

Los contextos del nivel de enlace y la capa física

Miquel Font Rosselló
Eduard Lara Ochoa
René Serral i Gracià
Xavier Vilajosana Guillén

PID_00171193



Universitat Oberta
de Catalunya

www.uoc.edu

Índice

Introducción.....	5
1. El nivel de enlace a las comunicaciones locales entre ordenadores.....	7
1.1. Clasificación histórica de los protocolos de nivel de enlace	7
1.1.1. Sincronismo orientado a bit/carácter/bloque	7
1.1.2. Transmisión síncrona/asíncrona	7
1.2. RS-232	9
1.3. Protocolo BSC de IBM	11
2. El nivel de enlace en las redes de acceso a WAN.....	13
2.1. Tecnologías de acceso a WAN frente a redes de transporte WAN	14
2.2. Clasificación de los servicios de comunicaciones según el tipo de conexión	16
2.3. Protocolos de nivel de enlace asociados a tecnologías WAN	16
2.3.1. HDLC	17
2.3.2. PPP	22
2.4. Tecnologías de acceso a redes WAN	33
2.4.1. Red telefónica conmutada/básica (RTC/RTB)	33
2.4.2. Red digital de servicios integrados	34
2.4.3. ADSL y ADSL 2	36
2.4.4. HFC y cable módem	37
2.4.5. Líneas dedicadas alquiladas	39
3. El nivel de enlace en las redes de transporte WAN.....	41
3.1. X.25	41
3.2. Frame relay	44
3.2.1. Arquitectura Frame relay	45
3.2.2. Estándares asociados	46
3.2.3. Formato de trama	46
3.2.4. Cómo trabaja Frame relay	48
3.2.5. Control de congestión	48
3.2.6. QoS	50
3.3. ISDN de banda ancha y ATM	52
3.3.1. Orígenes de la RDSI de banda ancha	52
3.3.2. ATM	53
3.3.3. Formato de las celdas ATM	55
3.3.4. Conexiones virtuales ATM	57
3.3.5. Funcionamiento de ATM	58
3.3.6. Modelo de la torre ATM	59

3.3.7.	Niveles de la torre ATM	60
3.3.8.	Subcapa PMD	60
3.3.9.	Subcapa de convergencia de transmisión (TC)	61
3.3.10.	Capa ATM	62
3.3.11.	Capa AAL	62
3.3.12.	IP sobre ATM	63
3.3.13.	Trama AAL5	63
3.3.14.	Presente y futuro de ATM	64
3.4.	MPLS	65
4.	La capa física	67
4.1.	Bases teóricas para la comunicación de datos	67
4.1.1.	Análisis de Fourier	67
4.1.2.	Señales de ancho de banda limitado	68
4.1.3.	La máxima velocidad de transmisión de un canal	70
4.1.4.	Tipos de codificaciones digitales	72
4.1.5.	Tipos de modulaciones en canales paso banda	75
4.1.6.	Atenuación y distorsión de un canal. Ruido	78
4.2.	Medios de transmisión	81
4.2.1.	Par trenzado	81
4.2.2.	Cable coaxial de banda base	83
4.2.3.	Cable coaxial de banda ancha	84
4.2.4.	Fibra óptica	85
4.2.5.	Transmisión inalámbrica	89
	Resumen	93
	Bibliografía	95

Introducción

Después de haber analizado, a lo largo de los diferentes módulos de la asignatura, los niveles más importantes de la arquitectura OSI siguiendo un enfoque descendente, en inglés, *top-down* (transporte, red y enlace), en este quinto y último módulo trataremos los aspectos relacionados con el nivel más bajo de la torre OSI: el nivel físico.

Debido a la extensión del capítulo del nivel de enlace, en este módulo también se ha incluido una parte relacionada con los diferentes contextos en los que podemos encontrar implicado el nivel de enlace. En el módulo anterior sólo se había tratado el ámbito del nivel de enlace en las redes de área local.

Por lo tanto, la estructuración de este módulo se ha realizado de la siguiente manera:

a) En una primera parte veremos los tres contextos restantes en los que interviene el nivel de enlace:

1) Contexto local entre un ordenador y un periférico. Aquí repasaremos la clasificación clásica de los protocolos de enlace: orientados a bit frente a orientados a carácter, y síncronos frente a asíncronos. Estudiaremos dos protocolos muy representativos de este contexto: RS-232 y BSC.

2) Contexto de acceso a redes WAN. Aquí trataremos los dos protocolos de nivel de enlace más implementados en las tecnologías de acceso a redes de área extendida o WAN: PPP y HDLC. También veremos las principales tecnologías utilizadas para conectarnos a una WAN, como Internet: RTC, ADSL, RDSI, HFC, etc.

3) Contexto de redes de transporte WAN. Aquí estudiaremos las principales tecnologías utilizadas en la parte troncal de las redes WAN, como Frame relay, ATM y MPLS.

b) En una segunda parte de este módulo trataremos diferentes aspectos de la última capa del modelo OSI, la capa de nivel 1 o física.

Estudiaremos tanto los aspectos teóricos como los aspectos físicos de los medios de transmisión de la información. Por ello, estudiaremos las bases matemáticas teóricas de las series de Fourier para la interpretación en el dominio frecuencial de las diferentes señales que se transmiten por los medios de transmisión reales, como los cables de cobre, la fibra óptica o las radiaciones electromagnéticas por ondas de radio.

Dado un medio de transmisión concreto, estudiaremos los teoremas que nos permitirán calcular la velocidad de transmisión máxima sobre este medio, así como los mecanismos para adaptar las salidas digitales de un ordenador a las características del medio de transmisión concreto, mediante las llamadas modulaciones y codificaciones digitales.

También se expondrán los diferentes problemas que puede sufrir una transmisión de información sobre un canal físico de comunicaciones: la distorsión, la atenuación y el ruido.

El apartado termina con una descripción de las características y los inconvenientes de los medios de transmisión más utilizados en la actualidad, como los pares trenzados, los cables coaxiales, las fibras ópticas y las ondas de radiofrecuencia utilizadas en las redes inalámbricas (por ejemplo WiFi).

1. El nivel de enlace a las comunicaciones locales entre ordenadores

1.1. Clasificación histórica de los protocolos de nivel de enlace

Históricamente, los protocolos de nivel de enlace se han clasificado según dos criterios, diferentes pero ambos relacionados con el sincronismo:

- 1) Según el modo de sincronización: síncronos y asíncronos
- 2) Según la mínima unidad de información tratada: orientación a bit, carácter o mensaje.

1.1.1. Sincronismo orientado a bit/carácter/bloque

En transmisión digital, cualquiera que sea el modo de transmisión de datos, es necesario que tanto el emisor como el receptor estén sincronizados, es decir, que dispongan de una base de tiempo común a ambos, a fin de que el receptor sepa en qué instante debe comprobar la línea con el fin de recuperar correctamente la señal que recibe. Esta sincronización entre transmisor y receptor puede realizarse en al menos tres niveles:

- 1) Sincronismo orientado a bit: este sincronismo ayuda a determinar el instante en el que debe empezar a contarse un bit y cuál es su duración.
- 2) Sincronismo orientado a carácter: mediante este sincronismo el receptor conoce cuál es el primero de cada uno de los bits de cada carácter y, por lo tanto, qué n bits forman cada uno de los caracteres que va recibiendo.
- 3) Sincronismo de mensaje o de bloque: sirve para definir el conjunto de caracteres que constituirán la unidad base para el tratamiento de errores, entre otros servicios, y que forma parte del protocolo de comunicaciones.

1.1.2. Transmisión síncrona/asíncrona

1) **En la transmisión síncrona** todos los símbolos (dígitos binarios) se transmiten consecutivamente y tienen la misma duración. Los datos fluyen del emisor al receptor con una cadencia fija y constante, marcada por una base de tiempo común para todos los elementos que intervienen en la transmisión. Por la línea de transmisión no fluyen únicamente los datos, también lo hace la señal de reloj emitida generalmente por el ETCD emisor y generada a partir del propio tren de datos.

- En el sincronismo de bit, el equipo receptor se encarga de reconstruir la señal de reloj de origen a partir de la señal recibida en línea y la utiliza para obtener los datos y muestrearlos en el instante correcto. El sincronismo de bit es permanente una vez que se establece la comunicación.
- En el sincronismo de carácter, la sincronización se realiza mediante el envío de combinaciones especiales de bits (por ejemplo, caracteres SYN) irrepetibles por desplazamiento. Una vez recibidas estas combinaciones, el receptor deduce qué secuencia de n bits consecutivos forman cada uno de los caracteres que va recibiendo.

Podemos destacar los protocolos BSC¹ de IBM, DDCMP de Digital o ANSI X3.28.

⁽¹⁾BSC es la sigla de *binary synchronous communication*.

2) **En la transmisión asíncrona** se transmite cada carácter cuando lo suministra el emisor, independientemente del tiempo transcurrido entre caracteres. Cada carácter formado por n bits siempre va precedido de un bit de arranque, seguido de al menos uno de parada. El sistema requiere la existencia en el interior del emisor y del receptor de relojes que marquen una base de tiempo teóricamente igual:

- El sincronismo de bit se consigue arrancando el reloj del receptor en el flanco de cambio del bit *start*, y es muy fácil mantenerlo, dado el pequeño tamaño de un carácter. Además, emisor y receptor se deben poner de acuerdo en la velocidad de transmisión para determinar la duración de un bit.
- El sincronismo de carácter se determina gracias a que el receptor sabe que el siguiente bit al de *start* es el primero que compone la palabra. Asimismo, emisor y receptor deben acordar el número de bits de datos, de paridad y de parada para conocer el tamaño en bits del carácter.

El protocolo asíncrono orientado a carácter por antonomasia es el RS-232 (puerto serie).

En la siguiente tabla podemos ver las ventajas y las desventajas de la transmisión síncrona y asíncrona.

Transmisión asíncrona	Transmisión síncrona
<p>Sencilla. Adecuada para bajas velocidades (< 19.200 bits/seg.). Utiliza terminales más baratos. Baja eficiencia de la utilización de la línea.</p>	<p>Mejor utilización de la línea. Permite velocidades de transmisión muy superiores. Necesita terminales más complejos. Las pequeñas derivas que puedan existir entre los relojes emisores y receptores son más críticas.</p>

En función de estos dos criterios de sincronización podemos clasificar una buena parte de los protocolos de enlace actuales, que trataremos más adelante:

	Síncrono	Asíncrono
Protocolo orientado a bit	HDLC, PPP, ATM, Ethernet, Frame relay	PPP, ATM
Protocolo orientado a carácter	BSC	RS-232

Actualmente, esta clasificación ha perdido fuerza debido a la ambigüedad existente. Por ejemplo, algunos autores tratan PPP como un protocolo orientado a carácter sólo por el hecho de que la longitud de la trama es un número entero de bytes. Pero también es cierto que cada byte no forma parte de ningún código de palabras clave (este criterio también sería aplicable a HDLC y Ethernet). Del mismo modo, podemos considerar RS²-232 como un protocolo asíncrono por carácter y síncrono por bit. De hecho, para tener sincronización en nivel de carácter, primero debe haber sincronización a nivel de bit.

⁽²⁾RS es la sigla de *recommended standard*.

En la actualidad, la mayoría de los protocolos de nivel de enlace (PPP, HDLC, Frame relay, Ethernet, ATM³) son considerados síncronos y orientados a bit, aunque en algunos casos el protocolo agrupe de manera lógica los bits en bytes.

⁽³⁾ATM es la sigla de *asynchronous transfer mode*.

1.2. RS-232

RS-232 es la interfaz del puerto serie de los ordenadores. Ha sido uno de los protocolos más comúnmente utilizados para realizar transmisiones de datos entre ordenadores y dispositivos de entrada-salida, como impresoras, ratón, teclado, etc. Actualmente, está en desuso a favor de otros puertos serie como el USB.

RS-232 consiste en un conector tipo DB-25 de 25 pines, aunque es normal encontrar la versión de 9 pines DB-9, más barata e incluso más extendida para cierto tipo de periféricos (como el ratón serie del PC). En cualquier caso, los PC no suelen emplear más de 9 pines en el conector DB-25.

Las señales con las que trabaja este puerto serie son digitales, de +12V (0 lógico) y -12V (1 lógico), para la entrada y salida de datos, y a la inversa en las señales de control. El estado de reposo en la entrada y salida de datos es -12V. Dependiendo de la velocidad de transmisión empleada, es posible tener cables de hasta 15 metros.

Cada pin puede ser de entrada o de salida, con una función específica cada uno de ellos. Las más importantes son:

Pin DB9	Pin DB25	Nombre	Descripción	Sentido
1	8	CD	Detección de portadora	Entrada
2	3	RXD	Recepción de datos	Entrada
3	2	TXD	Transmisión de datos	Salida
4	20	DTR	Terminal de datos preparado	Salida
5	7	GND	Masa del sistema	-
6	6	DSR	Puesta de datos preparada	Entrada
7	4	RTS	Solicitud de envío	Salida
8	5	CTS	Borrado para enviar	Entrada
9	22	RI	Indicador de llamada	-

Figura 1. Conexión null-módem entre dos interfaces RS 232

Nulo de 25 a 25 pines

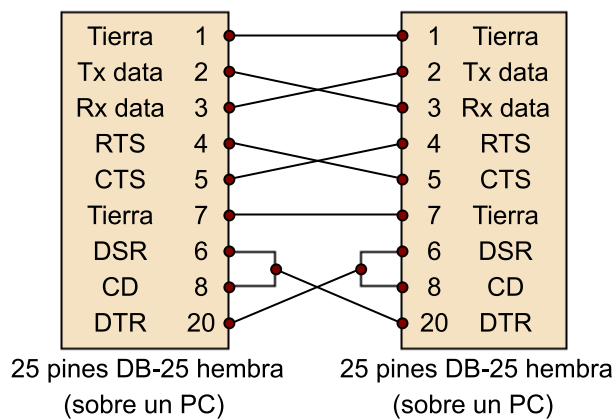


Figura 2. Conector RS-232 (DE-9 hembra)

RS-232 implementa un protocolo asíncrono orientado a carácter mediante los pines TX y RX. Los ocho bits de la codificación de un carácter van precedidos de un bit que indica el inicio del carácter, el bit de *start* y está seguido de una señal de una duración de 1, 1,5 o 2 bits que forman lo que se denomina bits de *stop*.

Figura 3



En la figura 3 se muestra un ejemplo de transmisión asíncrona en la que el bit de *start* es un 0 y la señal de *stop* (de duración 1,5 veces el tiempo de un bit) es 1. Los bits que contienen la información que se ha de transmitir se encuentran en medio de ambas señales. El conjunto formado por un bit de *start*, los ocho bits del carácter de información y los bits de *stop* constituyen un carácter, y entre dos caracteres consecutivos puede intervenir cualquier separación.

En el receptor se consigue la misma base de tiempo que en el emisor, arrancando su reloj en el instante en el que empieza el bit de *start*, señal perfectamente identificable. El receptor sabe que el primer bit significativo es el que viene a continuación de la señal de *start*. Por lo tanto, este ajuste de reloj se repite en cada carácter.

1.3. Protocolo BSC de IBM

El protocolo BSC es un protocolo orientado a carácter, desarrollado por IBM en 1962. Se utiliza para conectar y transferir un gran volumen de datos entre ordenadores mediante uno o varios enlaces dedicados síncronos. Utiliza códigos ASCII o EBCDIC.

Algunas de sus características principales son:

- Admite configuraciones punto a punto y multipunto.
- Gestión del enlace por contención (en punto a punto) y por sondeo (en multipunto).
- Control de flujo por parada y espera.
- Control de errores por CRC (en punto a punto) o por paridad VRC en cada carácter y al final de la trama LRC (en multipunto).
- Delimitación de trama por procedimiento de principio y final

La trama consta de un número entero de caracteres pertenecientes al alfabeto de un código determinado. Para efectuar el control de enlace se utilizan algunos de los siguientes caracteres de control:

Para delimitar la trama:

- SYN (*synchronous*): sincronización. Dos o más se utilizan como sincronización de comienzo de bloque. Es la secuencia 0010110.
- SOH (*start of header*): comienzo de secuencia cabecera de mensaje.
- STX (*start of text*): comienzo de información.
- ETX (*end of text*): fin de información.
- ETB (*end of transmission block*): fin de bloque.

Para el control de línea:

- ENQ (*enquiry*): solicitud de respuesta.
- EOT (*end of transmission*): para marcar el final de una comunicación.
- RVI (*reverse interrupt*): interrupción inversa.

Para el control de flujo:

- ACK⁴: reconocimiento o acuse de recibo positivo.
- ACK0: confirmación par.
- ACK1: confirmación impar.
- NAK⁵: reconocimiento o acuse de recibo negativo.
- WACK⁶: indisponibilidad.

⁽⁴⁾ACK es la forma abreviada de *acknowledgement*.

⁽⁵⁾NAK es la forma abreviada de *negative acknowledgement*.

⁽⁶⁾WACK es la forma abreviada de *wait acknowledgement*.

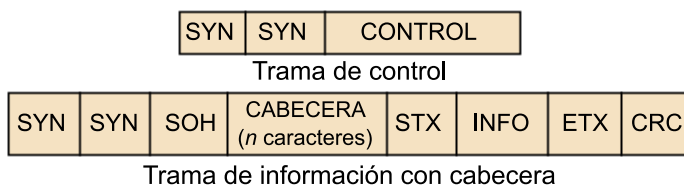
Para el control de transparencia:

- DLE⁷: carácter utilizado para cambiar el significado de los caracteres de control que lo siguen.

⁽⁷⁾DLE es la sigla de *data link escape*.

El formato de trama es variable. Existen tramas de control y de información:

Figura 4



CRC es el campo de control de errores, con caracteres de redundancia.

El principal inconveniente del protocolo BSC es su poca eficiencia, dado que está basado en un algoritmo *stop & wait*. La transferencia es bidireccional, pero debido al *stop & wait* no es simultánea. Además, BSC muestra poca fiabilidad, ya que las tramas de control están poco protegidas, no como las tramas de información.

2. El nivel de enlace en las redes de acceso a WAN

La clasificación de las redes de ordenadores en redes de área local (LAN⁸) y redes de área extendida (WAN) es una de las primeras que normalmente se realiza.

⁽⁸⁾LAN es la sigla de *local area networks*.

En esencia, las LAN son redes privadas que interconectan recursos de red que están geográficamente próximos, limitados a un espacio físico pequeño (como el de una oficina o un edificio). Utiliza diferentes topologías de interconexión, como bus, anillo y estrella. Las tecnologías predominantes son Ethernet IEEE 802.3 y WIFI IEEE 802.11.

Ved también

Podéis ver las principales características de las redes de área local (LAN) en el módulo "Nivel de enlace y redes de área local".

Las redes de área extensa permiten la interconexión de redes LAN separadas por largas distancias, ya sea dentro de la misma ciudad, país o continente. Una red de área local se puede conectar a una red de área metropolitana MAN o a una red de gran alcance WAN utilizando conexiones remotas o cables troncales de fibra óptica, pertenecientes a empresas de titularidad pública, debido al alto coste de las infraestructuras, como operadores de telecomunicaciones, empresas de telefonía o proveedores de Internet (ISP⁹).

⁽⁹⁾ISP es la sigla de *Internet service provider*.

Las conexiones remotas permiten conectar dos o más LAN situadas en diferentes partes del mundo. Debemos diferenciar tres casos típicos de conexiones a redes MAN¹⁰ o WAN:

⁽¹⁰⁾MAN es la sigla de *metropolitan area networks*.

- 1) Interconexión remota de redes internas (intranets)
- 2) Acceso desde la red local a una red MAN o WAN como Internet.
- 3) Apertura de una red local para su acceso desde una red MAN o WAN, como Internet (extranets).

Las dificultades iniciales que han tenido las redes de área local para conectarse a las redes MAN o WAN han sido:

- Elevado precio del transporte de datos sobre conexiones dedicadas.
- Diferencia de protocolos entre las redes LAN y WAN. Las redes de área local utilizaban TCP/IP, mientras que las WAN no, por lo que los datos de las LAN se debían transformar según el formato de las líneas WAN para poder transportarse.
- Ralentización de la velocidad de una LAN al conectarse a una WAN, redes tradicionalmente de menor velocidad. Las redes WAN están soportadas

por medios públicos de comunicaciones con una relación velocidad/coste muy inferior a la de los privados.

Actualmente, estas limitaciones ya se han superado. Por una parte, los protocolos TCP/IP han homogeneizado prácticamente todas las redes existentes y ya no es necesaria la conversión de formatos de transporte entre redes. Cuando hablamos de acceso a redes WAN hablamos de sistemas de transporte que admiten tráfico TCP/IP o directamente hablamos de Internet.

Por otra parte, a medida que se ha incrementado la demanda de enlaces para acceso a redes MAN y WAN, las compañías telefónicas y otras empresas de comunicación (que son las que finalmente transportan los datos de un punto al otro del mundo) han ido desarrollando y ofreciendo tecnologías más rápidas para enlazar sistemas de ordenadores de manera remota y a precios más asequibles.

2.1. Tecnologías de acceso a WAN frente a redes de transporte WAN

Debemos saber diferenciar entre los sistemas utilizados para el acceso a redes WAN de los propios sistemas de transporte de una red WAN. Los sistemas de acceso a redes WAN, tal como dice su definición, permiten a una LAN acceder a la nube de interconexiones de un operador de telecomunicaciones. En cambio, las redes de transporte WAN son las tecnologías que utiliza cada operador en el interior de sus redes. En la figura 5 podemos observar las diferencias.

Internet y las WAN

Hay quien considera Internet como una red de gran alcance WAN asimilable a cualquier red como Frame relay o Ethernet. Fijémonos en que, sin embargo, Internet es el protocolo IP y superiores y que IP significa encaminadores y terminales. Hay que interconectar los encaminadores entre sí, y esto se hace con líneas punto a punto o con enlaces Frame relay, y hay que conectar los ordenadores terminales a los encaminadores, lo que se lleva a cabo mediante módems y líneas telefónicas o ADSL. Es decir, que es necesaria la infraestructura de WAN para construir la red Internet y, por lo tanto, no se puede separar del resto.

Figura 5. Modelo de interconexión de una red local en una red WAN

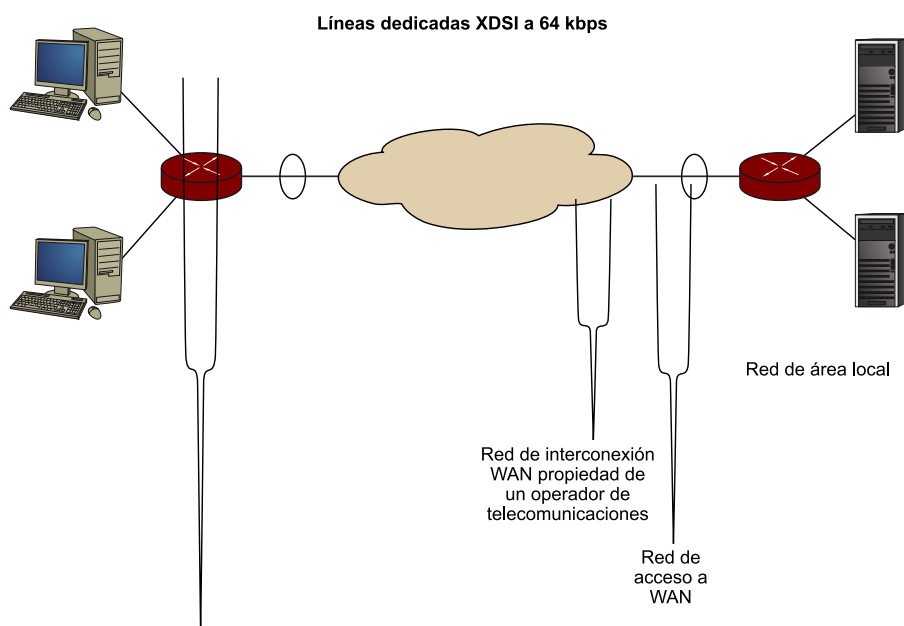
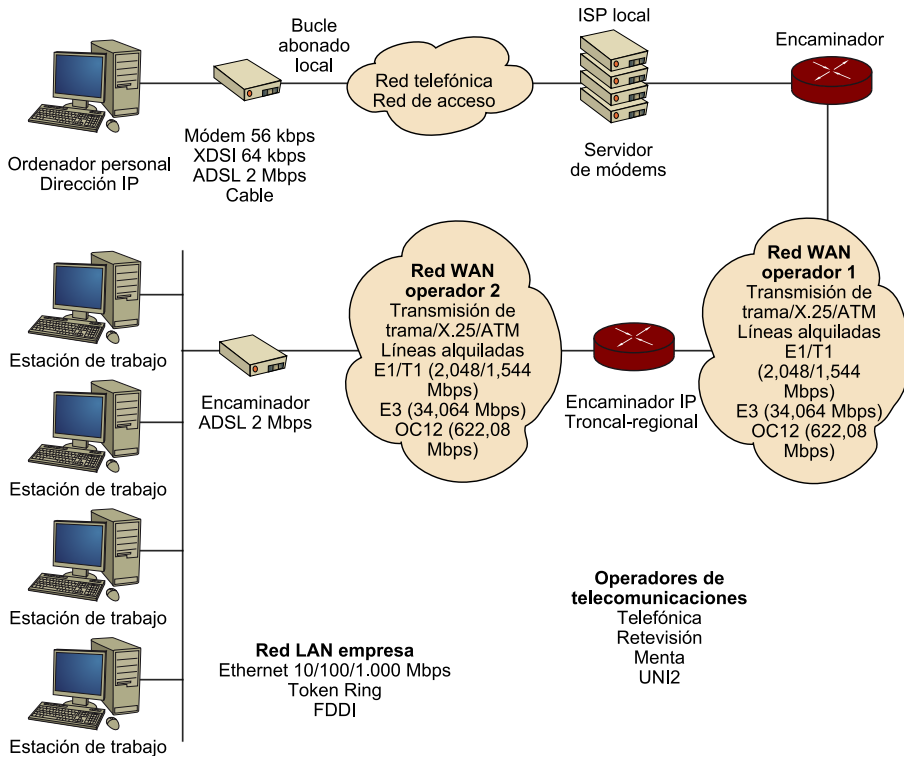
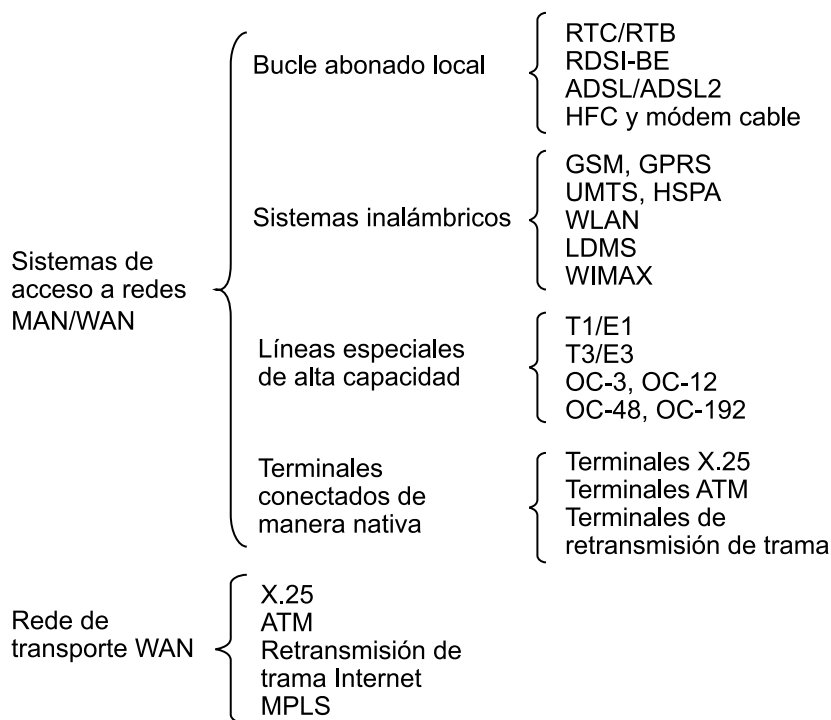


Figura 6. Ejemplo de un esquema de organización de Internet



En el esquema 7 podemos ver la clasificación entre las tecnologías de acceso a redes WAN y las redes de transporte WAN.

