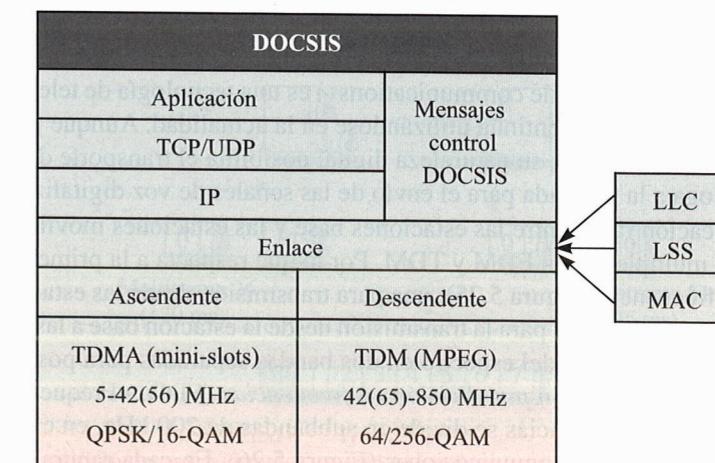


Figura 5.24. Capas en DOCSIS 2.0.

Así, en DOCSIS 1.0 y 1.1 se utilizan canales de subida con un ancho de banda inferior al del canal de TV de entre 200 kHz y 3,2 MHz, con codificación QPSK o QAM16, lo que permite proporcionar velocidades ascendentes de hasta 10 Mbps. En el canal descendente se utilizan los 6-8 MHz del canal de TV y codificación QAM-64, alcanzándose los 40 Mbps.

En la versión 2.0 se aumenta el ancho de banda de un canal ascendente hasta un máximo de 6,4 MHz con codificación QAM64, con el consiguiente aumento de la velocidad hasta 30 Mbps. En el canal descendente se puede usar QAM256, lo que eleva la velocidad hasta los 57 Mbps.

En las versiones 3.0 y 3.1 se aumenta el tamaño de la constelación QAM hasta 128 y 4.096 estados de señalización, respectivamente, utilizándose TCM.

- **Capa de enlace:** permite encapsular paquetes IP, incluso IPv6 a partir de la versión 3.0. Se divide en tres subcapas:

- LLC: en la que, obviamente, se implementa el protocolo LLC.
- LSS («Link Security Sublayer»): proporciona servicios de seguridad. Estos servicios son necesarios para preservar la privacidad de los datos, ya que todos los usuarios de la red de acceso comparten el canal.
- MAC: gestiona el acceso al medio utilizando acceso planificado. El formato de trama es Ethernet. En el canal descendente se usa TDMA, mientras que en el ascendente se usan tanto TDMA como S-CDMA («Synchronous CDMA»).

5.4.3. Redes celulares

Una alternativa al despliegue de cables para el acceso a Internet es la utilización de redes celulares. Una red celular, como ya se ha indicado en el Apartado 5.3.3, es una red inalámbrica distribuida organizada en unidades denominadas celdas o células, cada una gestionada por una estación base (BE). La BE proporciona cobertura a las *estaciones móviles* (ME) en la región geográfica dentro de su alcance radio, lo que posibilita la comunicación entre los usuarios independientemente de su localización en cada momento, estén estos en la misma o en diferentes células. La comunicación entre los BE se realiza mediante una red de distribución, que suele ser cableada.

A continuación consideraremos tres tipos de redes celulares que pueden ser utilizadas para proporcionar acceso a los usuarios finales o a redes. Estas se refieren a las tecnologías GSM, UMTS y WiMAX.

GSM

GSM («Global System for Mobile communications») es una tecnología de telefonía móvil o celular de segunda generación (2G) que continúa utilizándose en la actualidad. Aunque primariamente diseñada para las comunicaciones de voz, su naturaleza digital posibilita el transporte de datos hacia y desde la BE de forma análoga a la utilizada para el envío de las señales de voz digitalizada.