Figura 7



Observamos que a las redes X.25, Frame relay y ATM también se puede acceder mediante terminales y líneas especiales de las propias redes.

La red de transporte puede ser propia de una compañía de comunicaciones, tipo X.25, Frame relay y ATM, o una red pública como Internet. Precisamente, una opción cada vez más utilizada en el ámbito de la pequeña y mediana empresa es la utilización de Internet como vínculo WAN para redes LAN. A esta popularización ha contribuido el éxito y el abaratamiento de sistemas de acceso como ADSL y ADSL2+.

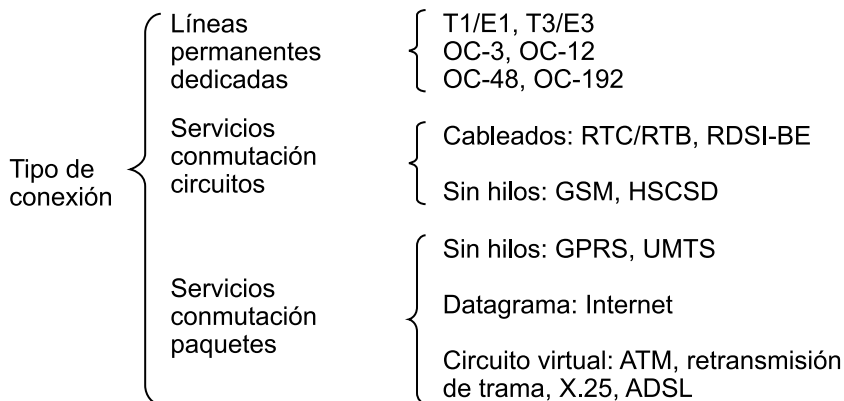
2.2. Clasificación de los servicios de comunicaciones según el tipo de conexión

Normalmente, cuando se desea interconectar dos redes de área local ubicadas a una cierta distancia, es preciso utilizar los servicios de alguna de las redes de uso público que ofrecen las compañías especializadas. Estos servicios se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de conexión que ofrecen, permanentes o temporales, y con el tipo de circuito, reales o virtuales.

A diferencia de las redes de área local, que inicialmente se basaron en medios compartidos, las redes de área extendida siempre se han basado en medios conmutados, al principio de circuitos (como por ejemplo la red telefónica conmutada en su vertiente analógica como digital) y en los últimos 30 años de paquetes (como por ejemplo las redes públicas de datos, como X.25 o Frame relay, y el acceso ADSL).

Las redes que ofrecen servicios se pueden clasificar de la siguiente manera:

Figura 8



2.3. Protocolos de nivel de enlace asociados a tecnologías WAN

Normalmente se utiliza el mismo nombre para asociar, por una parte, la tecnología de acceso o de transporte WAN y, por otra, el protocolo de nivel de enlace que utiliza tal tecnología.

Una de las razones de esta asociación es que tanto las redes LAN como las WAN definen estándares y tecnologías que corresponden exclusivamente a los niveles 1 y 2 de la torre OSI. Mayoritariamente, se consideran como tales las tecnologías RDSI, Frame relay y ATM de nivel 2 (aunque existen autores que

las sitúan en otros niveles de la torre OSI). X.25 es el único estándar que no cumple esta afirmación, ya que su pila de protocolos llega hasta el nivel 3 de la torre OSI.

En la siguiente tabla podemos ver algunas correspondencias entre tecnologías WAN y protocolos de nivel de enlace utilizados:

Tecnología WAN	Nombre protocolo nivel de enlace asociado
XDSI	RDSI (LAP-D-derivado del HDLC)
Frame relay	Frame relay (LAP-F-derivado del HDLC)
ADSL	ADSL (PPPOA-derivado del PPP)
ATM	ATM

De entre todos los protocolos de nivel de enlace diseñados para sistemas de acceso a WAN, podemos destacar dos principalmente: el HDLC y el PPP. La práctica totalidad de protocolos de nivel 2 que se han utilizado en diferentes tecnologías WAN (RTC, RDSI, Frame relay o X.25) deriva de estos dos protocolos básicos. Se pueden considerar como el estándar de facto de los protocolos para redes de área extendida, así como Ethernet lo es para las redes de área local.

Antes de tratar las principales tecnologías o sistemas de acceso a redes WAN que se han utilizado en los últimos años (RTC/RTB, RDSI, ADSL y HFC), es importante describir con detalle dos protocolos.

2.3.1. HDLC

Es un protocolo orientado a bit estandarizado por el organismo ISO a partir del protocolo SDLC⁽¹⁾ (control de enlace síncrono). Fue creado por IBM para la pila de protocolos del SNA.

⁽¹⁾SDLC es la sigla de *synchronous data link control*.

Estos protocolos son más flexibles, seguros y eficaces que los basados en carácter, que obligan a usar el código en el que se basan, como ASCII o EBCDIC.

HDLC es uno de los protocolos de mayor significación en el enlace de datos, no sólo por lo usado que es, sino también por haber dado origen a toda una saga de protocolos. De este protocolo derivan muchos otros protocolos de nivel de enlace, como:

- **LLC**: se utiliza en las redes de área local (LAN).
- **PPP**: se utiliza en Internet.

- **LAPM**: es utilizado en el campo de la comunicación entre módems.
- **LAPD**¹²: se utiliza como canal de señalización (canal D) en el acceso a la red telefónica digital ISDN.
- **LAPB**¹³: (procedimiento de enlace y acceso balanceado): se utiliza para conectar una estación a una red de gran alcance X.25.
- **LAPF**: variante de HDLC para Frame relay.

⁽¹²⁾LAPD es la sigla de *link access procedure d-channel*.

⁽¹³⁾LAPB es la sigla de *link access procedure balanced*.

HDLC ha sido diseñado como un protocolo de nivel de enlace de propósito general que se puede utilizar en numerosas situaciones. Para cubrir las posibles necesidades de comunicación que pueden surgir, HDLC define tres tipos de estaciones, dos configuraciones de enlace, tres modos de operación y tres tipos de tramas.

Los tres tipos de estaciones que define HDLC son:

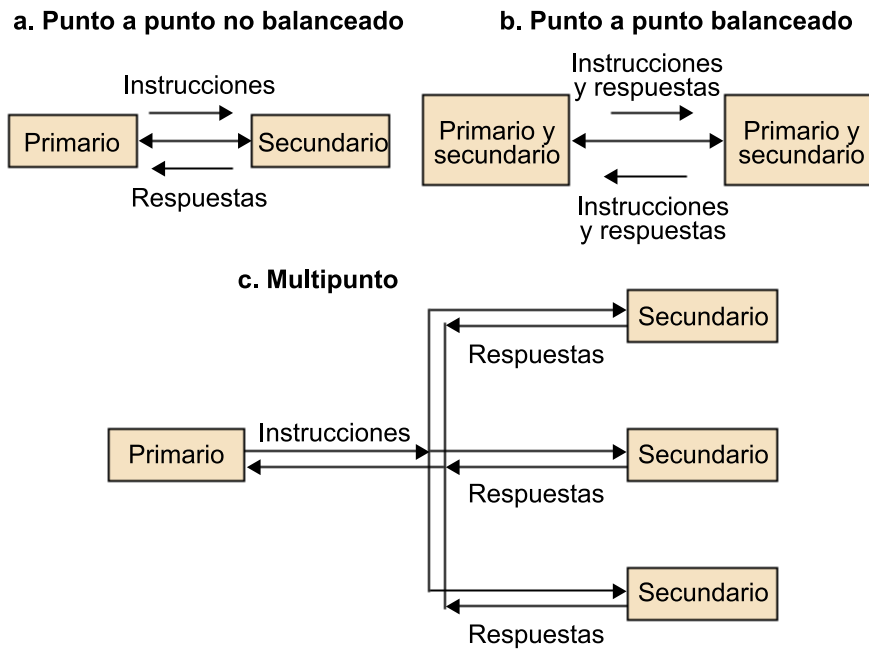
- 1) Estación primaria: controla el funcionamiento del enlace. Sus tramas se denominan órdenes.
- 2) Estación secundaria: funciona bajo el control de una estación primaria. Las tramas que genera se denominan respuestas.
- 3) Estación combinada: mezcla de las características de las dos anteriores.

En cuanto a las configuraciones del enlace, HDLC dispone de:

- a) No balanceada: una estación primaria y una o más secundarias con transmisión semidúplex o dúplex.
- b) Balanceada: dos estaciones combinadas con transmisión semidúplex o dúplex.

En la figura 9 se puede observar una combinación de los tres escenarios o configuraciones que define HDLC.

Figura 9. Configuraciones posibles en el protocolo HDLC



Los nombres de **primario** y **secundario** no hacen referencia a la estación que envía las tramas de información y las confirmaciones, como hasta ahora, sino que esta terminología se utiliza para distinguir ciertos privilegios que tiene el primario. El privilegio principal del HDLC es que puede hacer de árbitro en un enlace multipunto (que hemos denominado **maestro**).

En el HDLC las tramas que envía el primario se conocen como **pedidos** y las que envía el secundario, como **respuestas**. Si en la configuración todas las estaciones son primarias y secundarias al mismo tiempo, se dice que es una **configuración balanceada**; en caso contrario, se trata de una **configuración no balanceada**. Evidentemente, una configuración multipunto debe ser balanceada porque sólo puede existir una estación que sea primaria (que haga de árbitro).

El HDLC permite tres modos de transferencia de datos:

1) **NRM**¹⁴. Este modo se utiliza en configuraciones no balanceadas (casos a y c de la figura 9). En este modo de operación los secundarios (o esclavos) sólo pueden transmitir tramas en respuesta a los comandos enviados por el primario (o maestro). NRM se utiliza en las líneas de múltiples conexiones y, en general, cuando varios de terminales o periféricos se conectan a un ordenador principal que gestiona las líneas por sondeo.

⁽¹⁴⁾NRM es la sigla de *normal response mode*.

2) **ARM**¹⁵. Esta manera se utiliza en configuraciones punto a punto no balanceadas (caso a de la figura). A diferencia de la manera NRM, el secundario puede iniciar un proceso de transmisión sin que el primario lo solicite. No obstante, la estación primaria continúa siendo la responsable de la supervisión del sistema. Esta manera es la menos usada en la actualidad.

⁽¹⁵⁾ARM es la sigla de *asynchronous response mode*.

3) **ABM**¹⁶. Esta manera se utiliza para configuraciones punto a punto balanceadas (caso **b** de la figura). Permite que cualquier estación combinada inicie la transferencia de datos. ABM es la manera usada en las redes LAN que emplean tramas derivadas de HDLC. Los protocolos más usados derivados del HDLC, como el LAPM, el LAPD y el LAPB, son derivados de esta manera.

⁽¹⁶⁾ABM es la sigla de *asynchronous balanced mode*.

El estándar describe el tipo de trama y el comportamiento que se debe seguir en todas las situaciones posibles. Independientemente de la manera, en el HDLC se definen tres tipos de tramas:

1) **Tramas de información**. Son los únicos que contienen datos. Para la recuperación de errores y control de flujo se utiliza *go-back-N* o retransmisión selectiva (en el que muchos de los derivados implementan sólo *go-back-N*). Para las confirmaciones se utiliza la técnica de *piggybacking*.

2) **Tramas de supervisión**. Equivalen a las tramas de confirmación a las que nos hemos referido hasta ahora. Se utilizan para las confirmaciones cuando no se envían tramas de información. Las tramas de supervisión pueden ser de varios tipos:

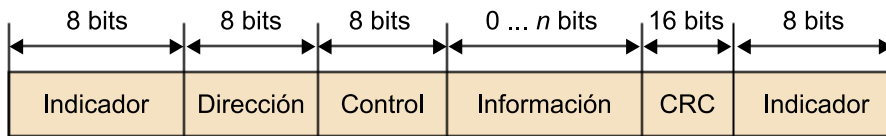
- **Tipo 0: *Receive ready***. Es el nombre que recibe en el estándar el acuse de recibo (*ack*). Se utiliza cuando no hay tráfico de retorno suficiente para utilizar *piggybacking*.
- **Tipo 1: *Reject***. Corresponde al acuse de recibo negativo (NAK). Solicita retransmisión de una trama y no acepta ninguna otra entre tanto. Se utiliza cuando se emplea el mecanismo de *go-back-N*.
- **Tipo 2: *Receive not ready***. Indica un acuse de recibo pero no solicita suspensión del envío para evitar saturar el receptor (control flujo), lo que puede ser necesario si el receptor tiene saturadas sus memorias temporales. Para que la retransmisión se reanude, debe ser enviado un *receive ready*, *reject* o ciertas tramas de control.
- **Tipo 3: *selective reject***. Se utiliza para solicitar retransmisión de una trama determinada cuando se utiliza retransmisión selectiva. Como antes se vio, la ventana del emisor, al disponer de un número de secuencia de tres bits, no puede ser mayor de cuatro. Este mecanismo sólo se prevé en HDLC, no en SDLC ni en LAPB. En HDLC y LAPB hay un tipo de trama extendida en el que los números de secuencia son de siete bits; en este caso, es posible utilizar un tamaño de ventana de hasta 127, usando la técnica *go-back-N*, o de 64, mediante la de repetición selectiva.

3) **Tramas no numeradas**. Se usan en las fases de inicialización y desconexión y para enviar información de control suplementaria.

Estructura de la trama HDLC

HDLC utiliza una trama monoformato compuesta por un conjunto fijo de campos bastante flexible para dar servicio a muchos tipos de transmisión, tal como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Estructura de las tramas en el protocolo HDLC



Tipo de trama	Bits de control							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Información	0	SN			P/F	RN		
Supervisión	1	0	Tipo		P/F	RN		
No numerada	1	1	Tipo		P/F	Tipo		

Los campos se describen a continuación:

a) Indicador: es un delimitador de inicio y final de trama que vale 0111110. Utiliza la técnica de la inserción de ceros para la transparencia en el campo de información (incluye un cero por cada cinco bits en unos consecutivos). El propósito de este sistema es evitar la confusión con el indicador, el único lugar en el que pueden aparecer seis bits en unos seguidos. En líneas inactivas, este campo se transmite continuamente.

b) Dirección: contiene la dirección que tiene en el sistema de transmisión uno de los interlocutores (puede ser el emisor o el receptor). El **contenido del campo** depende del modo de operación. Para satisfacer los requisitos de sistemas con muchos terminales es ampliable de ocho en ocho bits. El campo dirección sólo se utiliza en líneas multipunto. Las líneas multipunto son conexiones en las que varios ordenadores comparten una misma línea física, que es poco frecuente y requiere líneas especiales.

- En un enlace multipunto, si trabajamos con la manera NRM, sólo hay uno primario y cada secundario tiene una dirección única. En este caso, en el campo de dirección se pone siempre la dirección del secundario.
- En la manera ABM, en cambio, se pone la dirección propia cuando se quiere enviar un pedido (la estación actúa como primario) y la dirección contraria cuando se envía una respuesta (la estación actúa como secundario).

c) **Datos:** lo constituye el tren de datos. La longitud es libre y puede ir desde cero hasta un número arbitrariamente largo; no obstante, cada protocolo utiliza un límite concreto.

d) **CRC:** es un código de redundancia cíclica para la comprobación de errores calculado a partir de la norma V.41 del ITU-T. Es extensible a 32 bits.

e) **Control:** identifica el tipo de trama y su función concreta. Puede incorporar una gran cantidad de información y constituye el núcleo del protocolo. Puede ampliarse para secuenciar más de siete tramas en sistemas con un gran retraso de tráfico. Los **bits de control** son los siguientes:

- **SN.** Lleva el nombre de secuencia de una trama de información.
- **RN.** Lleva el número de secuencia de la trama confirmada.
- **P/F (*poll/final bit*).** Este bit tiene muchos usos; algunos de ellos son los siguientes:
 - El primario pone este bit en 1 para solicitar una respuesta urgente de uno secundario.
 - El secundario pone el bit en 1 para indicar el final de una respuesta.
- **Tipo.** El tercer y el cuarto bits codifican el tipo de trama de supervisión, y el sexto, séptimo y octavo, el tipo de trama no numerada

En este apartado sólo se han presentado los ingredientes básicos del estándar para que el estudiante se haga una idea de todos los puntos que involucra la estandarización de un protocolo de nivel de enlace.

2.3.2. PPP

PPP es uno de los protocolos más importantes a nivel de enlace. PPP ha sido diseñado para ser muy flexible: opera sobre líneas serie, líneas telefónicas, enlaces SONET/SDH, ISDN y conexiones X.25. También es el protocolo utilizado para conectar a los usuarios domésticos a su ISP mediante la línea telefónica.

Está definido en los RFC 1661, 1662 y 1663, y también está afectado por los RFC 2153 (extensiones de vendedor), 1331 (transmisión de datagramas multi-protocolo sobre enlaces PPP), 2023 (IPv6 sobre enlaces PPP) y 1994 (protocolo de autenticación por desafío CHAP¹⁷).

El protocolo define mecanismos para:

Lectura complementaria

Para obtener más detalles sobre el protocolo HDLC, podéis consultar:

F. Halsall (1998). *Comunicaciones de datos, redes de computadoras y sistemas abiertos* (4.ª ed.). Addison: Wesley.

⁽¹⁷⁾ CHAP es la sigla de *challenge handshake*.

- Encapsulado (y multiplexado) de datagramas multiprotocolo. Es capaz de multiplexar diferentes protocolos de nivel de red y enlace sobre una única línea o conexión punto a punto.
- Establecimiento, configuración y test de la conexión (LCP¹⁸).
- Una familia de protocolos para establecer y configurar diferentes protocolos de nivel de red (NCP¹⁹). En el caso de IP se denomina IPCP²⁰ (RFC-1172).
- Opcionalmente, PPP soporta un protocolo de compresión de paquetes (CCP²¹) RFC-1962. Las tramas intercambiadas en la negociación del protocolo CCP son análogas a las del protocolo LCP. En ésta, la negociación se acuerda con el algoritmo de compresión que se utilizará en el enlace, como “deflate 15”, “bsd-v1 15” u otros.

⁽¹⁸⁾LCP es la sigla de *link control protocol*.

⁽¹⁹⁾NCP es la sigla de *network control protocol*.

⁽²⁰⁾IPCP es la sigla de *Internet protocol control protocol*.

⁽²¹⁾CCP es la sigla de *compression control protocol*.

Formato de una trama PPP

La figura 11 muestra el formato de una trama PPP. Éste consta de un campo de protocolo de dos bytes y uno de datos. El campo de protocolo identifica el protocolo al que corresponde la información encapsulada en el campo de datos. La tabla muestra los posibles valores del campo de protocolo especificados en los RFC-1340 y RFC-1962.

Figura 11. Trama PPP

2 octetos

Protocolo	Datos
-----------	-------

Assigned PPP DLL Protocol Numbers (RFC-1340 y RFC-1962)			
Valor	Protocolo	Valor	Protocolo
0001 to 001f	<i>Reserved (transparency inefficient)</i>	8021	<i>Internet protocol control protocol</i>
0021	<i>Internet protocol</i>	8023	<i>OSI network layer control protocol</i>
0023	<i>OSI network layer</i>	8025	<i>Xerox NS IDP control protocol</i>
0025	<i>Xerox NS IDP</i>	8027	<i>DECnet phase IV control protocol</i>
0027	<i>DECnet phase IV</i>	8029	<i>Appletalk control protocol</i>
0029	<i>Appletalk</i>	802b	<i>Novell IPX control protocol</i>
002b	<i>Novell IPX</i>	802d	<i>Reserved</i>
002d	<i>Van Jacobson compressed TCP/IP</i>	802f	<i>Reserved</i>
002f	<i>Van Jacobson uncompressed TCP/IP</i>	8031	<i>Bridging NCP</i>
0031	<i>Bridging PDU</i>	8033	<i>Stream protocol control protocol</i>
0033	<i>Stream protocol (ST-II)</i>	8035	<i>Banyan vines control protocol</i>

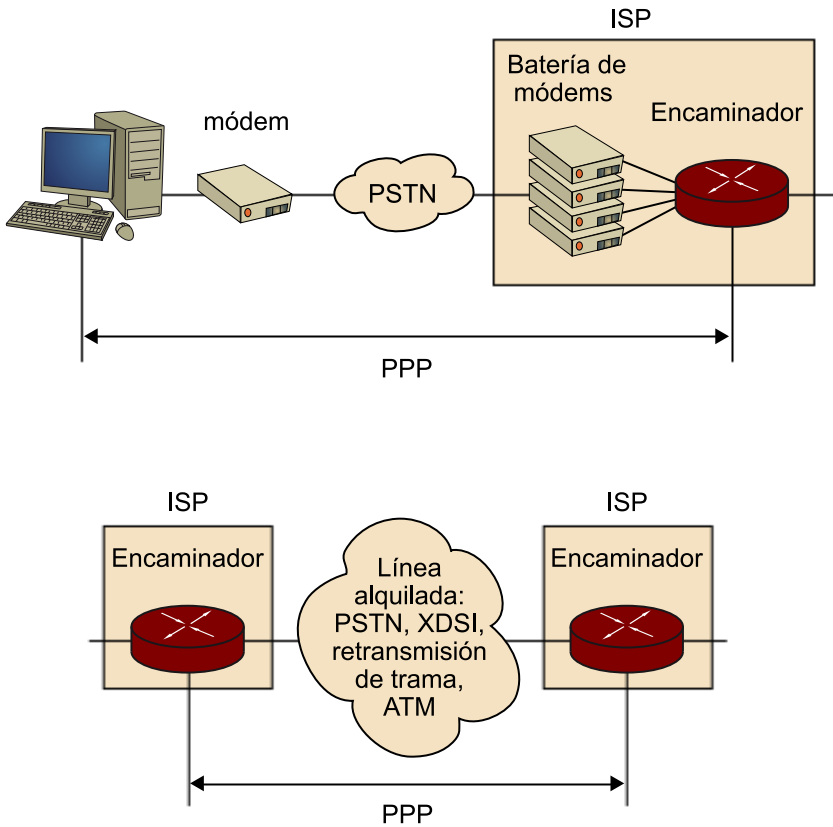
Assigned PPP DLL Protocol Numbers (RFC-1340 y RFC-1962)			
Valor	Protocolo	Valor	Protocolo
0035	<i>Banyan vines</i>	8037	<i>Reserved till 1993</i>
0037	<i>Reserved (until 1993)</i>	80FD	<i>Compression control protocol</i>
00FD	<i>Compressed datagram</i>	80ff	<i>Reserved (compression inefficient)</i>
00FB	<i>Individual link compressed datagram</i>	c021	<i>Link control protocol</i>
00ff	<i>Reserved (compression inefficient)</i>	c023	<i>Password authentication protocol</i>
0201	<i>802.1d hello packets</i>	c025	<i>Link quality report</i>
0231	<i>Luxcom</i>	c223	<i>Challenge handshake aut. protocol</i>
0233	<i>Sigma network systems</i>		

Transmisión de tramas PPP en diferentes tipos de enlaces

La figura siguiente muestra enlaces típicos en los que se utiliza PPP. Existen diferentes RFC que explican cómo transmitir las tramas PPP según la red física que se utiliza:

- Tipo HDLC (RFC-1549).
- X.25 (RFC-1598)
- ISDN (RFC-1618)
- Frame relay (RFC-1973)
- ATM (RFC-2364)
- Ethernet (RFC-2516)

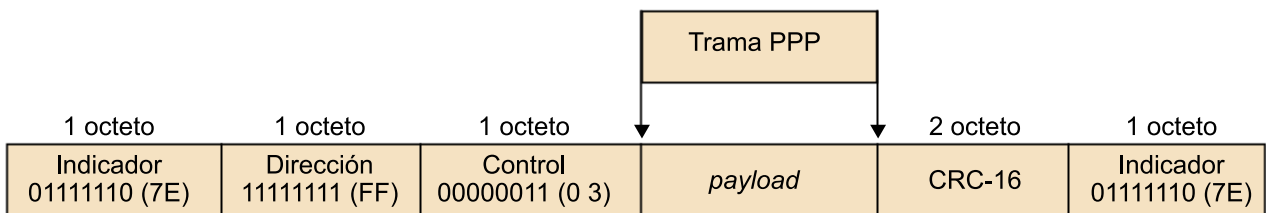
Figura 12. Usos típicos de PPP



PPP en enlaces tipo HDLC (RFC-1549)

Por ejemplo, se utiliza en enlaces mediante el puerto serie RS-232 y con módems o un cable módem *null*. También es aplicable a enlaces síncronos/asíncronos orientados a bit/carácter. La figura 13 muestra el encapsulamiento.

Figura 13. Encapsulamiento de tramas PPP en enlaces HDLC



Tiene los siguientes campos:

- **Indicador:** campo de inicio de trama. Contiene la secuencia de bits 01111110.
- **Dirección:** siempre vale la secuencia de bits 11111111. Este campo no se utiliza porque las conexiones son siempre punto a punto y, por lo tanto, no tiene sentido utilizar ninguna dirección.
- **Control:** contiene la secuencia de bits 00000011, que indica una trama no numerada. Esto significa que, por defecto, PPP no suministra transmisión

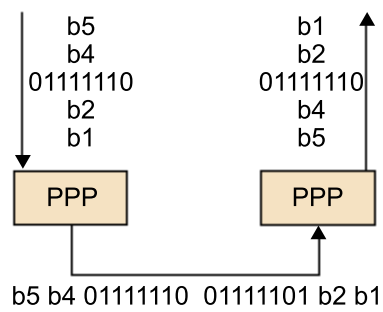
fiable con números de secuencia y acuse de recibo, como hemos visto para HDLC. Aunque no es lo normal, en el momento de establecer la conexión, LCP puede negociar una transmisión fiable. Así, a menos que se negocie una transmisión fiable, los campos dirección y control contienen siempre la secuencia 111111100000011. Dado que es inútil transferir esta información de control, que siempre contiene la misma información, generalmente LCP negocia la supresión de estos dos bytes de la trama al inicio de la sesión cuando no se pide transmisión fiable.

- **Protocolo:** puede tener 1 o 2 bytes. Indica el tipo de protocolo de nivel superior (nivel 3) que se halla encapsulado en el campo datos. PPP puede transportar paquetes de diferentes protocolos de nivel de red, como 0 × 21 para IP, 0 × 29 para AppleTalk, 0 × 27 para DecNet, 0 × 821 para IPCP, etc.
- **Información:** Contiene la información. Tiene una longitud variable, hasta un máximo que negocia LCP al establecer la conexión. Por defecto, el tamaño máximo de trama es de 1500 bytes.
- **Suma de comprobación:** Puede tener de 2 a 4 bytes de longitud. Utiliza el mismo CRC del protocolo HDLC.
- **Indicador:** campo de final de trama. Contiene la secuencia de bits 01111110.

Mecanismo de transparencia

El protocolo PPP utiliza la técnica de transparencia denominada *bit stuffing* para solucionar el problema. Cuando la secuencia 01111110 aparece en el campo de datos de la trama, el protocolo considera que esta secuencia de bits es de información y no el campo Flag, que indica el final de trama. Por ello, el PPP define un byte de control 01111101. Antes de enviar la secuencia 01111110 al campo de información, el protocolo envía el campo de control para indicar al receptor que no es un campo de control, sino información. Cuando se recibe el campo 01111110, precedido del campo de control 01111101, el campo de control es eliminado y el byte se considera información. Si la secuencia del byte de control aparece en el campo de datos, entonces también es enviado precedido de otro byte de control. Una sola instancia del byte de control significa que lo que viene después corresponde a la información original.

Figura 14. Ejemplo de mecanismo de transparencia



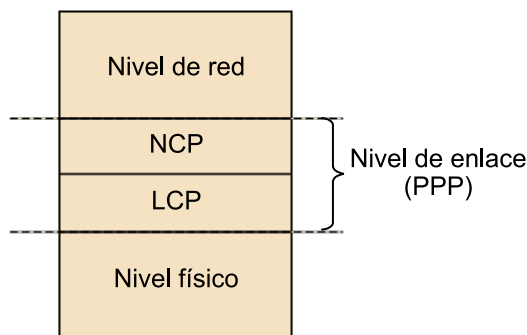
Niveles de protocolo PPP

Antes del intercambio de información entre los dos equipos de un enlace, PPP debe negociar los parámetros necesarios que permitan a los datagramas de nivel de red circular a través del enlace satisfactoriamente.

PPP se divide lógicamente en dos niveles:

- 1) LCP, nivel que negocia parámetros propiamente del nivel de enlace.
- 2) NCP, nivel que negocia parámetros del nivel de red.

Figura 15



Nivel LCP (RFC-1661)

Se encarga de negociar una serie de parámetros en el momento de establecer la conexión con el sistema remoto. También se encarga del mantenimiento y de la finalización del enlace punto a punto.

LCP establece mecanismos que permiten a los equipos dialogar para llegar a un consenso en caso de discrepancia. Puede suceder que sólo una parte de los valores propuestos por un extremo del enlace sean aceptados por el otro extremo.

LCP también suministra mecanismos que permiten validar el ordenador que llama (mediante el uso de claves tipo usuario/contraseña). Esto resulta especialmente útil en el caso de conexiones por RTC, por ejemplo, para proveedores de servicios Internet que han de controlar que sus usuarios estén realmente autorizados.

Las opciones que negocia el nivel-protocolo LCP son las siguientes:

- MRU²²: tamaño máximo de las tramas.
- ACCM²³: permite indicar qué caracteres deben escaparse.
- *Authentication protocol*: indica al extremo que debe autenticarse. También indica el protocolo de autoidentificación, que puede ser PAP²⁴ o CHAP²⁵.
- *Quality protocol*: indica el protocolo que se utilizará para monitorizar la calidad del enlace.
- *Magic number*: permite detectar si el enlace está cortocircuitado (se recibe un *echo* de lo que se transmite) u otras anomalías. Básicamente, el funcionamiento es el siguiente: cada extremo elige un número aleatorio de 32 bits y se comunica durante la negociación de las opciones. Cuando se recibe una trama, se compara el *magic number* con el que se ha elegido. Si es el mismo, significa que se está recibiendo un *echo* de la trama que se ha enviado.
- PFC²⁶: permite que en algunos casos el campo de protocolo de las tramas (podéis ver la figura “Trama PPP”) se transmita en un único byte (en vez de 2). Por ejemplo, cuando el contenido de la trama PPP es un datagrama IP, el campo de protocolo tiene el valor 21 en lugar de 0021.
- ACFC²⁷: permite comprimir los campos de dirección y control (podéis ver la figura “Encapsulamiento de tramas PPP en enlaces HDLC”). En este caso, estos campos se eliminan.

(22)MRU es la sigla de *maximum receive unit*.

(23)ACCM es la sigla de *asynchronous control character map*.

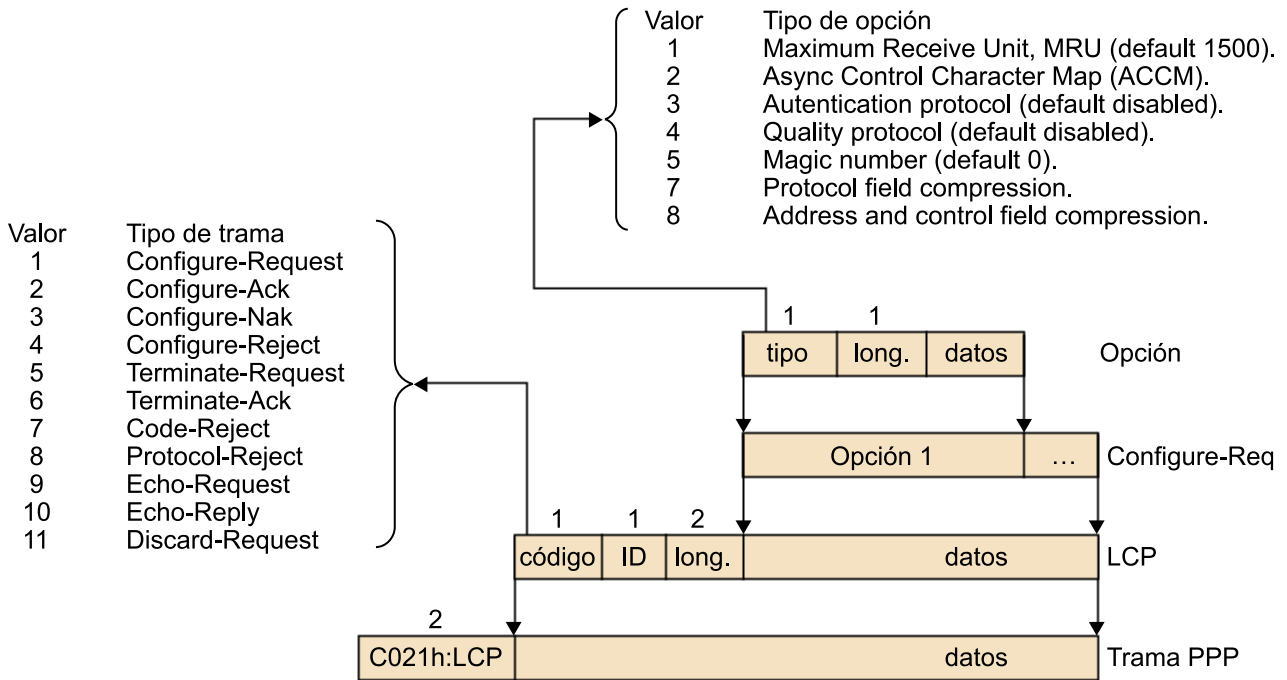
(24)PAP es la sigla de *password authentication protocol*.

(25)CHAP es la sigla de *challenge handshake authentication protocol*.

(26)PFC es la sigla de *protocol field compression*.

(27)ACFC es la sigla de *address and control field compression*.

Figura 16. Formato y encapsulado de una trama PPP con información LCP



La figura 16 muestra el formato de las tramas que utiliza LCP para la negociación de las opciones del enlace PPP, y las tramas LCP que hay definidas. El tipo de trama se identifica por el campo *código*. El campo *id* de la trama LCP permite establecer la correspondencia entre una petición y la respuesta correspondiente. En cada campo se indica el número de bytes que ocupa (excepto en el campo de datos, que es de medida variable). El campo *long* da la medida de la trama en bytes. Fijaos que la trama incluye la cabecera (los campos *código*, *id* y *long*) y el campo de datos. Por ejemplo, si el campo de datos ocupa 4 bytes, el campo *long* tendrá el valor 8.

Las tramas *configure-request*, *configure-ack*, *configure-nak* y *configure-reject* sirven para la negociación de las opciones. Para esta negociación hay definido un autómata. Fundamentalmente, un nodo propone las opciones enviado un *configure-request*. Si el otro extremo acepta las opciones, entonces envía *configure-ack* con una copia de las opciones. En el caso de existir opciones reconocidas pero no aceptadas, se envía un *configure-nak* y, en el caso de existir opciones no reconocidas o no negociables, se envía un *configure-reject*.

Las tramas *terminate-request* y *terminate-ack* sirven para la terminación del enlace. Finalmente, las tramas *code-reject*, *protocol-reject*, *echo-request*, *echo-reply* y *discard-request* sirven para la gestión y el mantenimiento del enlace.

Nivel NCP

Familia de protocolos (uno por cada protocolo de nivel superior) que tienen la función de negociar parámetros específicos para cada protocolo de nivel red utilizado. En el caso de una conexión IP, el protocolo utilizado es el IPCP (RFC-1172). Este protocolo negocia la dirección IP que utilizará el protocolo IP durante la conexión. Su utilidad se pone de manifiesto cuando, en el momento de conectarse, un usuario conectado vía módem obtiene una dirección IP dinámicamente por parte del ISP. Utiliza el mismo formato que las tramas LCP para la negociación de opciones.

Negociación de la dirección

Cuando se negocia la dirección, la estación que la pide propone la dirección 0.0.0.0 con un *configure-request*. La otra envía un *configure-nak* con la dirección que debe utilizar (el *nak* es porque se reconoce la opción pero no se acepta el valor de 0.0.0.0 y se propone la dirección que se debe utilizar).

Figura 17. Formato y encapsulado de una trama PPP con información IPCP

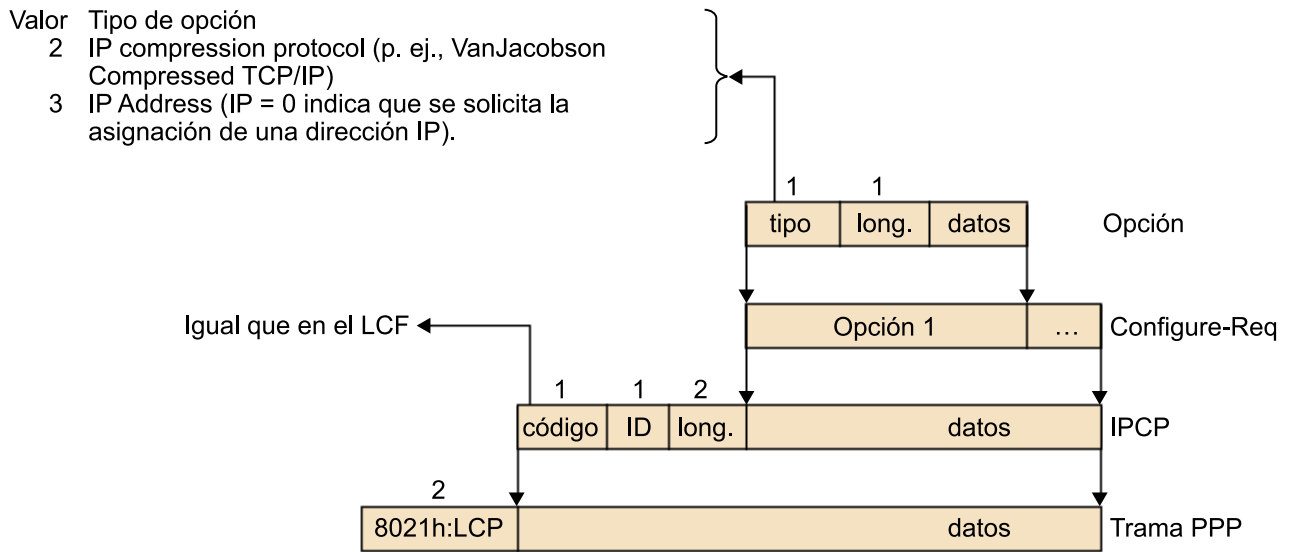
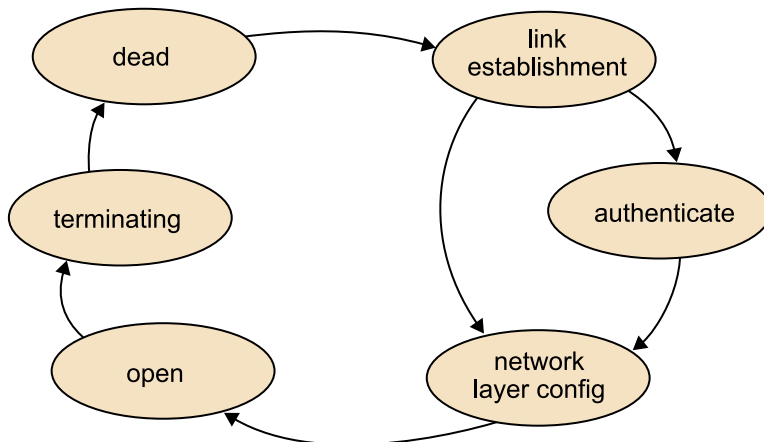


Diagrama de estados del PPP

La figura 18 muestra el diagrama de estados correspondiente al establecimiento y la terminación de un enlace PPP.

Figura 18. Diagrama de estados del LCP



El protocolo PPP siempre empieza en el estado *dead*, en el que no hay ninguna conexión física. Cuando PPP recibe de la capa física un evento conforme se quiere establecer una conexión (por ejemplo, se detecta una portadora), pasa al estado de *link establishment*.

En este estado, el protocolo LCP empieza la negociación de los parámetros de establecimiento. Una estación envía las opciones de configuración de enlace que desea a una trama LCP. La otra estación responde con una trama confirmación de la configuración, o de denegación de la confirmación, o con una trama en la que indica las opciones no reconocidas o no aceptables. Si en este estado se negocia que haya autenticación, entonces PPP pasa al estado *authenticate*. Si no se ha negociado esta opción, directamente pasa al estado *network*.

En el estado autenticación, un extremo (servidor) requiere que el otro extremo (cliente) le envíe una clave o contraseña previamente acordada entre los dos con el fin de poder validar el acceso al estado *network*. Generalmente, se utilizan dos protocolos:

- 1) PAP. Utiliza un mecanismo de 2 pasos con el fin de identificarse.
- 2) CHAP. Utiliza un mecanismo de 3 pasos. El procedimiento es el siguiente:
 - Una vez que se ha establecido la conexión inicial, el servidor de autenticación envía un mensaje de desafío al cliente.
 - El cliente responde con un valor calculado con una función *hash* no reversible.
 - El autenticador comprueba la respuesta contra su propio cálculo del valor *hash*. Si los valores coinciden, se reconoce la autenticación; en caso contrario se rechaza la conexión.
 - A intervalos arbitrarios el autenticador envía un nuevo desafío al cliente y repite los pasos 1 a 3.

Si la autenticación tiene éxito, se entra en el estado *network*, en el que el protocolo NCP configura los parámetros del protocolo de nivel de red. En el caso de IP, se utilizará el protocolo IPCP, que negociará la dirección IP de los nodos.

A partir de aquí, PPP entra en el estado *open*, en el que las dos estaciones empiezan a intercambiar información de nivel 3 mediante tramas PPP.

Para verificar el estado de la línea, LCP puede enviar tramas *echo-request* y *echo-reply* (petición y respuesta) entre los dos equipos que configuran el enlace PPP con el fin de mantener su disponibilidad.

El enlace PPP se mantiene en el estado *open* hasta que una estación recibe una trama LCP *terminate-request* para acabar la comunicación. Cuando la otra estación le confirma la finalización de la comunicación con una trama LCP, el enlace entra en el estado *dead*.

PPPoE

Originalmente, PPP fue diseñado para conectar estaciones a Internet a través de líneas serie punto a punto, del mismo modo que se conseguía con los módems sobre la red telefónica conmutada. PPP no es adecuado para las relaciones multipunto que se establecen en redes Ethernet y otros entornos multiacceso.

PPPoE²⁸ se desarrolló para solucionar las limitaciones indicadas anteriormente. PPPoE, que encapsula tramas PPP sobre tramas Ethernet, puede ser utilizado por múltiples estaciones en un entorno compartido, como es el caso de Ethernet, para abrir sesiones PPP a múltiples destinos mediante uno o más módems que actúan como puentes. PPPoE está diseñado para ser utilizado en tecnologías de acceso de banda ancha a redes remotas (como DSL y módem de cable), suministrando una topología de puente a la Ethernet para que los proveedores de acceso a Internet puedan, si lo desean, mantener la abstracción de sesión asociada al protocolo PPP.

(28) PPPoE es la sigla de *point to point protocol over Ethernet*.

PPPoE, que ha sido regulado en el RFC 2516, permite conectar, mediante un dispositivo de acceso simple que cumpla la función de puente, una red de estaciones a un concentrador de acceso remoto. Con este modelo, cada estación utiliza su propia pila PPP, por lo que el control de acceso, el cifrado, la compresión, la posible facturación y el tipo de servicio pueden ser efectuados siguiendo una filosofía por usuario, y no por lugar, como debería ser si no se pudiera utilizar PPPoE.

PPPoA

PPPoA²⁹ es un protocolo muy similar a PPPoE, pero utiliza como medio de transporte ATM AAL5³⁰, en lugar de Ethernet. PPPoA permite encapsular tramas PPP sobre tramas ATM y principalmente es utilizado en servicios de módem de cable y DSL, ofreciendo a sus usuarios características estándar de PPP como autenticación, cifrado y compresión.

(29) PPPoA es la sigla de *point to point protocol over ATM*.

(30) ATM AAL5 es la sigla de *asynchronous transfer mode adaptation layer 5*.

2.4. Tecnologías de acceso a redes WAN

2.4.1. Red telefónica conmutada/básica (RTC/RTB)

La red telefónica es el ejemplo por excelencia de las redes de conmutación de circuitos. Es de alcance mundial y está orientada a la transmisión de voz, aunque también se utiliza para la transmisión de datos mediante el bucle de abonado analógico, por módems.

Los protocolos y las normas utilizadas por los módems evolucionaron rápidamente en las décadas de los ochenta y noventa. En poco menos de una década se pasó de establecer circuitos de 2.400 bit/s en semidúplex hasta alcanzar los 56 Kbps en el sentido red-usuario (descarga), y 33,6 Kbps en el sentido usuario-red (subida), utilizando módems avanzados con corrección de errores y compresión de datos.

La siguiente tabla muestra la evolución de los estándares europeos ITU-T para la operación de los módems, junto a sus características operacionales:

Tipo de módem	Velocidad máxima de datos	Técnica de transmisión	Técnica de modulación	Modo de transmisión	Uso de línea
V.21	300	Asíncrono	FSK	Semidúplex, dúplex	Conmutada
V.22	600	Asíncrono	PSK	Semidúplex, dúplex	Conmutada/ privada
	1.200	Asíncrono/ síncrono	PSK	Semidúplex, dúplex	Conmutada/ privada
V.22 bis	2.400	Asíncrono	QAM	Semidúplex, dúplex	Conmutada
V.23	1.200	Asíncrono/ síncrono	FSK	Semidúplex, dúplex	Conmutada
V.26	2.400	Síncrono	PSK	Semidúplex, dúplex	Privada
	1.200	Síncrono	PSK	Semidúplex	Conmutada
V.26 bis	2.400	Síncrono	PSK	Semidúplex	Conmutada
V.26 ter	2.400	Síncrono	PSK	Semidúplex	Conmutada
V.27	4.800	Síncrono	PSK		
V.29	9.600	Síncrono	QAM	Semidúplex, dúplex	Privada
V.32	9.600	Síncrono	TCM/QAM	Semidúplex, dúplex	Conmutada
V.32 bis	14.400	Síncrono/ asíncrono	TCM/QAM	Semidúplex, dúplex	Privada
V.34	28.800	Síncrono/ asíncrono	TCM/QAM	Semidúplex, dúplex	Conmutada
V.90	56.800	Síncrono/ asíncrono	-	Semidúplex, dúplex	Conmutada
V.42	Cualquiera	Corrección de error			

Tipo de módem	Velocidad máxima de datos	Técnica de transmisión	Técnica de modulación	Modo de transmisión	Uso de línea
V.42 bis	Cualquiera			Compresión de datos	

Estos circuitos no son aptos para volúmenes de transmisión de datos altos debido a la baja velocidad de transferencia y a la alta probabilidad de error sin corrección del bucle analógico (10^{-4}).

La RTC analógica tiende a desaparecer a causa de la progresiva sustitución de las centrales locales por nodos digitales y al hecho de existir productos sobre el bucle de abonado local más competitivos en la relación ancho de banda/precio.

Actualmente, existen numerosas ofertas de tarifa “plana” en las que abonando una cantidad fija mensual se dispone de un acceso “ilimitado” de tiempo.

Todavía puede ser una buena opción en áreas rurales donde todavía no han llegado otras tecnologías digitales, o tienen una difícil implantación.

2.4.2. Red digital de servicios integrados

La red digital de servicios integrados (RDSI) es una red pública mundial que ofrece una amplia variedad de servicios y que busca sustituir al resto de las redes telefónicas existentes.

Desde la perspectiva de las estaciones, la RDSI puede dar acceso a una red de conmutación de circuitos con vistas a establecer conexiones de voz (el equivalente a la red telefónica actual), puede dar acceso a una red de paquetes para establecer conexiones de datos y permite establecer un enlace punto a punto con otra estación con el fin de disponer de una conexión de datos permanente.

La RDSI proporciona un canal digital extremo a extremo que ofrece acceso integrado a todo un conjunto de servicios: transmisión de voz, datos e incluso vídeo.

Con la aparición de la red de alta velocidad ATM, denominada RDSI de banda ancha, se hizo necesario establecer la siguiente diferenciación:

- RDSI-BE de banda estrecha, la red digital que ofrece acceso a WAN.
- RDSI-BA de banda ancha, la red digital de transporte WAN.

RDSI de banda estrecha (RDSI-BE)

La RDSI-BE³¹ consiste en extender hasta el mismo bucle de abonado la red digital. Se trata de la sustitución lógica del equipamiento de telefonía analógica tradicional entre centrales por su equivalente digital, manteniendo el par de cobre ya instalado. Es un proceso que iniciaron muchas compañías telefónicas hace bastantes años.

⁽³¹⁾RDSI-BE corresponde en inglés a *narrowband integrated services digital network (narrowband-ISDN)*.

Dado que la transmisión de la señal se realiza digitalmente en todo el trayecto, en la RDSI el teléfono actúa de código y digitaliza la señal acústica del auricular con una frecuencia de muestreo de 8 KHz, enviando ocho bits por muestra. En el caso de conectar un ordenador a la línea, no es necesario utilizar módem (pero sí un adaptador) y se podrán transmitir datos a una velocidad de 64 Kbps. A diferencia de lo que ocurre con las conexiones analógicas, los 64 Kbps están asegurados, sin ruidos ni interferencias, y no hay necesidad de negociar la velocidad en función de la calidad de la línea.

El estándar RDSI contempla dos tipos de acceso al servicio:

1) El acceso básico, también conocido como BRI³² o acceso $2B + D$. Está formado por dos canales digitales de 64 Kbps denominados canales *B* (de Bearer, portador), más un canal de 16 Kbps de señalización denominado canal *D* (posiblemente de *data*). Está dirigido a usuarios domésticos y a pequeñas oficinas y ofrece un ancho de banda³³ máximo de 128 Kbps.

⁽³²⁾BRI es la sigla de *basic rate interface*.

⁽³³⁾En inglés, *throughput*.

2) El acceso primario, conocido asimismo como PRI³⁴, está formado en Europa por 30 canales *B* y uno *D* de señalización, todos de 64 Kbps; también se le denomina $30B + D$. En Norteamérica es $23B + D$ (23 canales *B* y uno *D*, todos de 64 Kbps). La diferencia se debe a que en Europa un PRI se transporta en una línea *E1*, mientras que en Norteamérica se utiliza una *T1*.

⁽³⁴⁾PRI es la sigla de *primary rate interface*.

Si un usuario necesita mayores prestaciones, puede contratar más canales *B* en agrupaciones que pueden llegar a dar un ancho de banda superior a los 100 Mbps. No obstante, en estos casos ya no estaríamos hablando de RDSI-BE, sino de RDSI-BA.

Para poder llevar la señal digital por el bucle de abonado sin modificación, es preciso que la distancia que se deba cubrir no sea superior a unos 5-6 km; por este motivo, la cobertura de RDSI en áreas rurales es aún muy deficiente.

Mediante RDSI se puede acceder a la mayoría de los servicios ofrecidos por las operadoras de comunicaciones.

2.4.3. ADSL y ADSL 2

La tecnología ADSL es un sistema de comunicaciones que permite la implantación de servicios que requieren velocidades de transmisión elevadas a usuarios individuales y organizaciones, aprovechando el par de cobre del bucle de abonado de la red de telefonía convencional, manteniendo intacto el canal de voz tradicional.

El ADSL ha sido la apuesta de las grandes operadoras de telefonía para poder ofrecer comunicaciones de datos a alta velocidad en el marco residencial, sin la necesidad de crear nuevas infraestructuras, frente a otras tecnologías basadas en la fibra óptica o el cable coaxial.

El par de cobre trenzado que se emplea en el bucle de abonado de las redes de telefonía tiene un ancho de banda aproximado de 1 MHz (hasta 2 MHz, según el estado de la línea). De todo este ancho de banda sólo se utiliza una porción mínima de unos 4 KHz para el canal de voz. La tecnología ADSL aprovecha el ancho de banda no utilizado por el canal de voz y permite el uso simultáneo del par de cobre para conversación de voz y transmisión de datos. Para hacerlo factible, es necesaria la colocación de un filtro separador de bandas³⁵ o microfiltro en la residencia del cliente. Además, ADSL opera utilizando un par de módems, uno al lado del usuario y el otro en la central telefónica más próxima, en la que se ubican los DSLAM³⁶.

⁽³⁵⁾En inglés, *splitter*.

⁽³⁶⁾DSLAM es la sigla de *digital subscriber line access multiplexer*.

ADSL utiliza dos canales asimétricos como transmisión:

1) Un canal de alta capacidad (hasta 6-8 Mbps, dependiendo de la distancia en la central, que debe ser menor de 5-6 km, y del estado de la línea), en sentido descendente³⁷ (de la central local hacia el abonado).

⁽³⁷⁾En inglés, *downstream*.

2) Un canal de capacidad media-baja (640 Kbps-1 Mbps) en sentido ascendente³⁸ (del abonado hacia la central local).

⁽³⁸⁾En inglés, *upstream*.

La tecnología ADSL 2+, definida por la UIT-T en la norma G.992.5, se caracteriza por los siguientes aspectos:

- Permite mayores velocidades de transmisión descendentes en bucles cortos (hasta 24 Mbit/s en bajada) y mayores coberturas sobre bucles largos. No hay incremento significativo de la velocidad de transmisión en enlace ascendente (hasta 800 Kbit/s).
- El incremento de capacidad de transmisión se basa en la extensión del ancho de banda utilizable sobre el par de cobre, que pasa de 1,1MHz (ADSL) a 2,2 MHz (ADSL 2+).

- Mejoras en la compatibilidad espectral, es decir, reducción de interferencias en la red de acceso.

La norma define una serie de anexos que especifican las características de ADSL sobre líneas analógicas (RTB) o digitales (RDSI), así como otros que contemplan la extensión del caudal disponible en sentido ascendente.

Desde el punto de vista de servicios, esta tecnología aporta dos ventajas principales:

1) En primer lugar, permite incrementar significativamente el alcance del servicio, es decir, para una velocidad determinada (1 Mbit/s, 2 Mbit/s, etc.), se puede dar servicio a clientes con bucles de abonado de mayor longitud que si se utiliza el ADSL convencional.

2) El incremento de velocidades máximas alcanzables abre la puerta a nuevas aplicaciones que pueden beneficiarse de un mayor ancho de banda, como la televisión sobre ADSL, servicios de videoconferencia, descarga de ficheros o acceso a contenidos multimedia en general.

En la actualidad, ADSL 2+ funciona ya en muchos países europeos y permite el acceso a todo tipo de servicios de los ofertados por las operadoras de telecomunicaciones: televisión, vídeo, audio bajo demanda, etc.

2.4.4. HFC y cable módem

Es una tecnología digital sobre línea analógica y el competidor más importante del servicio ADSL en su nicho de mercado. Utiliza el mismo cable utilizado en la distribución de señal de televisión de pago para la transferencia de datos informáticos. En el domicilio del abonado se separa la señal de vídeo, por un lado, y la de datos informáticos, por el otro, para lo que se utiliza un módem de cable.

Las redes HFC son redes de acceso cableadas terrestres, basadas en sistemas híbridos que combinan fibra óptica y cable coaxial. La fibra es usada para el transporte de los contenidos y el coaxial para el cableado de acometida hasta los usuarios finales. El origen de las actuales redes HFC se remonta a los años sesenta en Estados Unidos, donde por aquel entonces se desarrollaron las redes CATW³⁹. Estas redes se empleaban para la transmisión de señales de televisión analógica, usando como soporte de transmisión el cable coaxial, que permitía disponer de varios canales de televisión, de manera simultánea y con mejor calidad que la transmisión aérea de televisión, gracias al mayor ancho de banda del coaxial. Posteriormente, estas redes evolucionaron hacia las HFC y dejaron de ser exclusivamente redes de distribución de televisión para con-

⁽³⁹⁾CATW es la sigla de *community antenna television*.

vertirse en redes de banda ancha de larga distancia y alta capacidad, gracias a la incorporación de la fibra óptica, lo que ha permitido una mayor capacidad de transmisión, distancias de acceso y servicios asociados.