En la comunicación radio entre las estaciones base y las estaciones móviles se hace uso conjunto de las técnicas de multiplexación FDM y TDM. Por lo que respecta a la primera, el espectro se divide en dos bandas de frecuencia (Figura 5.25): una para transmisión desde las estaciones móviles a la base (canal ascendente, *uplink*) y otra para la transmisión desde la estación base a las móviles (canal descendente, *downlink*). Esta división del espectro en dos bandas separadas para posibilitar comunicaciones dúplex se denomina *duplexación por división en frecuencias* (FDD, «Frequency Division Duplex»). A su vez, cada rango de frecuencias se divide en subbandas de 200 kHz, en cada una de las cuales se multiplexan mediante TDM 8 comunicaciones (Figura 5.26). En cada ranura, de duración 0,577 ms, se transmiten 156 bits, aunque no todos se utilizan para transportar datos de usuario. Adicionalmente al empleo de los esquemas TDM y FDM, GSM utiliza la técnica de espectro expandido por salto de

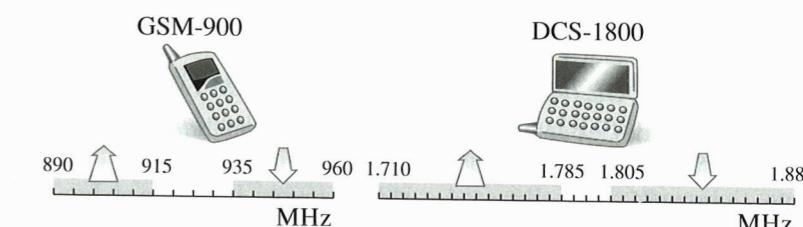


Figura 5.25. Utilización del espectro en telefonía GSM en las variantes GSM-900 y DCS-1800. Existen otras variantes con diferentes asignaciones de bandas de frecuencia.

frecuencias (FH) estudiada en el Apartado 3.2.3 a fin de hacer más difícil el seguimiento de una comunicación por parte de terceros.

Se posibilita, así, un servicio de transporte de datos basado en conmutación de circuitos, que utiliza el mismo procedimiento de envío que las comunicaciones de voz, y para el que se definen dos protocolos: CSD («Circuit Switched Data») y HSCSD («High-Speed Circuit Switched Data»). El primero permite el envío y recepción de datos a 9,6 kbps, mientras que el segundo llega hasta los 57,6 kbps (43,2 kbps en canal descendente y 14,4 en ascendente) a partir de la supresión o reducción de tamaño de los campos de corrección de errores empleados en GSM y la asignación de múltiples ranuras (hasta 3) en el canal descendente.

Para aumentar la velocidad de transmisión de datos sobre GSM se desarrolló el servicio GPRS («General Packet Radio Service»), basado en conmutación de paquetes (ver Apartado 6.2.2). Se denombra también 2,5G, por ser una tecnología intermedia entre 2G y 3G. Utiliza los canales TDM que no estén siendo usados por el servicio de voz y proporciona un servicio de mejor esfuerzo (concepto explicado para el caso de IP en los Capítulos 8 y 9) en el que la velocidad depende del número de usuarios que estén accediendo al canal concurrentemente. El acceso al enlace ascendente se realiza a

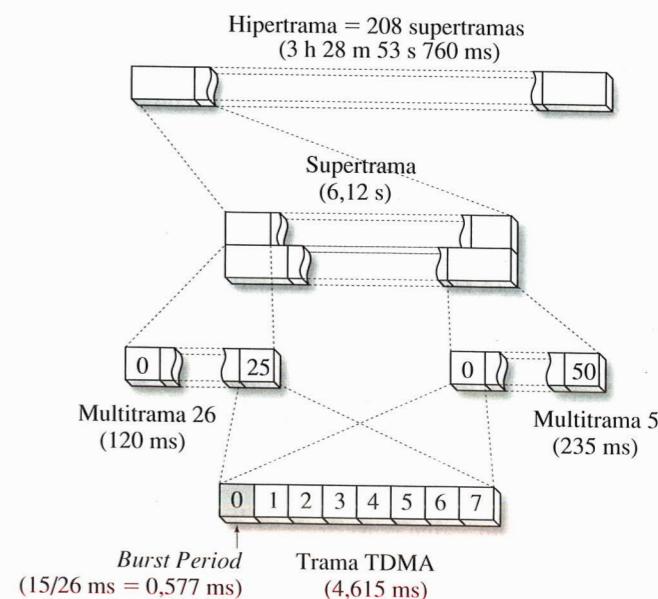


Figura 5.26. Acceso TDMA en GSM.

partir de reservas durante un periodo de contienda en el que se hace uso de ALOHA ranurado. Se pueden alcanzar los 100 kbps (60 + 40).