Este tipo de redes poseen una configuración altamente jerárquica basada en anillos de fibra óptica y redes activas de coaxial. Su topología consta de los siguientes elementos:

- **Cabecera:** en ella se recogen todos los canales de televisión que se han de difundir por la red, y se establecen todas las interconexiones con otras redes de transporte fijas o móviles, ubicándose los servidores de acceso en los diferentes servicios, y el servicio telefónico. La cabecera suele formar parte de una red de transporte interurbano consistente en una red óptica que interconecta las cabeceras de servicios de varias poblaciones, como soporte de transporte de los servicios prestados.
- **Red troncal:** se encarga de llevar la señal desde la cabecera hasta los puntos de distribución. Es posible distinguir la red troncal primaria, la red óptica que une la cabecera y los nodos primarios, de la red troncal secundaria, también de tipo óptico y que une los nodos primarios con los nodos finales o de distribución.
- **Red de distribución:** es una red eléctrica, sobre cable coaxial, que une los nodos finales con las instalaciones de los abonados. Tiene tres partes, la red de coaxial, que va del nodo final a los TAP (puntos de conexión de red), la acometida, que salva el tramo comprendido entre el PCR (TAP y/o caja terminal de pares) y el PTR en el hogar del cliente, y la red interior del cliente.

HFC destaca por ser una de las pocas tecnologías de acceso que es capaz de soportar todos los servicios demandados en la actualidad sin limitaciones destacables. No obstante, como redes que requieren un cableado de fibra en su *backbone* de red, y un cableado de coaxial en la parte final de acceso, están fuertemente limitadas al ámbito espacial y se distribuyen casi exclusivamente en entornos urbanos y su periferia.

2.4.5. Líneas dedicadas alquiladas

Una línea dedicada es un enlace de comunicaciones punto a punto abierto de modo permanente entre los ordenadores o encaminadores⁴⁰ que se desean unir. Normalmente, son alquilados a los operadores de comunicaciones, que sólo ceden el medio de transmisión de datos a nivel físico, por lo que es el usuario quien debe suministrar los protocolos de niveles superiores.

⁽⁴⁰⁾En inglés, *routers*.

Se trata de un concepto contrario al de recurso compartido, como pueden ser las redes de acceso, las WAN públicas o Internet (la WAN pública por antonomasia).

Para contratar una línea dedicada ha de optarse entre unas velocidades prefijadas ofrecidas por las compañías telefónicas. El precio de una línea dedicada es independiente del tráfico que efectivamente soporta y consiste en una cuota fija mensual que se establece en función de la velocidad y de la distancia entre los dos puntos que se unen.

En las líneas dedicadas la capacidad contratada está reservada de modo permanente en todo el trayecto. Los operadores de comunicaciones garantizan la disponibilidad continua de un ancho de banda determinado junto a otros parámetros de calidad, como latencia constante, que son características que no pueden ser garantizadas habitualmente por otros sistemas públicos, pero que incrementan notablemente las tarifas cobradas por estos servicios.

Su coste es elevado y, por tanto, su instalación generalmente sólo se justifica cuando el uso es elevado. Por este motivo, las líneas dedicadas no suelen utilizarse en casos en los que se necesita una conexión esporádica, por ejemplo, una oficina que requiere conectarse unos minutos al final del día para transferir unos ficheros o un usuario doméstico que se conecta a Internet en los ratos de ocio.

Las líneas dedicadas no están disponibles en todos los países, ni siquiera están disponibles para cualquiera en los países donde existen. Los principales tipos de líneas dedicadas son:

- T1/E1: líneas de hasta 1,544/2,048 Mbps dedicadas punto a punto, que son empleadas por muchos ISP y otras empresas en el acceso corporativo a WAN o para la interconexión de LAN. Tienen un coste alto, muy superior, por ejemplo, a las líneas ADSL que se mueven en un ancho de banda equivalente, aunque también ofrecen mayor fiabilidad.

- T3/E3: similares en cuanto a funcionalidad a las anteriores, pero con velocidades de hasta 44,736/34,368 Mbps, pues agrupan, respectivamente, 28/16 líneas T1/E1. El coste es muy superior.
- OC-3/12/48/192: en todos los casos se trata de conexiones de fibra óptica con capacidades de 155.52/622.08 y 2.488 Mbps, y que en el caso de OC-192 alcanza los 10 Gbps. Son líneas con muy alta capacidad y, si tenemos en cuenta que teóricamente pueden unir cualquier punto de la Tierra (con infraestructura suficiente), pueden llegar a tener costes tan astronómicos que sólo ciertos consorcios de empresas se los pueden permitir. Por ejemplo, Internet 2 emplea, tanto en Estados Unidos como en Europa, líneas OC-192.

Las líneas dedicadas han constituido la solución más simple y habitual para interconectar dos redes distantes, hasta la generalización de Internet. Cada vez más aplicaciones eligen el uso de intranets o la Internet pública en detrimento de las líneas dedicadas, ya que ofrecen un ancho de banda medio elevado (ADSL ofrece enlaces de más de 4 Mbps). No obstante, su uso es todavía amplio en las aplicaciones de alta capacidad en las que el ancho de banda y la respuesta en el tiempo son factores críticos.

3. El nivel de enlace en las redes de transporte WAN

Estudiaremos a continuación las tecnologías de transporte WAN, como X.25, Frame relay, ATM y MPLS, íntimamente asociadas al nivel de enlace.

3.1. X.25

En 1974, el CCITT (hoy ITU-T), preocupado por la posibilidad de que los sistemas de red pública de datos en los diferentes estados europeos no fueran compatibles entre sí, propuso una norma internacional para protocolos de acceso a redes de comunicaciones en los niveles 1, 2 y 3 de la torre OSI. El estándar X.25 fue aprobado en el año 1976 por el CCITT y desde entonces ha experimentado varias modificaciones, fruto de los cambios tecnológicos que se han ido sucediendo. Constituye la primera red de conmutación de paquetes utilizada con asiduidad y de alcance mundial. Muchas redes públicas de ámbito estatal la utilizan como núcleo fundamental de su sistema de transmisión: TRANSPAC en Francia, PSS en Gran Bretaña, IBERPAC en España y DATANET en los Países Bajos. Hasta los años noventa, X.25 fue el estándar en redes públicas de paquetes en Europa.

Actualmente, X.25 es un dinosaurio, sobre todo a causa de la inercia provocada por la gran extensión que llegó a alcanzar, pero todavía se utiliza en bastantes ámbitos (por ejemplo, su uso es generalizado en el sector bancario y financiero en España, a través de la Red Uno de Telefónica).

X.25 especifica el funcionamiento de la interfaz ETD-ETCD, en la que el ETD⁴¹ es la estación privada del usuario y el ETCD⁴² el equipo módem del operador de telecomunicaciones.

⁽⁴¹⁾ETD es la sigla de *equipo terminal de datos*.

⁽⁴²⁾ETCD es la sigla de *equipo terminal de circuito de datos*.

X.25 fue el primer conjunto de protocolos que se organizó según el modelo ISO/OSI. El estándar especifica la funcionalidad de las tres capas inferiores del modelo OSI para conectar una estación con un nodo de acceso a la red:

- Nivel físico: regula los aspectos de interfaz mecánica, eléctrica, funcional y de procedimiento entre el ETD y el ETCD. X.25 utiliza las normas X.21 sobre comunicaciones digitales y X.21 bis para comunicaciones analógicas (recomendaciones V.24 y V.28). En varias ocasiones, también se utilizan otros, como el RS-232.
- Nivel de enlace: básicamente utiliza el protocolo LAP-B⁴³ (procedimiento de acceso a enlace balanceado), que es una versión del HDLC para acceso

⁽⁴³⁾LAP-B es la sigla de *link access procedure, balanced*.

⁽⁴⁴⁾ABM es la sigla de *asynchronous balanced mode*.

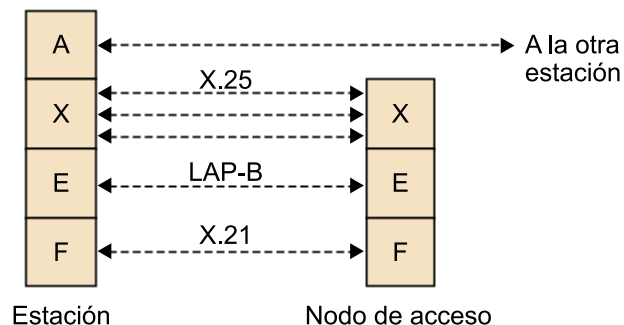
síncrono balanceado (ABM⁴⁴). Por lo tanto, se trata de un protocolo de nivel de enlace orientado al bit, dúplex y transparente.

- Nivel de red: este nivel indica **cómo** deben efectuarse las conexiones entre dos ETD a través de la red. X.25 es una red de conmutación de paquetes en modo circuito virtual y ofrece dos modos de establecer una comunicación con circuitos virtuales:
 - Circuito virtual conmutado: el funcionamiento del sistema es similar a una conexión telefónica usual en la que hay conexión, transmisión y desconexión. El nivel de red define cómo se efectúa el establecimiento y la liberación de esta comunicación.
 - Circuito virtual permanente: actúa como una línea alquilada de forma que en cualquier momento uno de los dos ETD puede enviar un mensaje sin necesidad de establecer una conexión, dado que ésta es permanente. Se utiliza en situaciones en las que la intensidad de tráfico de datos es muy elevada.

El nivel de red también regula el encaminamiento y direccionamiento, haciendo referencia a la norma X.121, que dispone un sistema de numeración de los ETD muy parecido al de la RTC.

La figura 19 muestra una conexión siguiendo el estándar X.25:

Figura 19. Diagrama de niveles de una conexión X.25



Cuando apareció X.25, las líneas de transmisión no eran muy fiables. Por ello, se optó por incluir tanto el nivel de enlace como el de red, control de errores y control de flujo. Esto la hace muy robusta pero, al mismo tiempo, tanta sobrecarga de gestión le limita la velocidad de transmisión máxima alcanzable, que es 64 kbps.

Hasta ahora se ha descrito el funcionamiento de un ETD X.25, también conocido como terminal de modo paquete. X.25 permite la posibilidad de que terminales sin CPU o que no funcionen a modo de paquete, denominados terminales a modo carácter, accedan a una red que utiliza la interfaz X.25. Para

que esto sea posible, se deben conectar a un equipo conocido como PAD (desensamblador ensamblador de paquetes), cuyas funciones básicas se podrían asimilar a las del terminal virtual del nivel aplicación.

El CCITT definió un DEP para teleimpresores que utilizaban el código n.º 5 del CCITT (equivalente al ASCII), cuyas funciones eran:

- Ensamblar y desensamblar paquetes de acuerdo con el formato X.25, por un lado, y con el del terminal, por otro.
- Intercambiar información de control de la red con el terminal.
- Efectuar el control lógico del terminal.

La normativa que regula el funcionamiento de estos DEP y de los terminales que a ellos pueden acceder se compone de las recomendaciones X.3, X.28 y X.29 (conocida como triple-X):

1) X.3: regula las características y el funcionamiento de los DEP.

2) X.28: se refiere a la interfaz entre el DEP y el terminal de modo carácter. Éste funciona en modo asíncrono y puede trabajar en modo dúplex. Los ETD pueden acceder a los DEP sobre línea punto a punto o utilizar acceso RTC. El alfabeto utilizado es el CCITT n.º 5 de 7 bits de datos y 1 de paridad, que es equivalente al USASCII. Los módem soportados corresponden a las normas V.21 y V.22 CCITT.

3) X.29: define cómo se conectan los DEP con los ETD en modo paquete, y con otros DEP, estableciendo el modo como se ha de efectuar el diálogo bidireccional entre todos.

Para usuarios que disponían de terminales de paquetes, pero que realizaban un número de transferencias de datos no muy elevado, y que no requerirían una conexión directa a las redes X.25, existía la posibilidad de hacerlo a través de la red telefónica. La norma que regula esta posibilidad es la X.32 del CCITT. X.32 permite utilizar módems que cumplan desde V.22 a V.32 y alcanzar velocidades de hasta 4800 bps en dúplex síncrono. La utilización normal que una empresa podría hacer de esta norma sería tener en su sede central acceso directo X.25 y efectuar conexiones X.32 desde sus delegaciones.

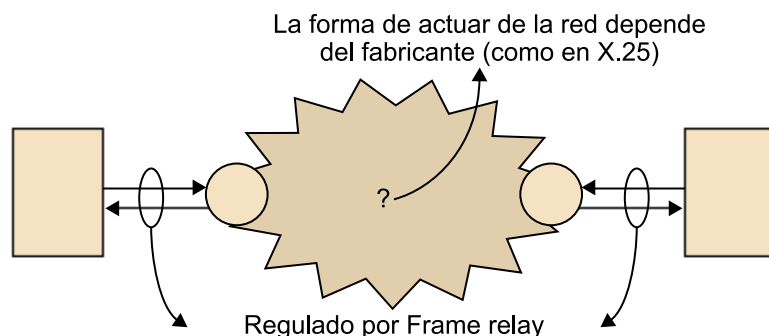
La norma X.75 define la arquitectura de los protocolos que pueden gobernar la conexión entre dos redes de paquetes X.25. Se trata de una pasarela doble para redes orientadas a conexión que se establece en la capa de red.

3.2. Frame relay

Frame relay (que significa retransmisión de tramas) es una técnica simplificada de conmutación de paquetes para el transporte de información de datos.

Frame relay representa la evolución de la red X.25. Al igual que su antecesor, Frame relay sólo regula la interfaz usuario-red. El funcionamiento interno de la red no está normalizado y depende de cada fabricante.

Figura 20



Frame relay confía en la utilización de medios digitales de alta velocidad y muy fiables (baja tasa de error). Por esa razón elimina funciones como el control de flujo y la corrección de errores de las capas de enlace y de red, dejando estas funcionalidades para los niveles superiores. Si Frame relay recibe una trama errónea, simplemente la descarta, confiando en que sea el protocolo de nivel superior de un equipo final quien pida la retransmisión de la trama. De este modo, Frame relay se ha convertido en el complemento perfecto del protocolo TCP/IP.

Debido a esta reducción de funcionalidades, todo el mundo considera que Frame relay no es un protocolo de nivel de red, sino de nivel de enlace. Puede alcanzar velocidades de hasta 2Mbps y más en ciertas condiciones (hasta 34/45 Mbit/s utilizando un servicio de multiplexación estadístico extremo a extremo).

Frame relay proporciona conexiones entre usuarios a través de una red pública de conmutación de paquetes, del mismo modo que lo haría una red privada con circuitos punto a punto, dado que se orienta a la conexión. Está a medio camino de una red de conmutación de paquetes como X.25 y una red de conmutación de circuitos como RDSI. Por ello, Frame relay se considera una red de conmutación de paquetes en modo circuito virtual.

La retransmisión de trama ofrece dos tipos de circuitos virtuales:

1) Circuitos virtuales conmutados (SVC⁴⁵): éstos sólo han sido definidos en el estándar propuesto por la ITU-T y no por el estándar de facto.

⁽⁴⁵⁾SVC es la sigla de *switched virtual circuit*.

2) Circuitos virtuales permanentes (PVC⁴⁶): están definidos en todos los estándares.

⁽⁴⁶⁾PVC es la sigla de *permanent virtual circuit*.

Los circuitos virtuales permanentes se diferencian de los primeros en que tienen el origen y el destino prefijados, asignados por el operador de la red, y, por lo tanto, no son necesarias las fases de establecimiento y liberación. El servicio que suelen ofrecer los operadoras de redes Frame relay sólo incluye PVC y se utiliza típicamente para dar servicios de comunicaciones dentro de una corporación.

La característica principal de las redes Frame relay es la alta disponibilidad de la que disponen. Por todo ello, muchas compañías lo usan para cursar tráfico telefónico, en el que lo más importante (más que la probabilidad de error) es tener una elevada disponibilidad. Aunque Frame relay no es un protocolo especialmente diseñado para soportar tráfico multimedia, audio y vídeo en tiempo real, sí que se utiliza para la transmisión de datos combinado con TCP/IP.

3.2.1. Arquitectura Frame relay

A diferencia de X.25, Frame relay realiza una separación física del plano de control y del plano de usuario. El **plano usuario** es la parte de la arquitectura de protocolo por la que circulan los datos del usuario y el **plano control** es la parte de la arquitectura de protocolo por la que circulan datos entre el usuario y la red para supervisar la red. La siguiente tabla representa la pila de protocolos de Frame relay:

	Plano usuario	Plano control (casi no se usa Frame relay sobre RDSI)	Plano gestión y señalización
Red		Q.933 de RDSI	2 protocolos: ILMI ⁴⁷ y CLLM ⁴⁸
Enlace	LAP-F	LAP-D de RDSI	
Físico	Línea de serie (interfaces físicas: V.35, G.703) RDSI (BRI, PRI)	Sobre el plano de usuario, excepto RDSI, en la que se utiliza canal D	

⁽⁴⁷⁾ILMI es la sigla de *interim local management interface*.

⁽⁴⁸⁾CLLM es la sigla de *consolidated link layer management*.

El protocolo CLLM se utiliza para enviar información de control de congestión en aquellos casos en los que no hay tramas en sentido contrario al congestionado (para informar al usuario de la congestión).

El ILMI se encarga de comprobar el estado del acceso físico. Frame relay no tiene temporizador, por lo que supervisa el estado del acceso físico para, mediante protocolo de señalización, informar de que se ha dañado o se han producido errores.

3.2.2. Estándares asociados

Frame relay es un estándar especificado por el CCITT (ahora ITU-T) y el ANSI en varias recomendaciones que definen las señales y la transmisión de datos al nivel de enlace (nivel 2 de OSI):

- Recomendación del CCITT I.122 que describe el servicio Frame relay, incluyendo SVC y PVC. Es similar a la ANSI T1.606. La multiplexión de circuitos se realiza a nivel 2, en lugar de a nivel 3, como sucede en el caso del protocolo X.25.
- Recomendación CCITT Q.922, equivalente a la ANSI T1.618, en la que se define el servicio Frame relay como el nivel 2 de RDSI.
- Recomendación del CCITT Q.933, equivalente a la ANSI T1.617, que define los procedimientos de señalización para el establecimiento de los SVC.
- Recomendación del CCITT I.433, que especifica la interfaz física, tanto para los PVC como los SVC.
- Recomendación del CCITT I.370, equivalente a la ANSI T1S1/90-175R4 (*addendum* de la T1.606). Describe los métodos opcionales para el control de la congestión y gestión dinámica del ancho de banda.

Además, existe el Frame relay Forum, creado en 1990 por varios fabricantes, con el objetivo de promover su utilización y editar especificaciones complementarias (algunas han sido incorporadas posteriormente por el CCITT).

3.2.3. Formato de trama

El formato de las tramas empleadas por Frame relay en el plano del usuario se basa en el LAP-D⁴⁹ especificado por el CCITT (Q.922) y ANSI (T1.618), similar al empleado en HDLC.

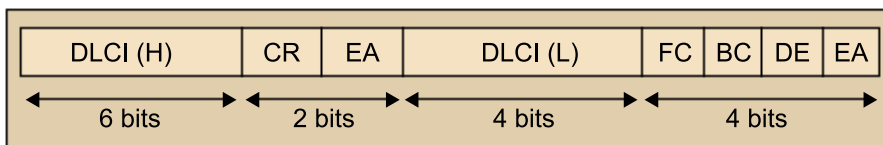
⁽⁴⁹⁾LAP-D es la sigla de *link access protocol-D*.

Figura 21

Indicador	Control	Datos	FCS	Indicador
1 octeto	2 octetos	Longitud variable	2 octetos	1 octeto

- **Flag:** tiene el mismo formato que en LAB-B (01111110). Se utiliza para sincronización de trama y para separar tramas consecutivas.
- **FCS o CRC:** código detector de errores de trama. Contiene el resultado de llevar a cabo un control de redundancia cíclica para comprobar que se ha transmitido sin errores. En el caso de que se detecte una trama errónea, no se pide su retransmisión al nodo del que procede, sino que la trama entera se descarta y son los protocolos de nivel superior en los DTE los encargados de detectar la pérdida y establecer los procedimientos de recuperación y retransmisión.
- **Datos:** es donde van encapsulados los datos del nivel superior. La longitud del campo de información es ajustable a un valor máximo (hasta 4096), dependiendo del servicio requerido y, normalmente, se elige de modo que la información propia de la aplicación (paquete TCP/IP, trama SDLC, paquete X.25, etc.) pueda transmitirse sin necesidad de ser troceada. En general, los operadores de redes Frame relay la sitúan alrededor de 1.600 bytes. Esta gran diferencia con X.25 (128 bytes) se debe a la escasa P_e .
- **Control:** puede tener varios formatos (como en X.25), pero normalmente suele tener 16 bits de longitud (2 bytes):

Figura 22



– **DLCI**⁽⁵⁰⁾: identificador de conexión de enlace de datos (10 bits). Permite definir hasta 1.024 circuitos virtuales. Con el DLCI se identifica al canal lógico al que pertenece cada trama. Los números de canal lógico se asignan por contratación.

⁽⁵⁰⁾DLCI es la sigla de *data link circuit identifier*.

– **EA**⁽⁵¹⁾: campo de extensión de dirección. Dado que se permiten más de dos bytes en el campo de control, este primer bit de cada byte indica (cuando está marcado con un 0) si detrás siguen más bytes o (cuando está marcado con un 1) si se trata del último del campo de control. Emplear más de dos bytes resulta bastante infrecuente y se utiliza en el caso de que la dirección de multiplexión (en el campo DLCI) supere los 10 bits.

⁽⁵¹⁾EA es la sigla de *extended address*.

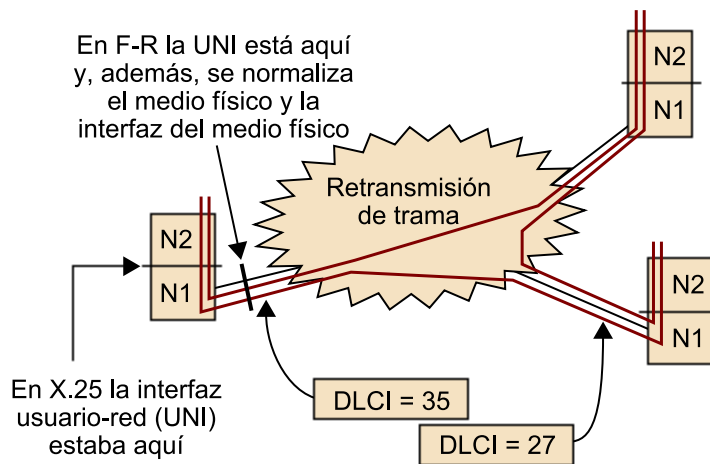
– **CR:** bit de comando/respuesta. Es parecido al bit “Q” de X.25 y, al igual que ocurría con éste, no es un bit utilizado por la red. Se introduce por compatibilidad con protocolos anteriores, como los del tipo HDLC. Cuando el protocolo de enlace es fiable, utilizan este bit.

– **FC, BC y DE:** bits para control de congestión.

3.2.4. Cómo trabaja Frame relay

Una red Frame relay está formada por nodos y terminales conectados a éstos. El terminal (DTE) envía tramas a la red, cada una con un código de identificación DLCI que indica el destino de ésta. Durante el proceso de llamada o al contratar el servicio al operador, todos los nodos en el camino hacia el destino final reservan un canal específico identificado con un DLCI, por el que las tramas con el mismo identificador deberán enviarse. Los nodos encaminan las tramas hacia su destino leyendo su código de identificación. Este tipo de conexión se conoce como enlace virtual permanente.

Figura 23

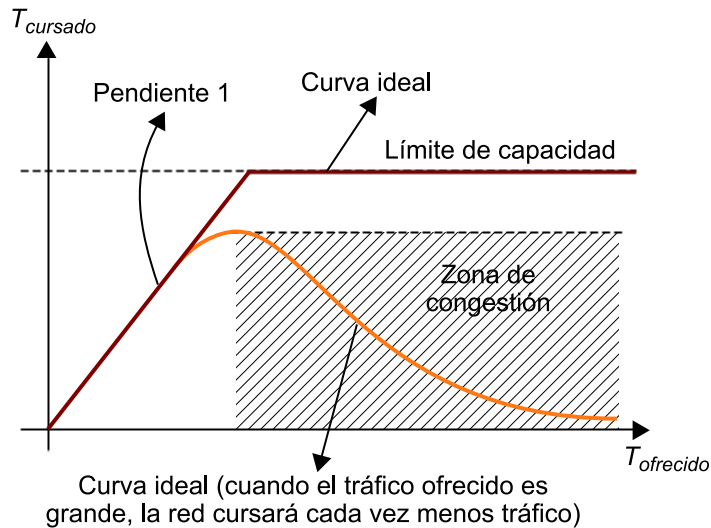


Vemos cómo, a diferencia de X.25, en Frame relay tendremos DLCI diferentes en el UNI para datos entrantes y salientes de la red. Además, cada circuito se trata de un CVP, y no de un CVC.

3.2.5. Control de congestión

El tráfico que puede cursar un nodo depende del tráfico que le llega y de su capacidad de conmutación. Cuando a un nodo le llegan datos que no puede cursar, los descarta y se quedan sin llegar a su destino (es cuando la curva cae).

Figura 24



Para evitar entrar en la zona de congestión, Frame relay utiliza el mecanismo de notificación y descarte, funcionalidad implementada en el nivel 2 del plano del usuario. En el caso de congestión, la red notifica al DTE del usuario que disminuya su tasa de tráfico inyectado. Si no lo hace, la red descartará mediante técnicas estadísticas los datos que considere oportunos.

La implementación de la técnica de notificación y descarte se realiza mediante los campos FECN, BECN y DE en el campo de control de la trama:

- **FECN**⁵²: notificación de congestión en el sentido de la transmisión.
- **BECN**⁵³: notificación de congestión en el sentido contrario a la transmisión.
- **DE**⁵⁴: Las tramas que tienen este bit a 1 son susceptibles de descarte en situaciones de congestión.

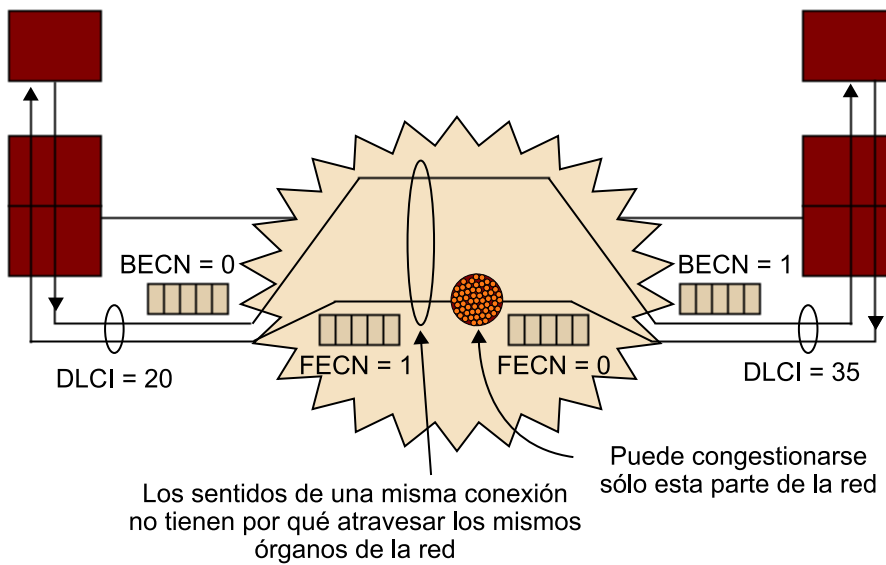
⁽⁵²⁾FECN es la sigla de *forward explicit congestion notification*.

⁽⁵³⁾BECN es la sigla de *backward explicit congestion notification*.

⁽⁵⁴⁾DE es la sigla de *discard eligibility*.

Figura 25

(representación de una sola conexión)



Cabe señalar que la congestión es unidireccional, pues puede haber caminos distintos para los dos sentidos de la transmisión y mientras uno puede estar sufriendo problemas de tráfico (congestión), el otro puede no tenerlos.

Los bits FECN y BECN se usan para avisar a los dos extremos de una conexión que hay congestión del siguiente modo: a una trama que atraviesa una zona congestionada se le pone su bit FECN a 1. La red identifica las tramas de esa conexión que circulan en sentido contrario y en ellas marca el bit BECN también a 1. La red Frame relay sólo notifica la congestión al origen y al destino. En el caso de que el nivel superior del origen no reduzca la tasa, Frame relay procederá a descartar tramas.