Una versión mejorada, EDGE («Enhanced Data rates for GSM Evolution»), utiliza un esquema de codificación más eficiente (8PSK) que triplica la capacidad, alcanzándose los 240 y 60 kbps en los enlaces descendente y ascendente, respectivamente.

UMTS

UMTS («Universal Mobile Telecommunications System») es un sistema de tercera generación (3G) de telefonía móvil que proporciona una mayor velocidad de acceso a Internet que su predecesor. Su principal característica es el uso del esquema de acceso de espectro expandido CDMA en combinación con las técnicas FDD o TDD. De forma análoga a FDD, en la técnica *duplexación temporal* (TDD, «Time Division Duplex») se ranura el tiempo mediante TDM, de modo que se utilizan parte de las ranuras temporales para la transmisión en un sentido y el resto para la transmisión en el otro. Así pues, en el sistema UMTS FDD, también conocido como *CDMA de banda ancha*, WCDMA («Wideband CDMA»), las estaciones acceden al canal en base a un código expansor y un par de frecuencias portadoras, una para transmitir y otra para recibir. Por su parte, el acceso múltiple en el sistema UMTS TDD se consigue mediante la asignación de: (a) un código expansor distinto para cada estación y (b) dos ranuras temporales, una para transmitir y otra para recibir.

En la Figura 5.27 se muestra la división espectral para las componentes FDD y TDD en UMTS, considerándose en la primera un ancho de banda de 60 MHz, tanto para el canal ascendente como para el descendente. En TDD se emplean dos bandas de 15 y 20 MHz que son utilizadas en ambos sentidos. Ambos sistemas consideran un ancho de banda de canal de 5 MHz (frente a los 200 kHz de GSM).

En UMTS se definen diferentes servicios de transferencia de datos en función de la movilidad de los usuarios: 144 kbps para vehículos a gran velocidad, 384 kbps en espacios abiertos periurbanos y 72 Mbps con baja movilidad.

A partir de la especificación original se desarrolló HSDPA («High-Speed Download Packet Access»), con velocidades teóricas hasta 10 Mbps, estando actualmente en fase de despliegue LTE («Long-Term Evolution»), considerada ya de cuarta generación (4G). El organismo responsable de las diferentes generaciones de especificaciones de redes celulares es el 3GPP («3rd Generation Partnership Project», <http://www.3gpp.org>), que es una colaboración de asociaciones de telecomunicaciones.

La arquitectura y elementos de la red de acceso en UMTS se describen en el Apartado 1.5.

WiMAX

WiMAX es una tecnología de red celular diseñada para proporcionar acceso a grandes distancias, considerándose en el estándar hasta 48 km. Se encuentra definido en los estándares IEEE802.16 e HyperMAN y puede considerarse, en cierta forma, una evolución de LMDS que incorpora soporte para movilidad. Su operación se basa en el uso de estaciones base con enlaces punto-multipunto, existiendo dos versiones en función de la movilidad de las estaciones finales:

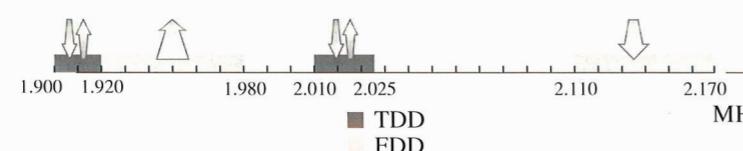


Figura 5.27. Espectro en los sistemas UMTS TDD y FDD.

- WiMAX fijo (802.16-2004), que opera en la banda de 2-11 GHz (3,5 GHz en Europa) a velocidades de hasta 75 Mbps con un alcance de 10 km.
- WiMAX móvil (802.16e), en la banda 2-6 GHz con velocidades de 30 Mbps y 3,5 km de alcance.

Define una estructura de red en dos niveles: la red de servicios de conectividad (CSN, «Connectivity Services Network»), que incluye al núcleo de la red y la infraestructura para la provisión de servicios; y la red de acceso al servicio (ASN, «Access Services Network»), que incluye el acceso radio a las estaciones y la red de distribución entre estaciones base que se conecta, a su vez, a la CSN.

La arquitectura de protocolos en la subred ASN es la mostrada en la Figura 5.28. Las capas consideradas son:

- *Capa física*: utiliza OFDM, permitiendo una alta flexibilidad en las tecnologías subyacentes, pudiéndose también usar QAM, QPSK, TDD y FDD. Opera en diversas bandas según la versión y el país. Para la versión fija se utilizan canales en la banda de 2 a 11 GHz. En España, la versión móvil opera en las bandas de 2,4 y 5 GHz, que no requieren licencia; y 3,5 GHz para la que sí se requiere licencia.
- *Capa MAC*: establece tres subcapas:
 - *Subcapa de convergencia*: proporciona funciones de adaptación a la capa de red, que puede ser IP o ATM.
 - *Subcapa común*: realiza el control de acceso al medio, para lo que se utiliza CSMA/CA en el primer acceso de una estación. En este la estación base asigna una ranura de acceso a una única estación. La duración de la ranura puede ser modificada, posibilitando la provisión de una calidad de servicio garantizada (ver Capítulo 7).
 - *Subcapa de privacidad*: incluye las funciones necesarias para la autenticación, el cifrado y la gestión de claves.

A modo de resumen del apartado de tecnologías de acceso, en la Tabla 5.6 se realiza una comparativa de las técnicas analizadas en términos de velocidades teóricas y tecnologías físicas utilizadas. En esta tabla se consideran las versiones de mayor difusión en la actualidad.

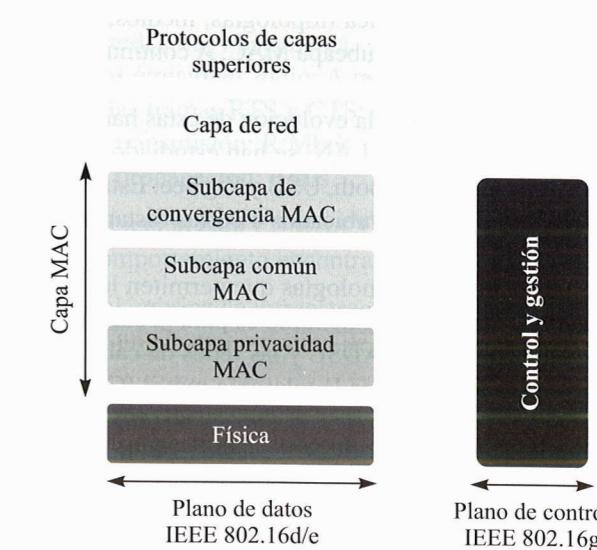


Figura 5.28. Arquitectura de protocolos en la red de acceso (ASN) de WiMAX.

Tabla 5.6. Comparativa de tecnologías de acceso.

Nombre	Tipo/Familia	Capa física	Downlink (Mbps)	Uplink (Mbps)
WiFi (n)	Inalámbrica/802.11n	OFDM/MIMO	300	
LTE	Inalámbrica/3GPP	OFDMA/MIMO/SC-FDMA	100	50
WiMAX	Inalámbrica/802.16	MIMO-SOFDMA	83	46
DOCSIS 2.0	Cableada/HFC	TDM/SCDMA/QAM	57,2	30,7
VDSL	Cableada/xDSL	DMT	52	16
ADSL+	Cableada/xDSL	DMT	24	
WiFi (g)	Inalámbrica/802.11g	OFDM		54
UMTS-TDD	Inalámbrica/3GSM	CDMA/TDD	16	
WCDMA	Inalámbrica/3GSM	CDMA/FDD	0,384	0,384
HSDPA		CDMA/FDD/MIMO	14,1	5,76
EDGE	Inalámbrica/GSM	TDMA/FDD/8PSK	0,240	0,060
GPRS	Inalámbrica/GSM	TDM/FDM	0,060	0,040
HSCDS	Inalámbrica/GSM	TDD/FDM	0,043	0,014
CSD	Inalámbrica/GSM	TDD/FDM	0,0096	0,0096

RESUMEN

Tras el estudio de los esquemas de acceso al medio y las técnicas de control de flujo y de errores en los Capítulos 3 y 4, respectivamente, en este tema se han analizado las tecnologías de redes de área local y personal, así como las de acceso.

El estudio de las redes LAN se ha realizado a partir de la identificación de los elementos de la arquitectura IEEE 802, que incluyen la capa física (topologías, medios, tipos de transmisión, etc.), la subcapa LLC, analizada en el Capítulo 4, y la subcapa MAC. A continuación se han descrito los elementos y protocolos utilizados en las redes LAN más comunes en la actualidad: Ethernet y WiFi, considerando tanto sus especificaciones como la evolución de estas hacia redes de mayores velocidades.