3.2.6. QoS

Frame relay permite contratar una cierta calidad de servicio o ancho de banda asegurado para cada circuito virtual. Dicha calidad está definida mediante ciertos parámetros:

- **CIR⁵⁵** (bits/s): es la tasa de información comprometida, es decir, el caudal medio garantizado que la red se compromete a dar en una conexión durante un intervalo de tiempo definido (T_c). Es un parámetro asociado a cada sentido de la transmisión de cada circuito virtual y puede hacerse asimétrica, es decir, dar un valor distinto del CIR para cada sentido.
- **EIR⁵⁶**: margen de tolerancia que se dará al usuario, es decir, cuánto se le va a permitir exceder el CIR contratado puntualmente y siempre que no haya congestión en la red.

⁽⁵⁵⁾CIR es la sigla de *committed information rate*.

⁽⁵⁶⁾EIR es la sigla de *excess information rate*.

- T_c^{57} : intervalo de observación. Parámetro del algoritmo para calcular el *CIR*.
- B_c^{58} : volumen de información comprometida por la compañía durante el intervalo T_c :

⁽⁵⁷⁾ T_c denota *committed rate measurement interval*.

⁽⁵⁸⁾ B_c denota *committed burst size*.

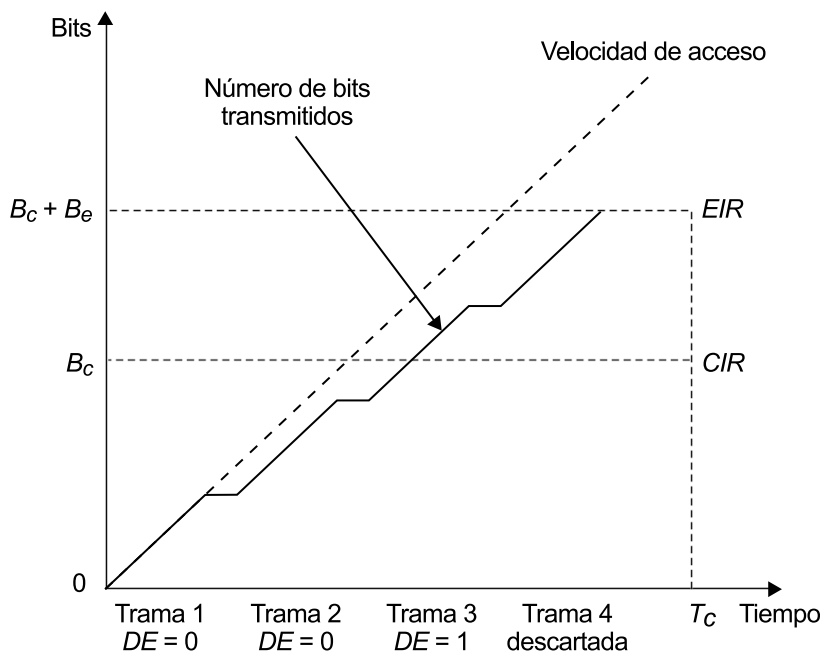
$$B_c = CIR \cdot T_c$$

- B_e^{59} : volumen de información en exceso:

⁽⁵⁹⁾ B_e denota *excess burst size*.

$$B_e = EIR \cdot T_c$$

Figura 26



B_c	Tamaño de ráfaga comprometida	EIR	Tasa de información en exceso
B_e	Tamaño de ráfaga en exceso	T_c	Intervalo de medida de tasa comprometido
CIR	Tasa de información comprometida		

Si la información cursada durante el intervalo T_c

- no sobrepasa B_c , está garantizada su transmisión.
- está entre B_c y $B_c + B_e$, no se sabe si llegará o no a su destino (la compañía no lo garantiza). Existe un bit en la trama (bit DE) que es activado por la red en tramas que superen B_c (es decir, aquellas que pertenezcan a B_e) para indicar que esas tramas deberían ser descartadas en preferencia a otras, si es necesario.
- excede de $B_c + B_e$, seguro que no llegará.

En la interfaz usuario-red se controla, para cada circuito virtual, que los usuarios se ajusten a los parámetros B_c y B_e que han negociado. Si la red está bien diseñada, no debe perder datos que no superen el tráfico comprometido.

Ejercicios

1. Manteniendo el CIR, ¿qué le conviene más a un abonado, un T_c grande o pequeño?

Solución ejercicio 1

Si el T_c se toma grande, existe la posibilidad de transmitir grandes picos de información en algunos momentos y nada de información en otros. Por tanto, un T_c pequeño nos garantiza el que la transmisión sea más homogénea (esto interesa a la empresa, ya que así se evita sobredimensionar las redes).

2. ¿Por qué se notifica al destino la congestión?

Solución ejercicio 2

Para que sea consciente de que se pueden estar perdiendo tramas que tienen marcado el bit *DE* a 1 y porque algunos protocolos de niveles superiores tienen capacidad de control de flujo extremo a extremo y pueden tomar medidas al respecto.

3.3. ISDN de banda ancha y ATM

3.3.1. Orígenes de la RDSI de banda ancha

A mediados de la década de los ochenta, el CCITT (hoy ITU-T) empieza a trabajar en una segunda generación de la RDSI, conocida como RDSI de banda ancha (RDSI-BA). En aquella época había predominantemente dos tipos de redes:

- 1) Las redes telefónicas, utilizadas principalmente para llevar voz en tiempo real, basadas en redes de conmutación de circuitos y que en la inmensa mayoría de los casos eran analógicas.
- 2) Las redes de datos, que se utilizaban fundamentalmente para transferir archivos de texto, soportar *login* remoto y proporcionar correo electrónico. Por ejemplo, podemos destacar la red X.25, basada en conmutación de paquetes.

También habían redes privadas dedicadas disponibles para videoconferencia y aunque ya existía Internet en esa época, todavía no se había generalizado su uso (aún no se había oído hablar de la World Wide Web).

Por lo tanto, era lógico que los operadores de telecomunicaciones quisieran diseñar una nueva red para reemplazar el antiguo sistema de telefonía y las redes especializadas de datos (X.25) por una sola red integrada que ofreciera

nuevas capacidades de servicio: vídeo por demanda, televisión, correo electrónico multimedia, música en calidad CD, interconexión de LAN, línea telefónica de voz y otras aplicaciones para la industria y la ciencia.

En 1988, el CCITT propuso la recomendación I.121 para utilizar ATM como la tecnología de base para liderar el proyecto de la gran red de redes para el transporte digital de datos. Dos comités de estándares, el ATM fórum y la ITU, desarrollaron estándares para redes de servicios digitales de banda ancha basados en ATM.

3.3.2. ATM

ATM se fundamenta en 3 principios:

- 1) Conmutación de paquetes de un tamaño reducido y fijo, denominados celdas.
- 2) Tecnología basada en circuitos virtuales.
- 3) Utilización de altas velocidades de transmisión.

El problema clásico que encontramos en la conmutación de paquetes es la imposibilidad de poder garantizar un cierto grado de calidad de servicio a un usuario, al no tener reservado en exclusiva un camino desde el origen hasta el destino. La conmutación de celdas en modo circuito virtual a altas velocidades permite simular las condiciones de una conmutación de circuitos y, por lo tanto, poder ofrecer servicios con una cierta calidad de servicio.

ATM está orientado a la conexión, como una red de conmutación de circuitos. En el momento de iniciar la comunicación hacia un destino, debe establecer el camino virtual que seguirán todas las celdas desde el origen hasta el destino. Este camino no cambia durante toda la comunicación; por lo tanto, si cae un nodo la comunicación se pierde. Todos los encaminadores intermedios (o conmutadores) a lo largo del camino introducen entradas en sus tablas para encaminar cualquier paquete del circuito virtual, y también reservarán los recursos necesarios para garantizar durante toda la sesión la calidad del servicio al usuario. Por esta razón, ATM garantiza el orden de llegada de las celdas, pero no garantiza la recepción de una celda, ya que la puede descartar si no es correcto.

ATM utiliza paquetes de un tamaño fijo y reducido, denominados **celdas**. Cada celda tiene un tamaño de 53 bytes, de los que 5 bytes son de cabecera y los restantes 48 bytes de datos útiles (*payload*). La utilización de este tipo de celdas supone las siguientes ventajas:

- Facilita la conmutación de alta velocidad.

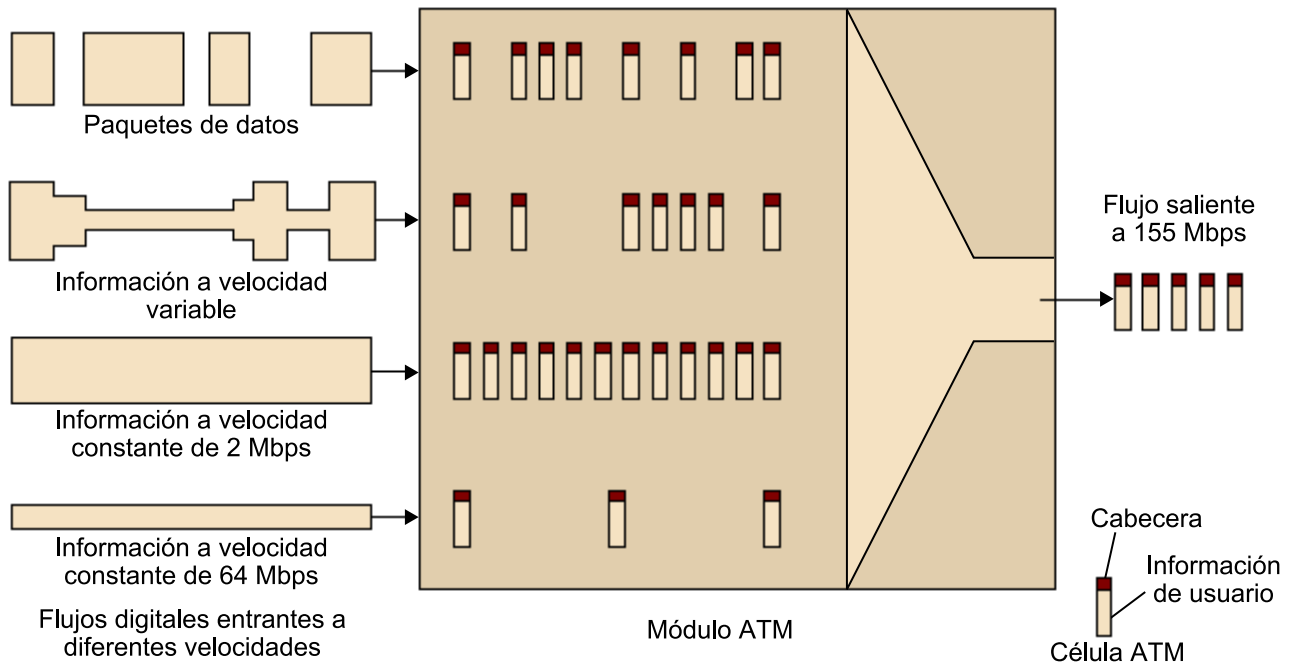
- Simplifica el hardware en los conmutadores y el procesamiento necesario en cada nodo. Reduce el tamaño de las memorias intermedias internas de los conmutadores y permite una gestión de las memorias intermedias más rápida y eficiente.
- Reduce el retraso de procesamiento, ya que pueden ser procesadas rápidamente y además permiten realizar esta operación por hardware.
- Disminuye la variabilidad del retraso al tener todas las celdas la misma medida, lo que resulta esencial para aquellos servicios sensibles a la cuestión temporal, como son los de voz o vídeo.

Otras características de ATM son:

- El estándar ATM define un conjunto total de protocolos de comunicación, desde una API del nivel de aplicación hasta el final abajo a través de la capa física.
- ATM es asíncrona y no requiere la existencia de una señal de reloj compartido entre emisor y receptor, lo que permite distancias de los enlaces muy grandes.
- ATM puede funcionar sobre cualquier capa física. A menudo, funciona sobre fibra óptica, utilizando el estándar SONET a velocidades entre 155,52 Mbps y 622 Mbps, e incluso más elevadas (del orden del gigabit). Se eligió la velocidad de 155 Mbps porque es lo que se necesita para la televisión de alta definición y para que sea compatible con el sistema de transmisión SONET. La velocidad de 622 Mbps se eligió para que 4 canales de 155 Mbps se puedan transmitir simplemente en uno.
- ATM es un sistema flexible, diseñado para soportar una amplia variedad de tipo de tráfico: de tasa constante de bits (CBR), de tasa variable de bits (VBR), de tasa disponible de bits (ABR) y de tasa no especificada de bits (UBR).
- Permite convertir cualquier tipo de tráfico en celdas de 53 bytes y transportarlo sobre una columna vertebral⁶⁰ o WAN. Permite multiplexar las conexiones de diferentes flujos de datos sobre la misma interfaz física debido a las altas velocidades a las que funcionan los equipos ATM.

⁽⁶⁰⁾En inglés, *backbone*.

Figura 27



En la figura se observa cómo diferentes flujos de información, de características distintas, son agrupados en el módulo ATM para ser transportados mediante grandes enlaces de transmisión a velocidades de 155 o 622 Mbit/s

- ATM no proporciona retransmisiones en términos de enlace a enlace. Si un conmutador⁶¹ detecta un error en una cabecera de celda ATM, intenta corregir el error utilizando códigos correctores de errores. Si no puede corregir el error, desecha la celda, en lugar de solicitar una nueva retransmisión desde el conmutador precedente.
- ATM sólo proporciona control de congestión para un determinado tipo de tráfico (ABR). Los conmutadores ATM proporcionan realimentación al terminal emisor para ayudar a regular su tasa de transmisión en los momentos de congestión de la red.

⁽⁶¹⁾En inglés, *switch*.

3.3.3. Formato de las celdas ATM

Son estructuras de datos de 53 bytes compuestas por dos campos principales:

- 1) **Header.** Sus 5 bytes tienen tres funciones principales: identificación del canal, información para la detección de errores y si la célula es o no utilizada. Eventualmente, puede contener también corrección de errores y un número de secuencia.
- 2) **Payload** tiene 48 bytes, fundamentalmente con datos del usuario y protocolos AAL que también son considerados como datos del usuario.

Dos de los conceptos más significativos del ATM, canales virtuales y rutas virtuales, están materializados en dos identificadores en el *header* de cada célula (VCI y VPI), y ambos determinan el enrutamiento entre nodos. El estándar define el protocolo orientado a conexión que las transmite y dos tipos de formato de celda:

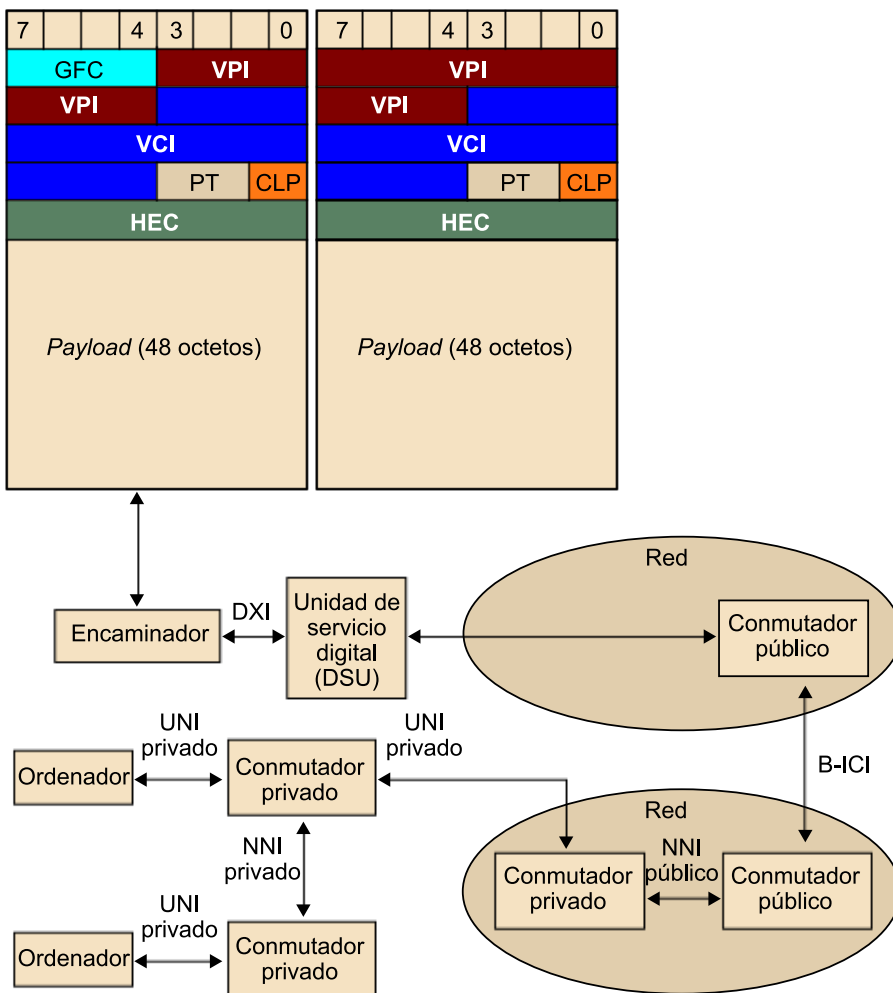
- NNI⁶² (interfaz red a red), que se refiere a la conexión de conmutadores ATM en redes privadas.
- UNI⁶³ (interfaz usuario a red), que se refiere a la conexión de un conmutador ATM de una empresa pública o privada a un terminal ATM de un usuario normal, siendo este último es el más utilizado.

⁽⁶²⁾NNI es la sigla de *network to network interface*.

⁽⁶³⁾UNI es la sigla de *user to network interface*.

Figura 28

Diagrama de una celda UNI Diagrama de una celda NNI



- GFC⁶⁴ (4 bits): originariamente el estándar reservó el campo GFC para labores de gestión de tráfico, pero en la práctica no es utilizado. Las celdas NNI lo emplean para extender el campo VPI a 12 bits.

⁽⁶⁴⁾GFC es la sigla de *generic flow control*.

- VPI⁶⁵ (8 bits) y VCI⁶⁶ (identificador de circuito virtual, 16 bits): se utilizan para indicar la ruta de destino o final de la célula.
- PT⁶⁷ (3 bits): identifica el tipo de carga útil que contiene la celda (de datos del usuario o de control). Existen varios tipos de carga útil de datos, varios de mantenimiento (indica si hay congestión en la red) y un tipo de carga útil de celda vacía.
- CLP⁶⁸ (1 bit): indica el nivel de prioridad de la celda; si este bit está activo cuando la red ATM está congestionada, la celda puede ser descartada.
- HEC⁶⁹ (8 bits): contiene un código de detección de error que sólo cubre la cabecera (no la información de usuario) y que permite detectar un buen número de errores múltiples y corregir errores simples.

⁽⁶⁵⁾VPI es la sigla de *virtual path identifier*.

⁽⁶⁶⁾VCI es la sigla de *virtual channel identifier*.

⁽⁶⁷⁾PT es la sigla de *payload type*.

⁽⁶⁸⁾CLP es la sigla de *cell loss priority*.

⁽⁶⁹⁾HEC es la sigla de *header error correction*.

3.3.4. Conexiones virtuales ATM

Las conexiones lógicas ATM están relacionadas con las conexiones de los canales virtuales (VCC), que indican el camino fijo que debe seguir la celda. La conexión entre dos sistemas finales se puede realizar mediante:

- Caminos de transmisión (TP⁷⁰): conexión física entre un sistema final y un conmutador, o entre dos conmutadores.
- Camino virtual (VP⁷¹): conjunto de una o más conexiones entre dos conmutadores. El campo VPI de la celda ATM identifica un camino virtual.
- Circuito virtual (VC⁷²): todas las celdas que pertenecen al mismo mensaje viajan por el mismo circuito virtual y mantienen su orden original hasta llegar al destino. El campo VCI de la celda ATM identifica un canal virtual.

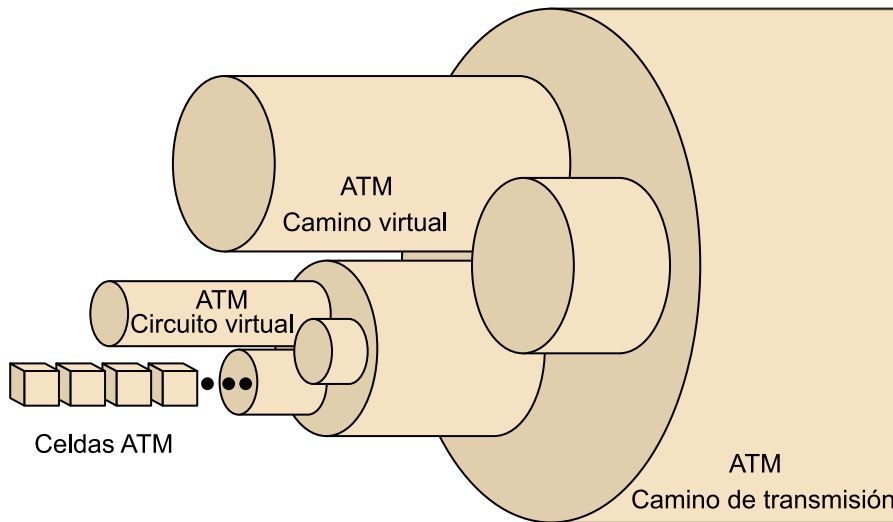
⁽⁷⁰⁾TP es la sigla de *transmission path*.

⁽⁷¹⁾VP es la sigla de *virtual path*.

⁽⁷²⁾VC es la sigla de *virtual channel*.

Varios circuitos virtuales forman un camino virtual. Y la concatenación de varios caminos virtuales forman un canal físico de transmisión.

Figura 29. Conexiones virtuales



Dos tipos de conexiones se ofrecen en ATM:

1) Los circuitos conmutados virtuales, como son las llamadas telefónicas de voz (se establecen dinámicamente).

2) Los circuitos virtuales permanentes, que son solicitados manualmente por el usuario final (por ejemplo, para enviar un fax). Pueden estar guardados dentro de las tablas de encaminamiento durante mucho tiempo (meses o años). La ventaja sobre la conmutación virtual de circuitos es que no es necesario ningún tipo de tiempo para establecer el circuito, los paquetes se mueven instantáneamente. Los troncales ATM en Internet utilizan, a menudo, circuitos virtuales permanentes, lo que evita la necesidad de establecimiento o destrucción de VC dinámicos.

3.3.5. Funcionamiento de ATM

Emisor

Antes de que una fuente pueda comenzar a enviar celdas a un destino, la red ATM debe establecer un canal o circuito virtual (VC) desde la fuente al destino. Cada VC es un recorrido que consta de una secuencia de enlaces entre la fuente y el destino. En cada uno de los enlaces, el VC tiene un identificador de circuito virtual (VCI). Cuando se establece o se destruye un VC, se deben actualizar las tablas de traducción de VC.

En el terminal transmisor, la información es escrita byte a byte en el campo de información de usuario de la celda y, a continuación, se le añade la cabecera. Cada celda incluye en su cabecera un campo para el número de circuito virtual, VCI, que es utilizado para encaminar la celda hacia su destino.

Conmutación

El componente principal de una red ATM es el conmutador, diseñado para transmitir información a muy alta velocidad. El conmutador enruta individualmente cada celda ATM basándose en el camino virtual (VPI) y en el circuito virtual (VCI) de su cabecera. Cuando una celda llega a un encaminador, éste le cambia el encabezado según la tabla que posee y lo envía al siguiente enlace con un VPI y/o un VCI nuevo.

Receptor

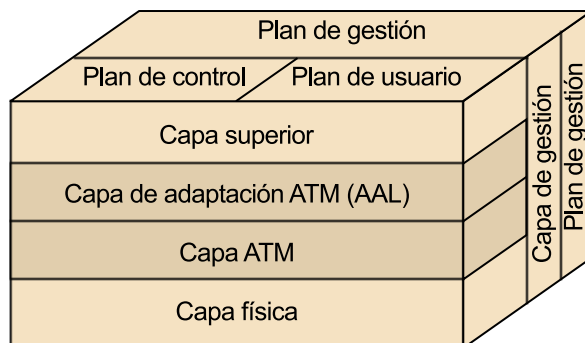
En el extremo distante, el receptor extrae la información, también byte a byte, de las celdas entrantes y, de acuerdo con la información de cabecera, la envía donde ésta le indique, pudiendo ser un equipo terminal u otro módulo ATM para ser encaminada a otro destino.

3.3.6. Modelo de la torre ATM

Utilizando ATM, el modelo *Broadband* ISDN tiene su propio modelo de referencia, diferente del modelo OSI y del modelo TPC/IP. La pila de protocolos de ATM consta de tres capas:

- 1) La capa física, que se encarga de los aspectos como voltaje, sincronización de bit, etc.
- 2) La capa ATM, que define la estructura de la celda ATM, el campo de *payload*, la cabecera y los significados de los campos de esta última. También gestiona el establecimiento y la liberación de los circuitos virtuales. El control de la congestión también está situado en esta capa.
- 3) La capa de adaptación ATM (AAL), que permite que las aplicaciones puedan enviar paquetes de tamaño muy superior al de una celda. Esta capa segmenta los paquetes, los transmite en celdas individualmente y los ensambla en la otra parte del enlace. ATM incluye 7 tipos diferentes de AAL para soportar diferentes tipos de servicios.

Figura 30. El modelo ATM



El modelo ATM no es bidimensional, sino tridimensional.

- El plano de usuario habla del transporte de la información, el control de flujo, la corrección de errores y otras funciones de usuario.
- El plano de control está relacionado con la gestión de la conexión y de los recursos. Estos dos planos tienen sus funciones coordinadas.
- El plano de gestión es utilizado por la operadora para comprobar el nivel de servicio ofrecido.

3.3.7. Niveles de la torre ATM

La capa física y la capa AAL están divididas a su vez en dos subcapas. La capa física tiene dos subcapas: la subcapa dependiente del medio físico (PMD) y la subcapa de convergencia de transporte (TC). La capa AAL se divide en las subcapas SAR⁷³ y CS⁷⁴. Las funciones son las siguientes:

⁽⁷³⁾SAR es la sigla de *segmentation and reassembly*.

⁽⁷⁴⁾CS es la sigla de *convergence sublayer*.

OSI capa	ATM capa	ATM capa	Funcionalidad
Transporte	AAL	CS	Proporciona una interfaz estándar (convergencia).
		SAR	Segmentación y reensamblaje.
Red	ATM		Control de flujo. Generación de la cabecera de la celda/extracción. Gestión del camino virtual. Multiplexación de celda/demultiplexación.
Enlace	Física ATM	TC	Generación y verificación del CRC de la cabecera. Generación de la celda. Empaquetado/dempaquetado de celdas. Inserción de celdas vacías. Alineación de celdas. Adaptación de marcos a la transmisión.
Físico		PMD	Interfaz con el medio físico: acceso físico a la red. Voltajes y temporizaciones de bits (sincronismo de bit). Estructura de las tramas.

3.3.8. Subcapa PMD

La subcapa PMD⁷⁵ hace de interfaz con el medio físico de transmisión, del que depende. Es responsable de generar y delinear los bits, así como de reconocer la estructura de una celda. Existen especificaciones de subcapa PMD para diferentes medios físicos:

⁽⁷⁵⁾PMD es la sigla de *physical medium dependent*.

- SONET/SDH (red óptica síncrona/jerarquía digital síncrona) sobre fibra óptica monomodo. Existen varias tasas estandarizadas, como: OC-1: 51,84 Mbps, OC-3: 155.52 Mbps y OC-12: 622.08 Mbps.
- T1 y T3, sistemas de transmisión sobre fibra óptica, microondas y cobre.

3.3.9. Subcapa de convergencia de transmisión (TC)

La subcapa TC también depende del medio físico utilizado por la subcapa PMD.