Para complementar el uso de las redes LAN, se han estudiado tres tecnologías de redes PAN que también son ampliamente utilizadas: Bluetooth, USB y ZigBee. Estas tecnologías permiten la conexión de dispositivos, habitualmente periféricos, ubicados a cortas distancias de un equipo *host* al que proporcionan algún tipo de servicio.

El tema concluye con el estudio de tecnologías que permiten la conexión de las redes locales con redes WAN en general, aunque su uso más extendido es para la conexión a Internet. Entre estas hemos considerado tecnologías cableadas, como ADSL y las redes de cable, y tecnologías inalámbricas que utilizan estructura celular como es el caso de la telefonía móvil (GSM y UMTS) y WiMAX.

EJERCICIOS

1. El edificio de una compañía tiene 7 plantas y 10 despachos por planta. En cada despacho hay un punto de conexión a la red en la pared exterior (todas las oficinas están en línea) de forma que hay una separación entre toma y toma de 5 metros, tanto horizontal como verticalmente. Suponiendo

que es posible conectar mediante cables en línea recta cada par de tomas (horizontal, vertical y diagonalmente), calcule cuántos metros de cable son necesarios para las siguientes redes:

- a) Una configuración en estrella con un *router* en el centro.
 - b) Una red 802.3.
2. Las tramas Ethernet deben ser de, al menos, 64 bytes para asegurar que la estación transmisora detecta las colisiones en el extremo opuesto del cable. Ethernet de alta velocidad tiene el mismo límite de 64 bytes como mínimo para el tamaño de trama, pero puede emitir los bits 10 veces más rápido. ¿Cómo es posible mantener el tamaño mínimo de trama?
 3. ¿Cuál es el tamaño mínimo de la trama en una red CSMA/CD funcionando a 1 Gbps sobre un cable de 1 km sin repetidores?
 4. Suponga que una LAN Ethernet da servicio a un grupo de 10 estaciones. ¿Cuánto ancho de banda hay disponible para cada estación si las 10 estaciones están conectadas a:
 - a) un concentrador Ethernet a 10 Mbps,
 - b) un concentrador Ethernet a 100 Mbps,
 - c) un comutador Ethernet a 10 Gbps?
 5. Considerando una red Ethernet Gigabit en la que se ha limitado la longitud máxima extremo a extremo a 500 m y en la que se usa codificación 8B10B,
 - a) ¿Cuál es la duración de los intervalos de contención?
 - b) Si cada trama tiene 32 bits de sobrecarga, ¿cuántos bits de relleno habría que incluir si se desean enviar 256 bits?
 - c) Si la MTU es de 1.500 bytes, ¿cuál será el número mínimo de tramas en una ráfaga de tramas?
 6. Considere una red WLAN en la que se implementa el esquema MAC CSMA/CA.
 - a) Realice una estimación teórica de la eficiencia conseguida en el acceso DCF de las distintas estaciones en el medio. Para ello, adopte las siguientes suposiciones (añada y justifique otras posibles que estime oportunas):
 - Estado de la red: (muy) baja carga.
 - Alcance de las emisiones radio: A metros.
 - Longitud de las tramas RTS y CTS: L bits.
 - Velocidad de transmisión: R Mbps.
 - Velocidad de propagación: c m/s.
 - b) ¿Cuál sería la eficiencia para CSMA/CD estándar? Justifique a nivel teórico-conceptual las diferencias de comportamiento encontradas.
 7. Considere una red inalámbrica de infraestructura que utiliza CSMA/CA, una velocidad de transmisión de 11 Mbps y un alcance máximo de la emisión de 200 m.
 - a) ¿Cuál es el tiempo máximo necesario para enviar una trama de 10.000 bits directamente a otra estación, medido desde que se dispone de los datos listos para su transmisión? Suponga una velocidad de propagación de 200 m/ μ s.
 - b) Estime la eficiencia de CSMA/CA en el caso hipotético de que no se produjeran colisiones.
 - c) ¿Por qué no se usa una técnica MAC de contención estándar, como CSMA/CD o ALOHA?
 8. A partir de los datos suministrados en el Apartado 5.3.2, evalúe el número máximo de bits de datos que se pueden enviar en una trama UBS 2.0. ¿Cuál es el periodo de bit?