En emisión:

- Acepta celdas del nivel ATM y las transforma en una secuencia de bits para su transmisión sobre el medio físico.
- Genera el byte HEC, de control de errores de la cabecera de la celda, para cada celda ATM que se transmite. El HEC se calcula sobre los primeros 32 bits de la cabecera de la celda utilizando un polinomio generador de 8 bits:

$$G(x) = x^8 + x^2 + x + 1$$

- Asegura la sincronización en medios de transmisión síncronos, transmitiendo celdas de relleno no útiles, en el caso de no haber celdas útiles preparadas.
- Envía celdas OAM⁷⁶, utilizadas por los conmutadores ATM para intercambiar información de control sobre la red, como el grado de congestión.

⁽⁷⁶⁾OAM es la sigla de *operation and maintenance*.

En recepción, la subcapa TC debe tomar el flujo de bits entrante de la subcapa PMD, localizar el principio y final de cada celda, verificar el HEC para descartar las celdas incorrectas, procesar las celdas OAM y las celdas inútiles y pasar a la capa ATM las celdas de datos.

Ejercicio

3. ¿Cómo detecta ATM el principio y final de cada celda?

Solución ejercicio 3

La detección del principio y final de cada celda se realiza por mecanismos completamente diferentes a los utilizados en HDLC. No existe ninguna secuencia de bits característica del principio y final de cada celda, como el indicador de HDLC, pero sí se sabe que cada celda ocupa exactamente $53 \times 8 = 424$ bits, por lo que una vez localizado el principio de una será fácil encontrar las siguientes.

La clave para encontrar la primera celda está en el HEC: en recepción, la subcapa TC captura 40 bits de la secuencia de entrada (el tamaño de una cabecera) y parte de la hipótesis de que sea el principio de una celda válido; si lo es, el cálculo del HEC será correcto, si no, desplaza la secuencia un bit y repite el cálculo. En el peor de los casos, el TC deberá repetir el proceso 424 veces hasta localizar, finalmente, el principio de una celda. Ahora bien, a partir de la primera y, mientras se mantenga el sincronismo, le será fácil localizar todas las que lo siguen.

No obstante, como la probabilidad de encontrar un CRC de 8 bits válido en una secuencia aleatoria de bits es sólo $1/256$, se repite la prueba con n celdas siguientes y si el resultado continúa siendo correcto, se decide que se ha encontrado la sincronización.

3.3.10. Capa ATM

La capa ATM define la estructura de las celdas ATM, incluyendo su generación y su transporte. Se encarga de encaminar las celdas ATM mediante los diferentes conmutadores, basándose en los identificadores de circuito virtual. Otras funciones de la capa ATM son:

- Transmisión/conmutación/recepción de las celdas.
- Control de congestiones/gestión de memorias intermedias⁷⁷.
- Generación/eliminación de las cabeceras de las celdas en fuente/destino.
- Traducción de las direcciones de las celdas.

⁽⁷⁷⁾En inglés, *buffers*.

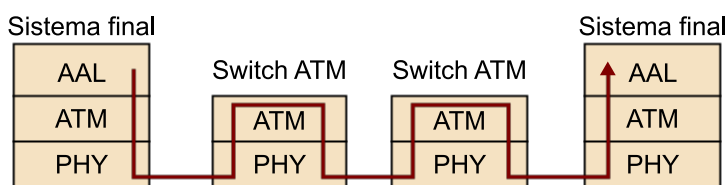
3.3.11. Capa AAL

La capa AAL permite la adaptación de diferentes tipos de tráfico a la estructura de celdas ATM. Descompone los mensajes de las capas superiores en celdas ATM y en recepción reensamblan el mensaje. La ITU y el Forum ATM han estandarizado varias AAL, entre las que podemos destacar:

- AAL 1: para servicios de tasa de bits constante (CBR) y emulación de circuitos.
- AAL 2: para servicios de tasa de bits variable (VBR).
- AAL 5: para datos (por ejemplo, datagramas IP).

La capa AAL se implementa únicamente en los extremos de una red ATM.

Figura 31

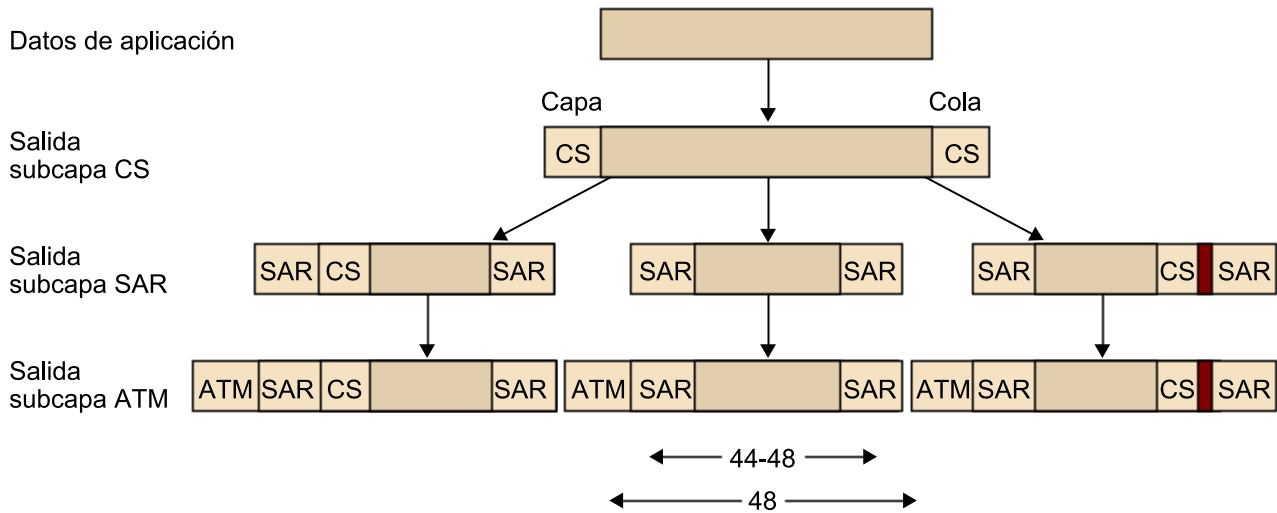


AAL tiene dos subcapas: la subcapa de convergencia (CS) y la subcapa de segmentación y reensamblado (SAR).

En la subcapa de convergencia se reciben los datos de las capas más altas (por ejemplo, un datagrama IP) y se encapsulan en una trama CS, con una cabecera y una cola.

Típicamente, la trama CS es demasiado grande para caber en la parte de datos de una celda ATM; por tanto, debe ser segmentada en la fuente y ensamblada en el destino. La subcapa SAR segmenta la trama CS y le añade los bits de la cabecera y de la cola SAR para formar la parte de datos de las celdas ATM. Dependiendo de los tipos de AAL, las cabeceras y las colas de SAR y CS pueden estar vacías.

Figura 32

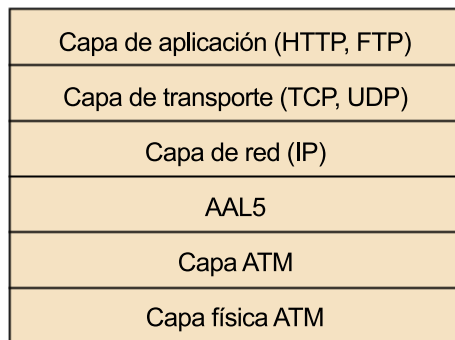


3.3.12. IP sobre ATM

En la actualidad, ATM se utiliza muy comúnmente como tecnología de la capa de enlace en redes troncales de Internet. Se ha desarrollado un tipo especial de AAL, AAL5, para permitir que TCP/IP interconecte con ATM. En emisión, la capa AAL5 prepara los datagramas IP para el transporte sobre redes ATM y, en recepción, reensambla las celdas ATM en diagramas IP.

La figura 33 muestra la pila de protocolos de Internet sobre ATM:

Figura 33

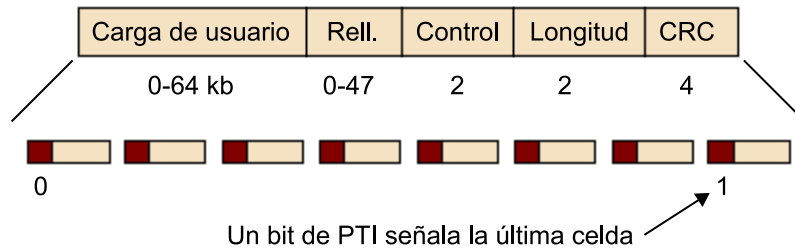


Las tres tapas de ATM han sido comprimidas en las dos capas más bajas de la pila de protocolos de Internet. La capa de red de Internet ve ATM como un protocolo de la capa de enlace.

3.3.13. Trama AAL5

En AAL5, la subcapa SAR no añade nada; por tanto, los 48 bytes de la parte de datos de ATM se utilizan para transportar enteramente datos de la trama CS, que tiene la siguiente estructura:

Figura 34. Trama de la subcapa de convergencia (CS)



Un datagrama IP ocupa la parte de datos de la trama CS (de 1 a 65.535 bytes). El campo de relleno garantiza que la trama CS sea un entero múltiplo de 48 bytes. El campo longitud identifica el tamaño de la parte de datos de CS, por lo que el relleno se puede eliminar en el receptor. El CRC es el mismo que el utilizado en Ethernet, CRC-32, que protege la carga y la cola (excepto el propio CRC).

En el emisor ATM, la subcapa SAR de AAL5 divide la trama CS en segmentos de 48 bytes para conformar así celdas ATM. Un bit en el campo PT de la cabecera de la celda ATM, que normalmente está a 0, se coloca a 1 para la última celda de la trama CS.

En el destino ATM, la capa dirige las celdas con un VCI específico a un búfer de la subcapa SAR. Las cabeceras de celda ATM son eliminadas y se utiliza el bit que indica AAL para delimitar las tramas CS. Una vez que la trama CS está delimitada, se pasa a la subcapa de convergencia de la AAL. Allí se utiliza el campo longitud para extraer la parte de datos de CS (por ejemplo, un datagrama IP), que se pasa a la capa más alta.

3.3.14. Presente y futuro de ATM

En los años noventa la tecnología ATM fue desplegada muy agresivamente en enlaces de gran capacidad y distancia de los operadores de telecomunicaciones, para líneas telefónicas, televisión por cable y distribución de vídeo por cable. Se creó un gran número de tecnologías ATM de prestaciones elevadas, como los conmutadores ATM, que pueden conmutar a velocidades de terabits por segundo.

Pero la batalla de ATM por ser la gran red de redes digital se empezó a perder en el mercado de las redes de área local. La implantación de la ATM LAN no tuvo el éxito esperado, debido a:

- la flexibilidad de Ethernet, en la que *gigabit Ethernet*, y más tarde *10 gigabit Ethernet*, la desbancaron en entornos LAN y MAN, al incorporar conceptos como calidad de servicio, control de flujo, dúplex, etc., que hasta entonces sólo soportaba ATM, y todo ello con un coste comparativamente muy inferior.

- la eclosión de los protocolos de Internet TCP/IP. Miles de empresas desarrollaron nuevas aplicaciones y servicios para Internet.

Aunque ATM no ha llegado a mantenerse como una solución computador a computador, ha encontrado un nicho en el nivel de enlace de las redes troncales de Internet que se conoce como IP sobre ATM.

En la actualidad también se emplea habitualmente en el bucle de abonado para dar soporte a ADSL y puede tener algo que decir en el desarrollo de las redes metropolitanas inalámbricas. No obstante, la tecnología emergente MPLS está empezando a sustituir ATM en entornos WAN.

3.4. MPLS

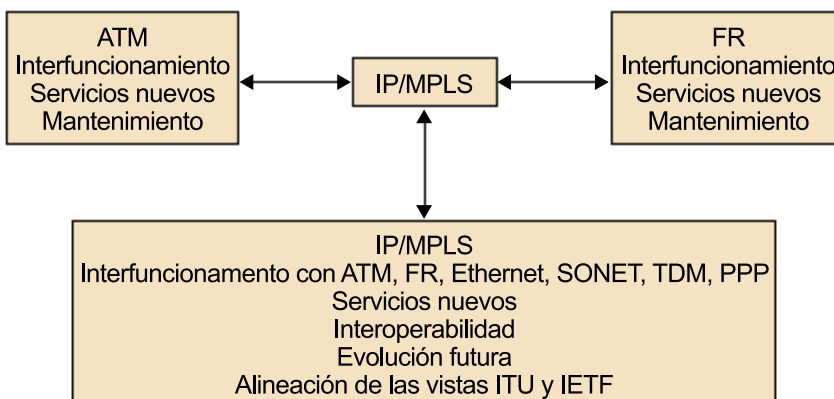
La tecnología emergente MPLS⁷⁸ (conmutación de etiquetas multiprotocolo) ha resultado ser un duro competidor de ATM para su uso en el mercado de integración de redes.

⁽⁷⁸⁾MPLS es la sigla de *multiprotocol label switching*.

MPLS emplea una filosofía de integración entre conmutación de circuitos y conmutación de paquetes y está diseñado atendiendo mejor al actual estado de la técnica que ATM, por lo que presenta ventajas evidentes frente a éste. MPLS es un mecanismo de transporte de datos capaz de emular el funcionamiento de las redes de conmutación de circuitos, como ATM sobre redes de conmutación de paquetes. Recordemos que la orientación a conexión implica conmutación de circuitos, aunque éstos sean virtuales.

Es un protocolo ubicado entre los niveles OSI 2 y 3 que permite enviar muchas clases de tráfico, tales como paquetes IP, ATM, SONET, tramas Frame relay y tramas Ethernet. MPLS parte del hecho de que con velocidades de 10 Gb/s, incluso tramas de 1.500 bytes, como las de Ethernet, sufren un retraso de transmisión insignificante, por lo que se hace innecesario el uso de las pequeñas celdas ATM y se evita el esfuerzo y el tiempo necesario para el proceso de fragmentación y reensamblado.

Figura 35



En el mercado de transporte de datos, MPLS no es un competidor de ATM y de hecho puede funcionar sobre ATM o sobre otro tipo de tecnologías de transporte. Muchas operadoras de comunicaciones se han dado mucha prisa en anunciar que soportan MPLS sobre sus redes ATM con el fin de no perder el tren del mercado.

Web de interés

El anterior ATM Forum ha sido directamente sustituido por el MFA Forum, acrónimo que significa MPLS, Frame relay y ATM.

4. La capa física

4.1. Bases teóricas para la comunicación de datos

La información binaria se puede transmitir por medios de transmisión, como los cables o la fibra óptica, a través de las variaciones de alguna propiedad física, habitualmente, el voltaje o la intensidad (cables), o la intensidad de luz (fibra óptica). Podemos representar el valor de esta magnitud física como una función $g(t)$ dependiente del tiempo.

4.1.1. Análisis de Fourier

Jean-Baptiste Fourier fue un matemático que describió la descomposición de una función $g(t)$ periódica en lo que se denomina una serie de Fourier. Una función periódica $g(t)$, con período T , es aquella que cumple la propiedad de $g(t) = g(t + T)$, y se puede construir a partir de una suma (posiblemente infinita) de seno y coseno:

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{sen}(2\pi n f t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \text{cos}(2\pi n f t)$$

donde la variable $f = 1/T$ se define como la frecuencia fundamental, y los valores de a_n y b_n , que son las amplitudes de los senos y de los cosenos de la serie, se denominan armónicos n -ésimos.

El valores de a_n , b_n y c se calculan de la siguiente manera a partir de la señal original $g(t)$:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int g(t) \cdot \text{sen}(2\pi n f t) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int g(t) \cdot \text{cos}(2\pi n f t) dt \\ c &= \frac{2}{T} \int g(t) dt \end{aligned}$$

Si una señal tiene una duración finita T (y, por lo tanto, no es periódica), se puede ajustar al modelo de series de Fourier, suponiendo que se va repitiendo $g(t)$ en intervalos de longitud T : en los intervalos $[0, T]$, $[T, 2T]$, $[2T, 3T]$, ... , para después aplicar las fórmulas anteriores.

4.1.2. Señales de ancho de banda limitado

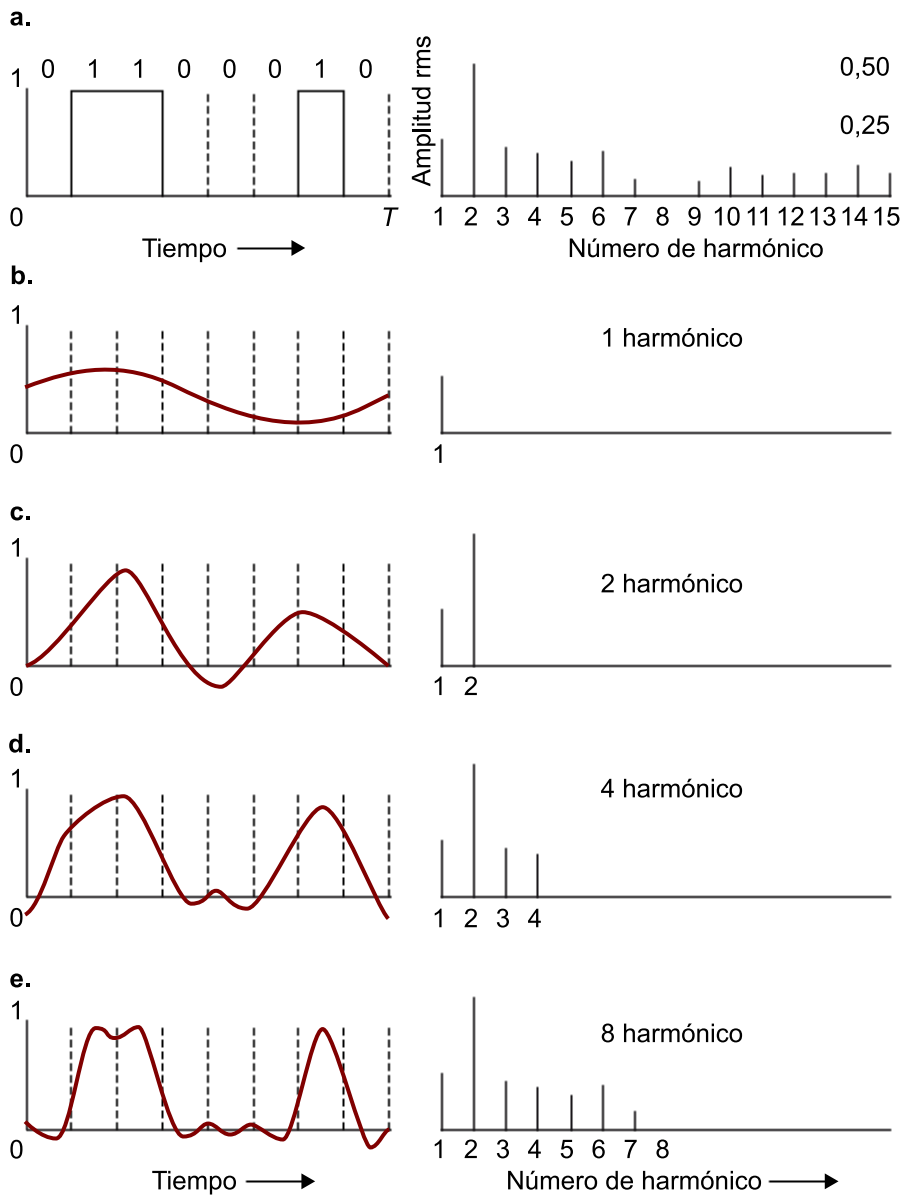
A partir de una señal $g(t)$, si calculamos los armónicos de Fourier para $n = 1, 2, 3, \dots$ y calculamos la raíz cuadrada de la suma de las amplitudes al cuadrado:

$$\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

Obtenemos unos valores que son de interés porque son proporcionales a la energía transmitida por la señal a una determinada frecuencia (para cada $n = 1, 2, 3, \dots$ tenemos una frecuencia diferente $2 \cdot \pi \cdot n \cdot f_0$ donde $f_0 = 1/T$).

En las figura 36 se muestran determinadas señales $g(t)$ y sus armónicos de Fourier (también denominado espectro). En la primera, podemos observar que $g(t)$ es una función seno, es puramente periódica y sólo tiene un solo armónico. La segunda figura consiste en una función con 2 armónicos. Y la tercera figura tiene 4 armónicos.

Figura 36



Cuando emiten una señal por un filtro, la señal obtenida depende del filtro elegido y puede alterar la señal emitida, de tal manera que la señal recibida tenga características diferentes. Todos los medios de transmisión (que al fin y al cabo se comportan como filtros) permiten transmitir señales con una cierta pérdida de potencia en el proceso, es decir, discriminando de la señal original determinados armónicos con más o menos intensidad. Así, la señal no recibida nunca es idéntica a la señal original o emitida. Generalmente, las amplitudes que permanecen indiscriminadas por un canal lo hacen entre la frecuencia 0 y la frecuencia f_c (medido en hercios o ciclos por segundo), mientras que las frecuencias de la señal emitidas superiores a f_c son prácticamente discriminadas (anuladas) en la señal recibida. El valor $f_c - 0$ se denomina frecuencia de corte, o también ancho de banda, y representa el rango de frecuencias por el

que el filtro deja pasar las componentes (o armónicos) de la señal emitida. En muchos casos, un filtro es intencionadamente introducido dentro de un canal de comunicaciones para limitar el ancho de banda o frecuencia de corte.

4.1.3. La máxima velocidad de transmisión de un canal

Imaginemos que tenemos un sistema de comunicaciones que transmite con los siguientes niveles de voltaje: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 voltios. Estos ocho niveles de voltaje (denominamos también símbolos) representan realmente tres bits cada uno ($2^3 = 8$), de tal manera que cuando se produce un cambio de voltaje en el medio de transmisión (por ejemplo, se pasa de 3 a 4 voltios), se están transmitiendo tres bits. Este proceso de codificación se denomina modulación.

El ritmo de transmisión de este voltaje es lo que se conoce como velocidad de modulación V_m y se mide en baudios (símbolos por segundo). La velocidad de transmisión V_t (bps o bits por segundo) será, en este caso, $V_t = 3 \cdot V_m$, ya que cada símbolo representa tres bits.

En 1924, H. Nyquist determinó la ecuación del límite de la velocidad máxima por un canal con un ancho de banda definido sin ruido. La velocidad máxima de modulación del canal es de $2 \cdot H$ baudios, donde H es el ancho de banda del canal (hercio).

En un canal en el que aparece el ruido, el sistema se deteriora bastante. La cantidad de ruido presente en un canal se determina por el cociente entre la potencia del ruido y la potencia de la señal emitida. Es lo que se denomina SNR⁽⁷⁹⁾ o S/N. Habitualmente, esta unidad se puede medir en el valor lineal o se puede medir en decibelios (dB), donde 1 dB es igual a $10 \cdot \log_{10} S/N$. En 1948, Shannon determinó que la velocidad máxima de transmisión en un canal con ruido es igual a $H \times \log_2(1 + S/N)$, donde H es el ancho de banda del canal (hercio).

⁽⁷⁹⁾SNR es la sigla de *signal to noise ratio*.

Ejercicios

4. Un sistema de transmisión con un ancho de banda de 30 MHz transmite a una velocidad efectiva de 600 Mbps. Calculad la velocidad de modulación máxima del sistema y la cota inferior del valor SNR (en dB y en lineal) para que el sistema funcione correctamente.

Solución ejercicio 4

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SNR)$$

$$600 \cdot 10^6 \text{ bps} = 30 \cdot 10^6 \log_2(1 + SNR); SNR = 1.048.575: 60,2 \text{ dB}$$

$$V_m = 2 \cdot BW: 2 \cdot 30 \text{ MHz} = 60 \text{ Mbaudios}$$

5. Un módem típicamente genera del orden de 2.400 símbolos por segundo. ¿Cómo es posible que la velocidad de transmisión sea de hasta 56 Kbps si el teorema de Nyquist dice que $V_{m/max} = 2 BW$?

Solución ejercicio 5

El enunciado está confundiendo la velocidad de transmisión con la velocidad de conmutación, y una cosa es el número de símbolos que se están generando y otra cuántos símbolos hay en nuestro código.

6. Una transmisión de datos opera en 100 Mbps y utiliza un canal de comunicaciones con un ancho de banda de 25 MHz. ¿Cuál es el valor mínimo de la relación señal-ruido (en dB y en lineal) para que el sistema pueda funcionar correctamente? Calculad la velocidad de modulación máxima y el número máximo de bits por símbolo transmitido.

Solución ejercicio 6

Utilizando el teorema de Shannon, tenemos que:

$$100 \text{ Mbps} = 25 \text{ MHz} \log_2 \left(\frac{P_s}{P_n} + 1 \right)$$

de donde se obtiene que:

$$\log_2 \left(\frac{P_s}{P_n} + 1 \right) = 4 \text{ y } \frac{P_s}{P_n} = 15$$

o bien $10 \log_{10} 15 = 11,7 \text{ dB}$.

Con respecto a la velocidad de modulación:

$$V_{m/\max} = 2 \times 25 \text{ MHz} = 50 \text{ Mbaudios}$$

y nos da:

$$100 \text{ Mbps} = 50 \text{ M} \times n = n = 2$$

7. Supongamos que una televisión digital quiere transmitir desde una fuente que utiliza una matriz de 480×500 píxeles, donde cada píxel puede tomar uno de 32 valores posibles de intensidad. Se envían 30 imágenes por segundo (esta fuente digital es aproximadamente equivalente a los estándares de televisión *broadcast* que han sido adoptados hoy).

- ¿Cuál es la velocidad de transmisión en la que la fuente emite? (bps)
- Supongamos ahora que las imágenes se transmiten sobre un canal con un ancho de banda de 4,5 MHz y una relación señal-ruido de 39 dB. ¿Cuál es la capacidad del canal?
- Comentad cómo los parámetros dados en el enunciado podrían ser modificados para permitir la transmisión de señales de color sin incrementar la velocidad de transmisión obtenida en a.

Solución ejercicio 7

a) Cada píxel se considera un símbolo, por lo que una imagen estará compuesta por $480 \times 500 = 240.000$ símbolos. Como es necesario transmitir 30 imágenes por segundo:

$$V_m = 240.000 \text{ símbolos/imágenes} \times 30 \text{ imágenes/segundo} = 7,2 \text{ Mbaud}$$

$$n = \log_2 32 = 5;$$

$$V_t = 7,2 \text{ Mbaud} \times 5 = 36 \text{ Mbps}$$

b) $SNR_{dB} = 39 \text{ dB} = 10 \log_{10}(SNR) = 10 + 10 + 10 + 3 + 3 + 3 \text{ dB}$; entonces: $SNR = 10 \times 10 \times 10 \times 2 \times 2 \times 2 = 8.000$. Según Shannon, $C = BW \log_2(SNR + 1) = 4,5 \text{ MHz} \log_2(8.001) = 58.347 \text{ Mbps}$

c) Se supone que la transmisión de señales de color necesitan más de estos 32 niveles. Si $V_t = V_m \log_2 M$, y si V_t debe permanecer constante, entonces, para un mayor valor de M , la velocidad de modulación debe ser menor. Para reducir la

velocidad de modulación, o bien reducimos en número de imágenes enviadas por segundo a costa de la calidad, o bien, y sería la opción más acertada, utilizamos una matriz más pequeña a la de 480×500 píxeles.

8. Responded estas cuestiones y justificad la respuesta:

- a) ¿Qué permite calcular el teorema de Nyquist? Comparadlo con el de Shannon.
- b) ¿Cuántos niveles de codificación se necesitan para transmitir datos a 14,4 Kbps por un canal de 3 kHz de ancho de banda?
- c) ¿A qué velocidad máxima de transmisión de datos podría llegarse si la relación señal ruido del canal es de 30 dB?
- d) ¿Cuántos baudios se podrían llegar en este último caso si codificáramos la señal de datos con 64 niveles?

Solución ejercicio 8

a) Por medio del teorema de Nyquist se puede calcular la tasa de datos máxima que se puede transmitir por un canal sin ruido de ancho de banda finito. El teorema de Shannon se define para canales con ruido y nos determina la capacidad máxima teórica del canal.

b) Si aplicamos la fórmula de Nyquist tenemos que $14,4E3 = 2 \times 3E3 \times \log_2(N)$, y vaciando N tenemos que $\times \log_2(N) = 14,4E3 / 2 \times 3E3 \rightarrow \times \log_2(N) = 2,4 > 5,27$ niveles. Se debe tener en cuenta que al trabajar con niveles discretos ello implica que hay cinco niveles y, por lo tanto, la velocidad será $2 \times 3E3 \times \log_2(5) = 13,93$ kbps.

c) Para la velocidad máxima de transmisión aplicamos el teorema de Shannon:

30 dB se corresponden con una relación señal/ruido $10^{(30/10)} = 1.000$.