9. La banda ISM 2,4 GHz es, como ya se ha indicado, no licenciada, por lo que múltiples sistemas la utilizan. Obtenga un listado de las tecnologías/sistemas de comunicaciones que operan en dicha banda.
10. Considere un acceso ADSL en el que se utiliza el rango 25-200 kHz para el canal ascendente y el rango 250 a 1.000 kHz para el descendente. Durante el proceso de inicialización de la línea se ha medido una SNR de 30 dB en el rango 25-650 kHz y de 20 dB en el rango 650-1.000 kHz. Se utilizan subcanales con un ancho de banda de 4 kHz por canal, según el estándar. Calcule:
 - a) La capacidad máxima de cada uno de los subcanales ascendentes y las de cada uno de los subcanales descendentes.
 - b) De acuerdo con el estándar, se utiliza QAM en cada uno de los subcanales. ¿Cuál es el tamaño de las constelaciones en cada subcanal?
 - c) ¿Cuáles son las capacidades globales del sistema?
11. El estándar DOCSIS 2.0 permite la utilización de anchos de banda de subida de 0,2, 0,4, 0,8, 1,6, 3,2 y 6,4 MHz con codificación QPSK, QAM16 o QAM64. Obtenga una tabla con las velocidades de transmisión del canal ascendente que pueden obtenerse.
12. Realice una comparativa de precios de las tecnologías de acceso disponibles en su vecindario. Para ello, evalúe el coste por Mbps de cada una.

BIBLIOGRAFÍA

- Carbou, R., Díaz, M., Expósito, E., Román, R.: *Digital Home Networking*, John Wiley & Sons, 2011.
 Excentis: *Cable Network handbook*, 2009. Available at <http://docbox.etsi.org/>.
- Feit, S.: *Local Area High Speed Networks*. MacMillan, 2000.
- Gast, M.S.: *802.11 Wireless Networks*, O'Reilly, 2002.
- IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee. <http://www.ieee802.org>
- León-García, A.; Widjaja, I.: *Redes de Comunicación. Conceptos Fundamentales y Arquitecturas Básicas*. McGraw-Hill, 2001.
- Shay, W.: *Understanding Data Communications and Networks*, Thomson, 2004, 3.^a edición.
- Stallings, W.: *Comunicaciones y Redes de Computadores*. Prentice-Hall, 2004. 7.^a edición.
- Tanenbaum, A. D.: *Computer Networks*. Prentice-Hall, 2011. 5.^a edición.
- USB IF: *Universal Serial Bus Specification. Revisión 2.0*. 2000. <http://www.usb.org>
- WiMAX Forum: *Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation*, 2006.
- WiMAX Forum: *WiMAX End-to-End Network Systems Architecture – Stage 2: Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points*, 2006.
- ZigBee Alliance: *ZigBee Specifications*, 2007. <http://www.zigbee.org>.



ENCAMINAMIENTO E INTERCONEXIÓN DE REDES

CAPÍTULO

6

- 6.1. Introducción
- 6.2. Conceptos y técnicas de comutación
- 6.3. Encaminamiento
- 6.4. Interconexión de redes

6.1. Introducción

Si bien las distintas tecnologías de redes LAN presentadas a lo largo del capítulo precedente resultan de gran interés por cuanto que constituyen el entorno de trabajo directo de los usuarios finales, no debemos perder de vista que la verdadera relevancia actual de cualquier sistema de red radica en su coexistencia e intercomunicación con otros. Según se establece en el modelo OSI, es la capa de red la encargada de permitir tal intercomunicación de equipos y sistemas, en lo que viene a denominarse *interconexión de redes*.

Antes de abordar esta cuestión central se discutirá otra necesaria para posibilitar en la práctica la primera: la de *encaminamiento*. La función de encaminamiento («routing» en inglés) se refiere a la obtención de un camino o ruta entre un *host* emisor y un *host* receptor sobre el que llevar a cabo la transferencia de la información entre ambos. A diferencia de como suele suceder en una red LAN, donde no existe más que un único medio común para la transmisión entre cualesquier dos estaciones finales, en una interconexión (sea esta de redes o de equipos en una misma WAN) debe buscarse una ruta de la forma *estación_final_1-nodo_1-nodo_2-nodo_3-...-estación_final_2* (Figura 1.4).

Adicionalmente a los dos aspectos referidos, los cuales se desarrollarán a lo largo de los apartados tercero y cuarto del capítulo, comenzará este estudiando el concepto de *comutación* y los distintos tipos de técnicas existentes al respecto. Esta cuestión es la base para comprender la forma en que se lleva a cabo el reenvío de información salto-a-salto en una red de computadores y las características más relevantes del mismo.