Entonces, $C = 3 \times E3 \times \log_2(1 + 1.000) = 29,9016 \times 10^3$ bps.

d) Si lo que queremos es conocer la velocidad de símbolo:

$$\text{Núm. bits nivel} = \log_2 64 = 6$$

$29,9016 \text{ kbps} \times (1 \text{ símbolo}/6 \text{ bits}) = 4,983 \text{ Ksímbolos/s} = 4,983 \text{ Kbaudios}$

4.1.4. Tipos de codificaciones digitales

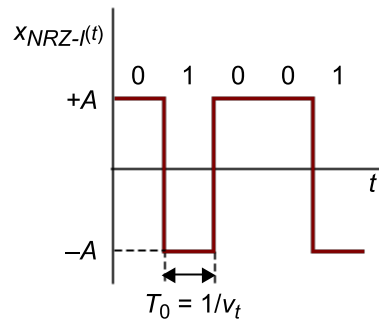
Las codificaciones digitales generan señales con un número finito de niveles (señales digitales), es decir, tienen transiciones de nivel repentinas separadas por intervalos en los que el nivel se mantiene fijo. Para transmitir las se necesitan medios de transmisión paso bajo (situados a frecuencias muy bajas).

1) Codificación NRZ⁽⁸⁰⁾ (*non-return to zero*)

⁽⁸⁰⁾NRZ es la sigla de *non-return to zero*.

La codificación NRZ utiliza dos niveles, uno de voltaje $+V$ y otro de voltaje $-V$, que indican los bits 0 y 1, respectivamente. Cada símbolo sólo lleva un bit y se cumple que $V_t = V_m$. El gran problema de esta codificación es la sincronización de bit entre el emisor y el receptor, es decir, saber en qué instante empieza un bit. Por ello, emisor y receptor deben compartir un reloj que va marcando los intervalos de tiempo en los que empieza cada bit.

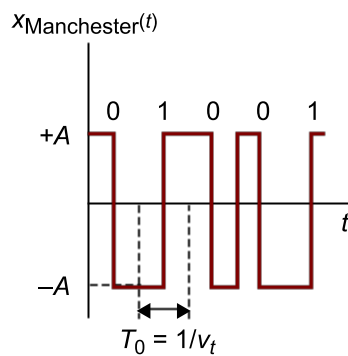
Figura 37. Señal NRZ



2) Codificación Manchester

La codificación Manchester corrige los problemas de la codificación NRZ a costa de tener un ancho de banda doble que el de NRZ. Introduce un flanco de sincronización entre emisor y receptor en cada bit, independientemente de la secuencia de bits transmitida. Podríamos decir que cada símbolo lleva medio bit. Tiene una buena robustez frente al ruido.

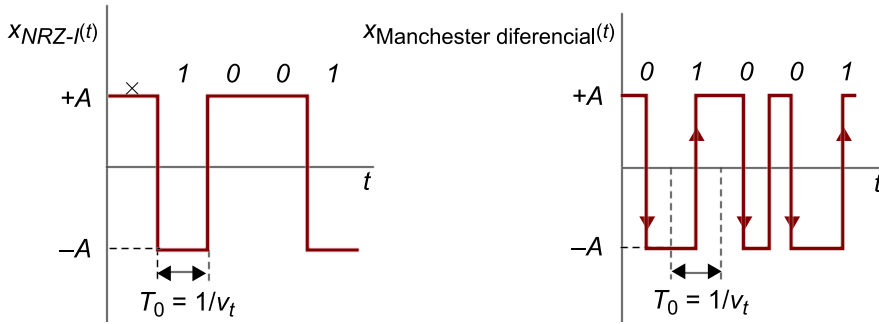
Figura 38. Señal Manchester



3) Codificación NRZ-I y Manchester diferencial

En las líneas de transmisión en dos hilos, puede producirse el problema de que en la recepción no se conozca el signo del voltaje de cada uno de ellos. El hecho de tener una polaridad u otra puede causar que, por ejemplo, una secuencia enviada como 011101 se reciba por 100010. En este caso, se codifican los bits en el cambio de señalización, no existe una asignación directa símbolo-bit. Si el símbolo actual es igual que el símbolo anterior, tenemos un bit 0, por ejemplo. Si es diferente, tenemos el otro bit (por ejemplo, 1).

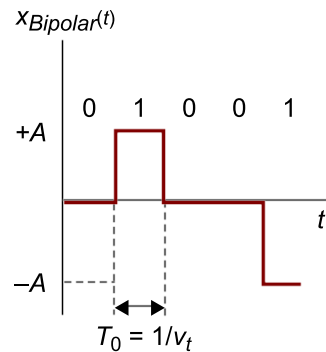
Figura 39. Señal NRZ-I y señal Manchester diferencial



4) Codificación bipolar y B8ZS

Mejora las características de NRZ sin tener los inconvenientes de la codificación Manchester, pero a costa de perder robustez frente al ruido. La codificación bipolar utiliza tres símbolos en lugar de dos. Cada símbolo es un nivel constante durante el tiempo que persiste. Los niveles posibles son $+V$, 0 y $-V$. Los bits cero se codifican con una señal nula y los bits uno, con una señal de amplitud V , alternativamente positiva y negativa. Además, es invulnerable a la inversión de polaridad, sin la necesidad de usar el mecanismo diferencial.

Figura 40. Señal bipolar



La codificación B8ZS⁽⁸¹⁾ sustituye las cadenas de ocho o más ceros por una codificación de flancos. Las secuencias de siete o menos ceros no varían respecto a cómo serían codificados en bipolar sencilla; los ocho ceros seguidos se codifican con los símbolos $0\ 0\ 0\ +V\ -V\ 0\ -V\ +V$ o con los símbolos $0\ 0\ 0\ -V\ +V\ 0\ +V\ -V$ en función de la polaridad del último y anterior a la secuencia de ceros, de manera que no haya confusión posible con la secuencia válida de 000110011.

⁽⁸¹⁾B8ZS es la sigla de *bipolar with 8 zeros substitution*.

La modulación en amplitud (ASK⁸²) consiste en modificar la amplitud de la sinusoidal, según la información que se quiere transmitir. Por ejemplo, para transmitir un 0 en binario se utilizaría una amplitud A_0 diferente de la amplitud A_1 para transmitir un 1 en binario. Si utilizamos cuatro amplitudes diferentes, podremos enviar por cada amplitud 2 bits (2 bits por símbolo).

⁽⁸²⁾ASK es la sigla de *amplitude shift keying*.

6) Modulación en frecuencia

La modulación en frecuencia (FSK⁸³) consiste en modificar ligeramente la frecuencia portadora en función del tipo de datos que se han de transmitir. Por ejemplo, para transmitir un 1 se utilizará una frecuencia portadora f_1 y para transmitir un 0, una frecuencia portadora diferente f_0 .

⁽⁸³⁾FSK es la sigla de *frequency shift keying*.

7) Modulación de fase diferencial

La modulación de fase diferencial (DPSK⁸⁴) se obtiene al modificar la fase de la señal. Dado que la fase no es una magnitud absoluta (como lo eran la amplitud o la frecuencia), necesitaríamos una fase de referencia (a cero grados). Como eso no es práctico, codificaremos los bits en la diferencia entre ellos. Así obtenemos la modulación PSK diferencial o DPSK. De este modo, por ejemplo, si enviamos en DPSK-2 una secuencia de símbolos, todos con la misma fase, enviaremos siempre el mismo bit (por ejemplo, ceros); si la fase cambia a 180° , se obtiene la secuencia del otro bit (por ejemplo, unos).

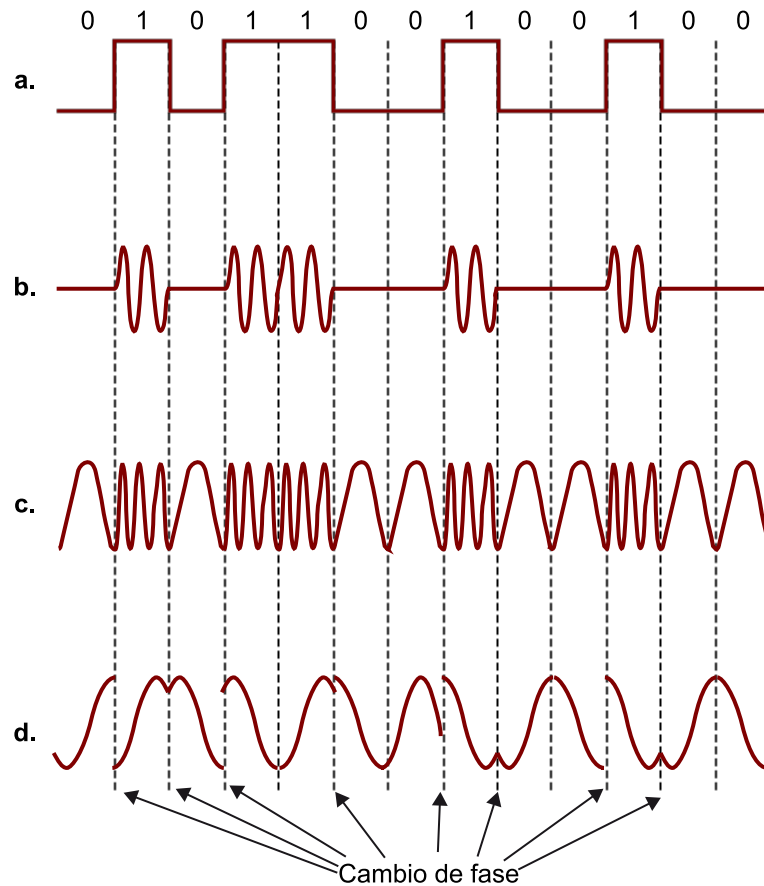
⁽⁸⁴⁾DPSK es la sigla de *differential phase shift keying*.

8) Modulación de amplitud en cuadratura

La modulación QAM⁸⁵ se obtiene al modificar la amplitud y la fase de una misma sinusoidal para conseguir transmitir más bits por cada símbolo. Por ejemplo, podemos utilizar cuatro amplitudes diferentes y cuatro fases diferentes para conseguir $4 \times 4 = 16$ símbolos diferentes (QAM-16).

⁽⁸⁵⁾QAM es la sigla de *quadrature amplitude modulation*.

Figura 42. Señal QAM



a. Señal binaria. b. Modulación en amplitud. c. Modulación en frecuencia. d. Modulación de fase diferencial

El ancho de banda de las diferentes modulaciones es similar. El espectro de la modulación queda centrado de manera simétrica en torno a la frecuencia portadora. Las modulaciones QAM presentan más robustez frente al ruido porque utilizan una combinación de ASK y FSK.

Ejercicios

9. Dado que la telefonía GSM trabaja dentro de la banda de frecuencias de 880-940 MHz, y suponiendo que se utilice una modulación FSK-4, determinad las cuatro frecuencias portadoras, suponiendo que son equidistantes entre ellas.

Solución ejercicio 9

La diferencia de frecuencias intersímbolo será de $(940 - 880)/3 = 20$ Mhz.

La modulación FSK-4 tiene cuatro símbolos de dos bits cada uno, con las siguientes frecuencias:

00: 880 Mhz
 01: 900 Mhz
 10: 920 Mhz
 11: 940 Mhz

10. Calculad la tasa de símbolos/s para las siguientes velocidades de bps y tipo de modulación:

- a) 2.000 bps FSK-2
- b) 4.000 bps ASK-4
- c) 8.000 bps DPSK-8

d) 64.000 bps QAM-16

Solución ejercicio 10

Sabemos que $V_t = V_m \cdot \log_2 N$, donde N es el número de símbolos o señales diferentes.

- a) $V_m = 2.000 / \log_2 2 = 2.000$ símbolos/s
- b) $V_m = 4.000 / \log_2 4 = 2.000$ símbolos/s
- c) $V_m = 8.000 / \log_2 8 = 8.000/3 = 2.666$ símbolos/s
- d) $V_m = 64.000 / \log_2 64 = 64.000/6 = 10.666$ símbolos/s

4.1.6. Atenuación y distorsión de un canal. Ruido

Cuando transmitimos una señal por un canal, la señal de entrada o de envío es difícilmente igual a la señal de salida o entrada por el canal. Lo ideal sería tener un medio de transmisión por el que la señal recibida fuera exactamente la señal enviada. En general, por un canal se envía una magnitud física, voltaje, que puede tomar valores positivos o negativos.

Las perturbaciones que puede sufrir una señal básicamente son tres:

1) **Atenuación:** la atenuación es el debilitamiento de la potencia de la señal a medida que se propaga por el medio. La señal recibida $r(t) = s(t)/a$, donde $s(t)$ es la señal emitida. Es decir, $s(t)$ y $r(t)$ tienen la misma forma, excepto la amplitud de la señal recibida, que es menor que la amplitud de la señal emitida. Este efecto se debe a varios fenómenos físicos, como la resistividad del conductor (las pérdidas de tensión son debidas al efecto Joule de los conductores en forma de calor), y a los fenómenos de radiación (bajo ciertas condiciones, un medio de transmisión se comporta como una antena, radiando una determinada potencia que se escapa del cable). La atenuación también se puede calcular en función de la potencia emitida P_s y recibida P_r , $A = P_s/P_r$. En general, esta atenuación se expresa en decibelios (dB), A_{dB} , de la siguiente manera $A_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(P_s/P_r)$. Para corregir los efectos de la atenuación, se utilizan los amplificadores.

2) **Distorsión:** diremos que un medio de transmisión distorsiona una señal si la señal recibida no tiene la misma forma que la original. En general, la distorsión provoca el redondeo de la señal, que será más o menos importante en función de la velocidad de variación de la señal, ya sea la velocidad de transmisión, el tipo de medio de transmisión o su longitud. Por ejemplo, el teléfono o la radio provocan una tonalidad especial en el sonido original de la voz o la reverberación, como un caso particular de eco que provoca que las ondas sonoras reboten por las paredes, la tierra y los elementos próximos al frente de onda sonora. Técnicamente, la función de transferencia en frecuencia del canal no tiene el mismo valor en todas las frecuencias: en determinadas

bandas de frecuencia aumenta o disminuye la potencia y en otras se comporta de manera diferente. Se corrige con unos aparatos denominados ecualizadores que intentan corregir estos desacoplamientos.

3) Ruido: existen perturbaciones de la señal que no dependen propiamente de la señal emitida y que se conocen como ruido. No está producido por un hecho único, sino por varios: el ruido térmico (que provoca que cuando los cuerpos están a una cierta temperatura diferente de los cero grados Kelvin las partículas atómicas vibren y, en particular, los electrones de los mismos conductores), también denominado ruido blanco (afecta a todas las frecuencias); el ruido de eco (el resultado es una mezcla de la señal original y la misma señal retardada y con más potencias, debido a los empalmes o las conexiones de los cables del medio de transmisión); el ruido de interferencia (la radiación de un cable eléctrico cuando transmite corriente eléctrica, que es captada por otro cable eléctrico o próximo), y el ruido impulsivo (ruidos de corta duración provocados por chispas, imperfecciones de las fuentes de alimentación o microcortes).

Ejercicios

11. Una señal ha atravesado seis amplificadores en cascada y cada uno tenía una ganancia de 2 dB. ¿Cuál es la ganancia total en dB y en valor lineal?

Solución ejercicio 11

Si la ganancia en valor lineal de cada amplificador vale G , entonces la ganancia total de los seis amplificadores valdrá $G \cdot G \cdot G \cdot G \cdot G \cdot G = G^6$ en valor lineal.

También sabemos que $10 \cdot \log(G) = 2$ dB. En decibelios, $10 \cdot \log(G^6) = 6 \cdot 10 \cdot \log(G) = 6 \cdot 2$ dB = 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 dB = 12 dB.

12. Una sonda espacial está fotografiando la superficie de un planeta y quiere enviar una fotografía de 300×200 píxeles, con una resolución de 16 niveles de color por píxel. El enlace de comunicaciones trabaja en la frecuencia de $f_c = 2$ GHz y la longitud total del enlace (ida y vuelta) es $L = 3E8$ km (3×10^8). El transmisor de la sonda entrega una potencia de $S_t = 20$ W a una antena de ganancia $G_t = 26$ dB. La antena terrestre receptora tiene una ganancia de $G_r = 56$ dB.

Las pérdidas por propagación se modelan según la siguiente fórmula, que depende de la frecuencia de emisión de la sonda:

$$L(\text{dB}) = 92,4 + 20 \times \log_{10} f(\text{GHz}) + 20 \times \log_{10} L(\text{km})$$

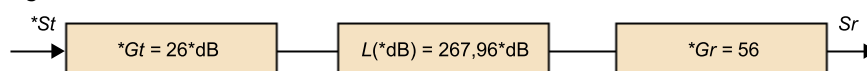
a) Modelar el medio de transmisión con sus etapas de ganancia y pérdidas, así como determinar la sensibilidad mínima (S_r) del receptor para que se pueda realizar la transmisión.

b) ¿Cuántos bits se transmitirían por cada fotografía?

Solución ejercicio 12

a)

Figura 43



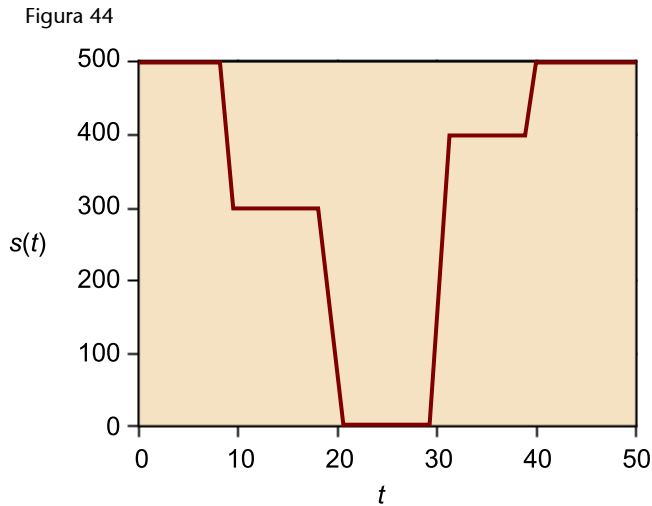
$$L = 92,4 + 20 \times \log_{10} 2 + 20 \times \log_{10} 3E8 = 92,4 + 6,02 + 169,54 = 267,96$$

$$10 \times \log_{10} (S_r/S_t) = G_t \text{ (dB)} - L \text{ (dB)} + G_r \text{ (dB)} = 26 - 267,96 + 56 = -185,96$$

$$S_r = S_t \times 10^{(-185,96/10)} = 20 \times 2,53E - 19 = 5,07E - 18 \text{ W}$$

b) Si tenemos una definición de 300×200 píxeles, con una resolución de 16 niveles, se transmitirán el siguiente número de bits: $300 \times 200 \times \log_2 16 = 240.000$ bits.

13. Dada la siguiente señal $s(t)$



que se transmite mediante tres amplificadores de ganancias de potencia de -3 dB, -4 dB y -7 dB, respectivamente, dibujad la señal recibida $r(t)$ en la salida del último amplificador. Calculad la ganancia total de la señal resultante de los tres amplificadores en dB y en lineal.

Solución ejercicio 13

Las ganancias de potencia de los amplificadores son, respectivamente, -3 dB, -4 dB y -7 dB. De hecho, estos amplificadores no amplifican, sino que atenúan la señal.

Así, la ganancia en potencia lineal de cada amplificador será:

$$\begin{aligned} 10 \cdot \log G_1 &= -3 \\ \log G_1 &= -3/10 \\ G_1 &= 10^{-0,3} = 0,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 10 \cdot \log G_2 &= -4 \\ \log G_2 &= -4/10 \\ G_2 &= 10^{-0,4} = 0,39 \end{aligned}$$

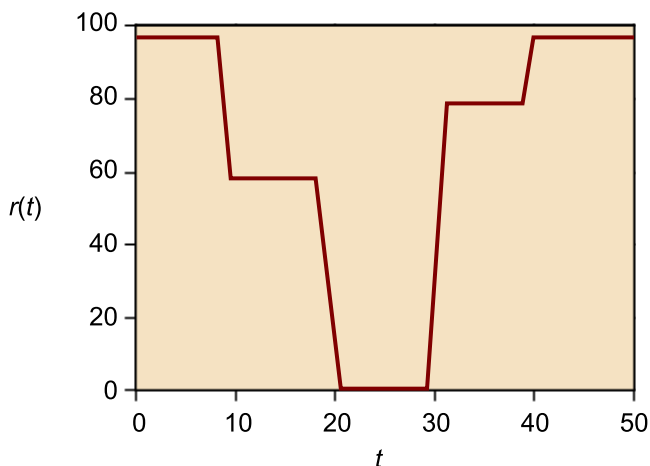
$$\begin{aligned} 10 \cdot \log G_3 &= -7 \\ \log G_3 &= -7/10 \\ G_3 &= 10^{-0,7} = 0,19 \end{aligned}$$

Y la ganancia de potencia equivalente de haber pasado por los tres amplificadores será:

$$\begin{aligned} G_{\text{equivalente}} &= G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 = 0,5 \cdot 0,39 \cdot 0,19 = 0,039 \\ P_r &= G_{\text{equivalente}} \cdot P_s \end{aligned}$$

La ganancia en señal emitida será $(0,039)^{1/2} = 0,19$ (en decibelios $-7,21$ dB), y $r(t) = s(t) \cdot 0,19$.

Figura 45



4.2. Medios de transmisión

Existen varios medios de transmisión en función de su ancho de banda, retraso, coste, facilidad de uso, instalación y mantenimiento. Los medios se pueden clasificar en medios guiados (par de hilos, fibra óptica) o no guiados (ondas de radio, láser a través del aire). Los siguientes factores de un medio de transmisión determinan la velocidad máxima de transmisión y la distancia máxima del medio:

- Ancho de banda: al aumentar el ancho de banda se puede aumentar la velocidad de transmisión.
- Atenuación: el par trenzado, el cable coaxial y la fibra óptica van en orden decreciente.
- Interferencias: el par trenzado y el cable coaxial van en orden decreciente.
- Número de receptores: atenúan y distorsionan la señal que supone una menor distancia.

4.2.1. Par trenzado

Se trata del sistema más antiguo y todavía es muy utilizado. Consiste en dos pares de hilos de cobre o de acero cubierto con cobre, aproximadamente de un milímetro de diámetro cada uno, que están envueltos entre sí en forma de hélice, como una molécula de ADN.

Se puede utilizar tanto en las transmisiones digitales como en las analógicas. El ancho de banda que ofrecen depende del grosor del cable y de la distancia. Debido a su bajo coste y a su rendimiento, es un sistema muy popular. El coste es el más económico por metro (más que el coaxial o la fibra óptica), pero tiene unos costes de conectividad parecidos a otros medios.

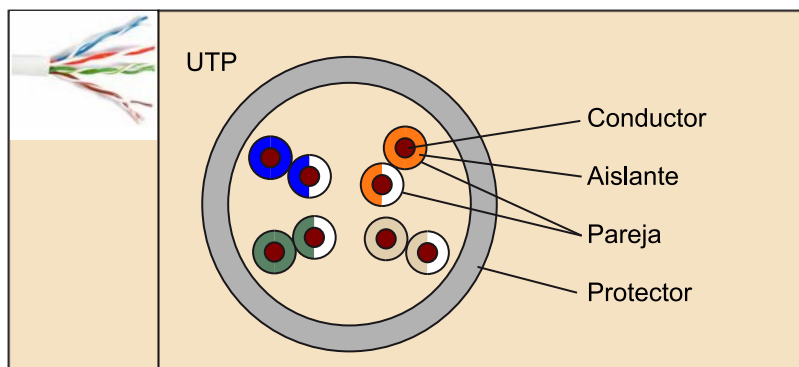
Es bastante susceptible al ruido y a las interferencias debido a la facilidad de acoplamiento de los campos electromagnéticos. Si corre paralelo a una línea de corriente eléctrica, puede inducir una señal de 50 Hz. Los pares adyacentes pueden producir un “cruce de líneas”. El hecho de envolverlos de esta manera es para reducir las interferencias provocadas por pares trenzados vecinos. Además, dos hilos paralelos constituyen una antena, un par trenzado, no.

Es un sistema muy utilizado en los sistemas de telefonía. Generalmente, los teléfonos de las viviendas están conectados a la centralita telefónica mediante pares trenzados (su ancho de banda es de 4 KHz). También se utiliza en las LAN a velocidades de 10, 100 y 1.000 Mbps. Es muy utilizado en las conexiones punto a punto y su ámbito geográfico suele ser de unos 100 metros (en redes Ethernet).

Los primeros pares trenzados no apantallados se denominaron UTP⁽⁸⁶⁾. Habitualmente, el par trenzado se agrupaba en cuatro pares trenzados más dentro de una protección de plástico. Este tipo de cable se denominaba de categoría tres. Después se introdujeron los cables de categoría cinco, agrupamiento con más densidad por centímetro de vueltas en el cable, lo que ofrecía unas características de mayor calidad sobre largas distancias.

⁽⁸⁶⁾UTP es la sigla de *unshielded twisted pair*.

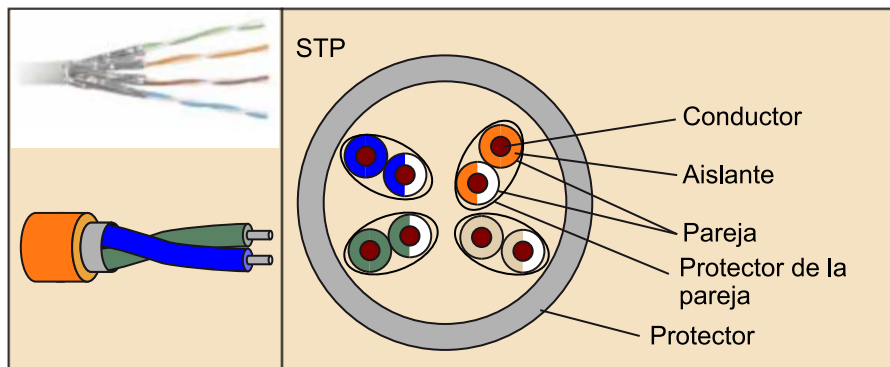
Figura 46



Después llegó la evolución en el tipo de cableado STP⁽⁸⁷⁾, denominado par trenzado apantallado, en el que cada par de hilos tiene una protección individual.

⁽⁸⁷⁾STP es la sigla de *shielded twisted pair*.

Figura 47



Las categorías de este tipo de cable según la norma EIA-568-A son:

- Categoría 1 = sin criterios de prestaciones
- Categoría 2 = hasta 1 MHz (cableado telefónico)
- Categoría 3 = hasta 16 MHz (Ethernet 10Base-T)
- Categoría 4 = hasta 20 MHz (*token ring*, 10Base-T)
- Categoría 5 (y 5e) = hasta 100 MHz (100Base-T, 10Base-T)
- Categoría 6 (y 6e) = hasta 550 MHz (1-10 GBase-T)

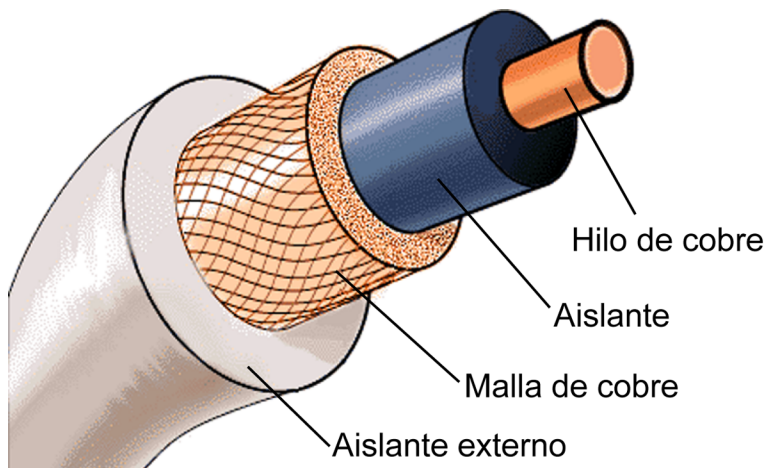
4.2.2. Cable coaxial de banda base

El cable coaxial tiene un recubrimiento superior a los pares trenzados y funciona en largas distancias y a altas velocidades.

Se utilizan dos tipos de cable coaxial: el de 50 ohmios, usado para las transmisiones digitales (codificación Manchester, la velocidad de transmisión llega a los 10 Mbps 10BASE2), y el de 75 ohmios, utilizado para la transmisión analógica (cable coaxial de banda ancha).

En este apartado nos basaremos en el cable de 50 ohmios. Este cable consiste en un hilo de cobre rodeado por un material aislante. El aislante recubre el conductor de manera cilíndrica. Este cable consiste en dos conductores aislados de cobre o aluminio, de modo que uno recubre al otro en toda su longitud. Suelen tener un diámetro de entre 0,4 y 1 pulgadas. El conductor externo está cubierto por una capa de plástico protector. Es menos susceptible a las interferencias que el par trenzado. Proporciona una buena combinación de un ancho de banda muy grande y una excelente inmunidad al ruido. Para cables de 1 km de largo, soporta velocidades de 1 a 2 Gbps. Se pueden utilizar distancias más largas, pero con velocidades de transmisión más bajas. Este tipo de cable se ha utilizado para interconectar los equipos de las centrales telefónicas, para alguna red de área local o para la televisión por cable. Es más económico que la fibra óptica pero más caro que el par trenzado.

Figura 48



Puede soportar una conectividad de 100 dispositivos si se utiliza en conexiones multipunto.

4.2.3. Cable coaxial de banda ancha

El otro tipo de cable coaxial se emplea en las transmisiones analógicas propias de la televisión por cable, como digitales (mediante modulaciones FSK, ASK, PSK o en canales con velocidades de transmisión entre 5 y 20 Mbps). Este tipo de cable también se conoce como de banda ancha.

Este tipo de cable funciona sobre unas longitudes de 100 kilómetros a unas frecuencias de 300-450 MHz. Habitualmente, la televisión por cable divide la frecuencia entre múltiples canales, cada uno de 6 MHz. Cada canal se utiliza para televisión analógica, audio de calidad de CD (1,4 Mbps) o transmisión de datos digitales. La televisión y los datos se transmiten dentro del mismo cable. Para conseguir mayores velocidades (superiores a 50 Mbps), es necesario utilizar el ancho de banda completo (banda portadora, 1 km).

Este tipo de cable suele necesitar amplificadores, sobre todo cuando las distancias que recorre el cable son considerables.

Existen dos posibles configuraciones para este tipo de cables: en la primera, la transmisión se lleva a cabo mediante un cable y la recepción por otro; en la segunda, se emplea un único cable y se divide la frecuencia en dos bandas: una para recibir y la otra para enviar la información.

Puede soportar una conectividad de 1.000 dispositivos en configuraciones multipunto.

4.2.4. Fibra óptica

Un sistema de comunicaciones ópticas está formado por tres componentes: una fuente de luz, el medio de transmisión y el detector de luz. Convencionalmente, un impulso de luz indica un bit con valor 1 y la ausencia de luz indica un bit de valor 0. El medio de transmisión es una fibra óptica muy fina. El detector genera un impulso eléctrico cuando la luz incide sobre él. Así, si instalamos una fuente de luz al inicio de la fibra óptica y un detector de luz al final de la fibra, tenemos un sistema de transmisión unidireccional que acepta señales eléctricas, las convierte en impulsos de luz que se transmiten y se reconvierten en una señal eléctrica al final de la fibra.

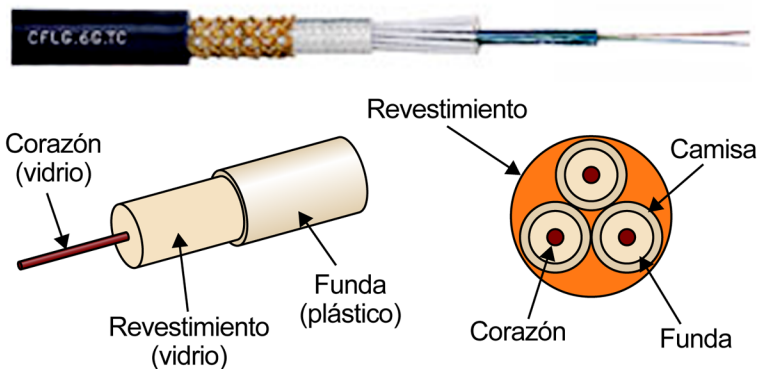
La materia prima de la fibra óptica es el vidrio, un material no excesivamente caro y del que existen grandes cantidades en nuestro planeta. El vidrio utilizado en las fibras ópticas es transparente.

La fibra óptica consiste en tres secciones concéntricas (uno o más hilos de vidrio o plástico) recubiertas por una envoltura de vidrio o plástico de propiedades ópticas diferentes. Una envoltura externa protege el conjunto. Se utiliza tanto para enlaces punto a punto, como para enlaces multipunto. Los emisores pueden ser LED⁸⁸ o ILD⁸⁹ y los receptores son dispositivos de estado sólido PIN (silicio intrínseco entre niveles P y N de un diodo) o APD (fotodiodo de avalancha).

⁽⁸⁸⁾LED es la sigla de *light emitting diode*.

⁽⁸⁹⁾ILD es la sigla de *injection laser diode*.

Figura 49. Fibra óptica



a. Fibra óptica simple. b. Vista de un corte de tres fibras

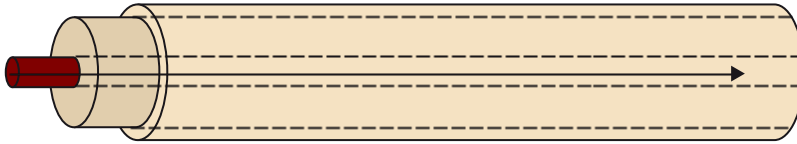
El principio físico por el que la luz se transmite muchos kilómetros por una fibra es el de la refracción de la luz: cuando la luz pasa de un medio a otro medio, el rayo de luz es refractado. Según el ángulo de incidencia del rayo de luz, éste es refractado con otro ángulo. Jugando con los índices de refracción (que depende de los dos medios), se consigue que la luz refractada siempre quede dentro de la fibra y no salga de dentro de ella. De esta manera, se consiguen las fibras multimodo.

Si el diámetro de la fibra se reduce unas pocas longitudes de onda de la luz, la fibra actúa como una guía y la luz sólo se propaga en línea recta, sin rebotes, siendo una fibra monomodo. Las fibras monomodo son las más caras, pero

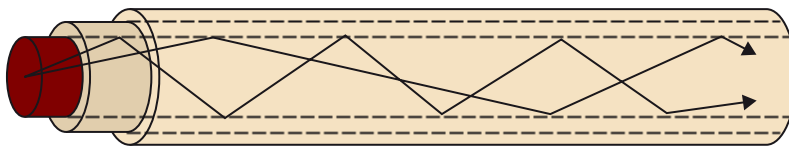
pueden ser usadas en largas distancias. Se ha llegado a velocidades de varios Gp en distancias de 30 km. Con determinados experimentos se han alcanzado distancias de 100 km sin necesidad de repetidores, aunque a bajas velocidades.

Figura 50

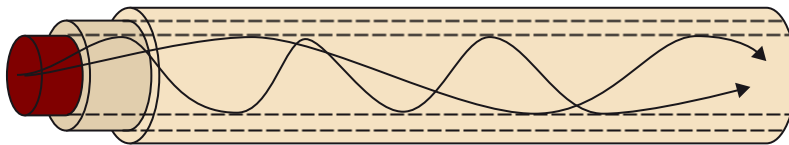
Monomodo (100 Gbps 1 km)



Multimodo (100 Mbps 300 m)

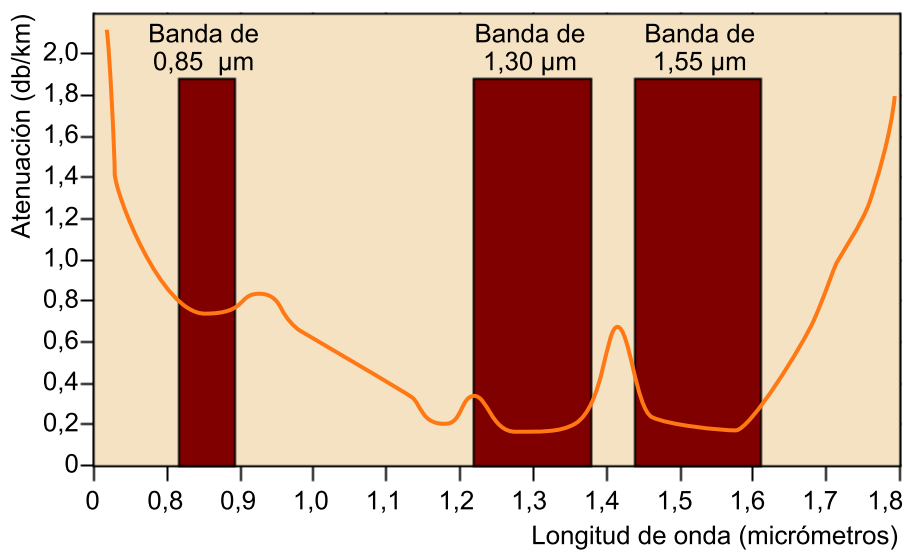


Multimodo índice graduado (100 Mbps 4 km)



La atenuación de la luz cuando atraviesa un vidrio depende de la longitud de onda de la luz. Para la clase de vidrio utilizado en la fibra óptica la atenuación en decibelios por kilómetro se muestra en la figura 51.

Figura 51. Atenuación de la luz



Atenuación en decibelios = $10 \cdot \log_{10}(\text{potencia emitida}/\text{potencia recibida})$

Por ejemplo, una pérdida de potencia de factor 2 (50%) nos da en decibelios el valor de $10 \cdot \log_{10}2 = 3$ dB. La figura nos muestra la zona infrarroja del espectro, que es la que habitualmente se utiliza. La luz visible suele tener unas longitudes de onda de entre 0,4 y 0,7 micras.

Suele haber tres bandas utilizadas para las comunicaciones. Están centradas en 0,85, 1,30 y 1,55 micras, respectivamente. Las dos últimas tienen buenas propiedades de atenuación (atenuación baja). La banda de 0,85 tiene una alta atenuación, pero con estas longitudes de onda los láseres y la electrónica se pueden construir a partir del mismo material. Las tres bandas se halla entre 25.000 y 30.000 GHz.

Los pulsos de luz tienden a dispersarse cuando se propagan. En general, este fenómeno depende de la longitud de onda. Una solución para evitar la dispersión de la luz es alargar la distancia de la fibra, y como consecuencia se debe reducir el ritmo de generación de los pulsos de luz. Por fortuna, se ha descubierto que al generar pulsos de una manera especial (recíproco de un coseno hiperbólico), se consigue que todos los efectos de la dispersión se cancelen y que sea posible enviar pulsos de luz a miles de kilómetros sin una distorsión de la forma significativa: estos pulsos de luz se denominan solitones.

Respecto a la inmunidad al ruido, no le afectan a las interferencias magnéticas ni eléctricas, lo que le permite altas velocidades en grandes distancias y una alta seguridad.

La fibra óptica tiene más ventajas que el cable de cobre. Permite un ancho de banda superior, tiene baja atenuación (los repetidores sólo son necesarios cada 30 kilómetros en fibra óptica, mientras que en cobre lo son cada 5 kilómetros), no se ve afectada por interferencias electromagnéticas o por fallos de potencia eléctrica, ni por elementos químicos corrosivos en el aire, lo que la hace ideal para el uso industrial en las fábricas. Para largas distancias, tiene unas prestaciones superiores al cobre.

Cuando los electrones circulan por un par de hilos, se interfieren entre ellos. Los fotones de luz de una fibra no se afectan entre sí.

Los cables de fibra óptica son parecidos a los cables coaxiales, excepto en su núcleo. En el centro tienen un núcleo de vidrio por el que la luz se propaga; en las fibras multimodo tiene un diámetro de 50 micras, como el grosor de un cabello humano; en las fibras *single mode* pueden tener un diámetro de 8 a 10 micras. El núcleo está recubierto de otro vidrio con un índice de refracción más bajo que el del núcleo para lograr que la luz viaje dentro del núcleo. Después se recubre de una capa de plástico para protegerlo mecánicamente. En general, varios (tres) cables de fibra simples se agrupan en uno.

Las fibras ópticas suelen estar instaladas por encima de la superficie del suelo, o en los fondos de los océanos, y por ello se suelen proteger de animales y otros peligros.

El coste es más caro que el del cable coaxial y del par trenzado, tanto en coste por metro como en los componentes y equipos requeridos para su instalación.

Comparación de los diferentes medios de transmisión			
Tipo de cable/característica	Par trenzado	Coaxial	Fibra óptica
Ancho de banda	Moderado	Grande	Muy grande
Longitud	Pequeña	Moderada	Muy alta
Fiabilidad de la transferencia	Moderada	Alta	Muy alta
Seguridad	Baja	Moderada	Alta
Complejidad de la instalación	Sencillo	Moderado	Complejo
Coste	Bajo	Moderado	Alto

Existen dos tipos de fuentes de luz: LED⁹⁰ y láseres semiconductores.

⁽⁹⁰⁾LED es la sigla de *light emitting diodes*.

Comparativa de los diodos semiconductores y LED como fuentes de luz		
Ítem	LED	Láser semiconductor
Velocidad de transmisión	Baja	Alta
Modo	Multimodo	Multimodo o <i>single mode</i>
Distancia	Corta	Larga
Tiempo de vida	Largo	Corto
Sensibilidad a la temperatura	Baja	Sustancial
Coste	Bajo	Caro

El sistema receptor de la fibra óptica consiste en un fotodiodo que convierte los pulsos de luz en señales eléctricas.

Las fibras se pueden conectar entre ellas de varias maneras. Existen conectores que producen pérdidas de entre un 10 y un 20% de la luz. También se pueden unir mecánicamente (conectando directamente las dos fibras), lo que produce pérdidas de un 10%. También se pueden unir por fusión y formar una conexión sólida.

En una red en anillo con fibra óptica podemos utilizar una interfaz pasiva, que consiste en dos tapones fusionados sobre la fibra principal. Un tapón tiene un LED o un diodo láser para transmitir y el otro tapón tiene un fotodiodo para recibir. También podemos utilizar otro tipo de interfaz, un repetidor activo: la

luz que le llega se convierte en una señal eléctrica y se regenera totalmente el flujo de luz; después, a partir de la señal eléctrica, se vuelve a retransmitir en forma de luz. También existen regeneradores o repetidores puros ópticos, es decir, que no requieren ninguna conversión óptico-eléctrica, y al contrario.

Podemos crear redes de difusión en fibra óptica utilizando una estrella pasiva: cada transmisor tiene una fibra que transmite y que llega hasta un cilindro de silicio con todas las fibras fusionadas en una dentro de este cilindro. De manera similar, del cilindro salen muchas fibras (que están fusionadas dentro del cilindro) hacia los diferentes receptores. En definitiva, se fusionan todas las fibras emisoras y receptoras dentro de un cilindro de silicio, lo que provoca la difusión o el efecto *broadcast* entre un emisor y todos los receptores. La estrella pasiva combina todas las señales de luz y transmite el resultado junto o combinado con todas las líneas de recepción. Como la energía se divide entre las líneas de salida del cilindro, el número de nodos de una red está limitado a la sensibilidad de los fotodiodos.

La fibra óptica no permite transmisiones bidireccionales, sólo unidireccionales. Para realizar una comunicación bidireccional habría que disponer de dos fibras o de dos bandas de frecuencia diferentes sobre la misma fibra. Las interfaces de la fibra son más caras que las eléctricas.

En el futuro se utilizará la técnica de WDM⁹¹ a 1 Tbps.

⁽⁹¹⁾WDM es la sigla de *wavelength division multiplexing*.

4.2.5. Transmisión inalámbrica

Cuando los electrones están en movimiento, crean unas ondas electromagnéticas que se pueden propagar por el espacio (el vacío). Estas ondas generan unas oscilaciones por segundo denominadas frecuencia f (medidas en Hz). La distancia entre dos picos consecutivos (dos máximos consecutivos) se conoce como longitud de onda y se designa con la letra λ (lambda).

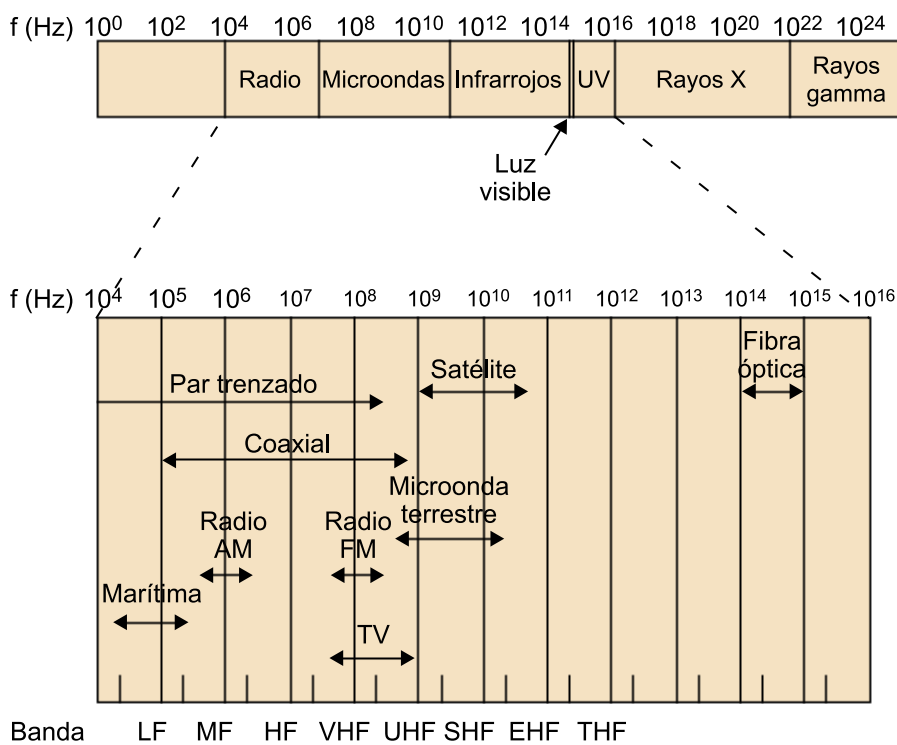
El principio de una comunicación inalámbrica se basa en una emisión y recepción de ondas provocada por una antena, un trozo de conductor conectado a un circuito eléctrico. En el vacío, las ondas electromagnéticas viajan o se propagan a la velocidad de la luz, $c = 300.000$ km/s. En la fibra óptica o en el par de hilos, por ejemplo, se propagan a una velocidad de $2/3 \cdot c$. La velocidad de la luz es el límite de la velocidad máxima en el universo. Ningún objeto ni ninguna señal la pueden superar. La relación fundamental entre f , λ y c es la siguiente:

$$C = \lambda \times f$$

Como c es constante, si conocemos f podemos calcular λ , y al contrario.

El espectro electromagnético está formado por ondas de radio, microondas, ondas infrarrojas y la luz visible. Estas diferentes partes del espectro se pueden utilizar para transportar información previa a una modulación en amplitud o en frecuencia. La luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma suelen ser mejores, pero debido a sus altas frecuencias son difíciles de trabajar y modular, y no se propagan eficientemente a través de edificios. Además son peligrosos para la salud. Las bandas de frecuencia LF, MF, HF, VHF, UHF, SHF, EHF y THF son los nombres oficiales de la ITU. LF tiene una longitud de onda desde 1 hasta 10 kilómetros. Los términos LF, MF y HF se refieren a baja, media y alta frecuencia, respectivamente. V, U, S y E se refieren a los conceptos *very*, *ultra*, *super* y *extremely*.

Figura 52. Espectro electromagnético



Para prevenir un caos total en la utilización de las diferentes frecuencias del espectro, en Estados Unidos la FCC gestiona las frecuencias por radio en AM y FM, la televisión, los teléfonos móviles que utilizan los operadores de telefonía, la policía, los militares, los gobiernos y otras organizaciones.

Dos equipos se pueden comunicar utilizando siempre la misma frecuencia o utilizando la técnica DSSS⁽⁹²⁾, que consiste en que el transmisor va de frecuencia en frecuencia siguiendo una secuencia regular sobre una banda de frecuencias determinada.

⁽⁹²⁾DSSS es la sigla de *direct sequence spread spectrum*.

Las ondas de radio son fáciles de generar, pueden viajar a largas distancias y penetran fácilmente en edificios, al tiempo que se pueden usar tanto para comunicaciones exteriores como interiores. Las ondas de radio viajan en todas las direcciones desde la fuente, lo que permite que el emisor y el receptor no deban estar físicamente alineados. A bajas frecuencias las ondas de radio pa-

san a través de los obstáculos, pero su potencia decae con la distancia desde la fuente. A altas frecuencias las ondas de radio tienden a transmitirse en línea recta y son absorbidas por la lluvia, y a muy altas frecuencias sufren interferencias de motores y otros equipos eléctricos. Para que no se produzcan interferencias entre diferentes usuarios que emplean las mismas frecuencias, los gobiernos limitan los transmisores de radio mediante la concesión de licencias.

Las ondas de radio de las bandas VLF, LF y MD siguen la curvatura de la tierra. Estas ondas se pueden detectar a distancias de más de 1.000 kilómetros a bajas frecuencias, menos con frecuencias altas. Por ejemplo, la radio AM utiliza la banda MF. El principal problema de la utilización de la banda MF para la transmisión de datos es el bajo ancho de banda que ofrece. En las bandas HF y VHF, las ondas tienden a ir hacia la ionosfera (capa cargada de partículas que está a unos 100-500 kilómetros), se refractan y son enviadas otra vez a la tierra. Con determinadas condiciones meteorológicas, las señales rebotan unas cuantas veces. Los operadores de radio amateurs utilizan estas bandas para hablar a largas distancias. También se utilizan para aplicaciones militares las bandas HF y VHF.

En la transmisión por microondas (100 MHz), las ondas viajan en línea recta y pueden ser fácilmente focalizadas. Concentrando toda la energía en un punto mediante una antena parabólica se proporciona una ratio señal/ruido más elevada, pero las antenas de emisión y recepción deben estar correctamente alineadas. Esta alineación permite que muchos transmisores se puedan comunicar con muchos receptores, previamente también alineados. Durante mucho tiempo, antes de la fibra óptica, este sistema fue el núcleo de las transmisiones telefónicas a larga distancia. Las ondas de microondas no atraviesan los edificios. Presentan el problema del *multipath fading*, y es que determinadas ondas son refractadas hacia tierra por diferentes capas atmosféricas y tardan más tiempo en llegar que las ondas directas, lo que provoca que ondas retardadas cancelen las ondas directas. Este efecto depende del clima y de la frecuencia utilizada.

Actualmente, se utilizan microondas en bandas de 10 GHz. Para 8 GHz suelen aparecer los problemas de absorción por el agua de lluvia. En resumen, son utilizadas para comunicaciones telefónicas a larga distancia, teléfonos móviles y distribución de televisión. Es una solución relativamente barata comparada con la utilización de fibra óptica.

Las microondas también se utilizan en unas bandas para usos industriales, científicos o médicos (2.400 GHz). Estas bandas especiales no requieren autorización del gobierno para su utilización. Sus usos son para mandos a distancia que abren puertas, altavoces sin hilos, teléfonos sin hilos, puertas de seguridad, etc.

Las ondas por infrarrojos y las ondas milimétricas se utilizan para comunicaciones de muy corta distancia, como el control remoto del televisor. Son comunicaciones direccionales, baratas y fáciles de construir. No pasan a través de objetos. Se parecen más a las ondas de luz que a las ondas de radio. Debido a que no pasan a través de paredes y otros objetos, las interferencias que pueden ocasionar quedan reducidas a un espacio físico muy pequeño (una habitación). No necesitan ninguna licencia del gobierno para poder emitir en estas frecuencias. Estos tipos de comunicaciones están pensadas para los interiores de edificios porque en el exterior, cuando el sol brilla, también emite en el espectro infrarrojo y provoca interferencias.

Por último, la transmisión por ondas de luz a varios centenares de metros es posible si se utilizan láseres unidireccionales y fotodetectores. Tiene el problema de las turbulencias (cambio en la inclinación de la línea) que provocan los rayos solares (en días de mucha temperatura y mucho sol generado por las corrientes de convección), lo que provoca una desalineación del emisor y el receptor y, en consecuencia, la ruptura de la comunicación.

Resumen

En la primera parte de este módulo didáctico hemos presentado tres de los cuatro contextos en los que se podía encontrar presente el nivel de enlace, y que estaban pendientes del módulo anterior.

En el contexto local entre un ordenador y un periférico, hemos visto la clasificación clásica de los protocolos en función del tipo de sincronización: síncronos o asíncronos y orientados a bit o a carácter. A continuación, hemos estudiado las características principales de los dos protocolos más significativos en este ámbito: RS-232 y BSC.

En el contexto de sistemas de acceso a redes WAN, hemos tratado los dos protocolos de nivel de enlace más implementados en las tecnologías de acceso a redes WAN, PPP y HDLC. Se ha comentado que de la misma manera que los fabricantes consideran Ethernet como el estándar de facto para las redes LAN, muchos autores también consideran PPP como el protocolo de facto para los sistemas de acceso a redes WAN. También hemos repasado las principales tecnologías utilizadas para conectarnos a una WAN o Internet, como ADSL, RDSI, HFC, etc.

En el contexto de redes de transporte WAN hemos estudiado las principales tecnologías utilizadas en la parte troncal de un operador de telecomunicaciones WAN, como X.25, Frame relay, ATM y MPLS. Durante mucho tiempo, ATM ha sido la tecnología referente como red de transporte WAN, pero hoy está siendo reemplazada por otras que se adaptan mejor a IP.

En el cuarto apartado del módulo hemos presentado los conceptos matemáticos básicos e iniciales de los conceptos de transmisión de datos, así como los dos teoremas básicos de la transmisión de información que calculan los límites de la capacidad de transmisión por un canal de comunicación.

Hemos visto que las codificaciones digitales y las modulaciones digitales son los mecanismos que permiten generar señales susceptibles de atravesar los medios. Es decir, consisten en adaptar o convertir las señales digitales internas del funcionamiento de un ordenador a otros tipos de señales más adecuadas por otro canal: por ejemplo, no hace muchos años, la red telefónica básica estaba diseñada para transmitir la voz humana y no para datos digitales; gracias a un aparato denominado modulador/demodulador (módem), las señales internas digitales del ordenador se adaptaban a un tipo de onda con las mismas frecuencias de funcionamiento que la voz humana para poder establecer comunicaciones entre ordenadores a través de la línea telefónica. Este disposi-

tivo realizaba una modulación en el momento de enviar la información y una demodulación (proceso inverso a la modulación) en el momento de recibir la información en el ordenador destino.

También hemos analizado los problemas, las perturbaciones que sufren las señales transportadas por medios: la atenuación, la distorsión y el ruido.

Por último, hemos visto los medios de transmisión más utilizados en la actualidad, sus características más importantes y cómo afectan a cada uno de ellos las perturbaciones descritas anteriormente.

Bibliografía

Bertsekas, D.; Gallager, R. (1992). *Data networks* (2.ª ed.). Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Halberg, B. (2003). *Fundamentos de redes*. McGraw-Hill.

Halsall, F. (1998). *Comunicaciones de datos, redes de computadoras y sistemas abiertos* (4.ª ed.). Addison-Wesley.

Kurose, James F.; Ross, Keith W. (2005). *Computer networking: a top-down approach featuring the Internet*. Addison-Wesley.

Stallings, W. (2000). *Comunicaciones de datos y redes de computadores 6*. Prentice-Hall.

Tanenbaum, Andrew S. (2003). *Redes de computadores* (4.ª ed.). Pearson.

Enlaces de interés

Web del foroATM

Web del Internet Architecture Board

Web del IEEE

Web de la Unión Internacional de Telecomunicaciones

